

# BATIMETRIA FLUVIAL ESTIMADA COM DADOS ORBITAIS: ESTUDO DE CASO NO ALTO CURSO DO RIO PARAGUAI COM O SENSOR ASTER

Hiran ZANI <sup>1</sup>, Mario Luis ASSINE <sup>1</sup>, Aguinaldo SILVA <sup>2</sup>

(1) Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, UNESP/Campus Rio Claro. Avenida 24-A, 1515 – Bela Vista. CEP 13506-900. Rio Claro, SP. Endereços eletrônicos: hiran@zani.com.br; assine@rc.unesp.br

(2) Departamento de Ciências do Ambiente – DAM, Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, UFMS/ Campus do Pantanal. Avenida Rio Branco, 1.270. CEP 79304-902. Corumbá, MS. Endereço eletrônico: aguinald\_silva@yahoo.com.br

Introdução  
Materiais e Meios  
    Dados Batimétricos  
    Imagens ASTER  
Métodos  
    Interpolação dos Dados de Campo  
    Análise dos Dados Orbitais  
    Desenvolvimento do Modelo  
Resultados e Discussão  
Considerações Finais  
Agradecimentos  
Referências Bibliográficas

**RESUMO** – O rio Paraguai é o principal tributário do rio Paraná, percorrendo uma extensão de 1.693 km em território brasileiro. O rio é de grande importância para a economia da Região Centro-Oeste, sendo uma das principais vias de escoamento da produção agrícola regional. Processos de sedimentação no canal têm exigido dragagem contínua em alguns pontos do rio para a manutenção da hidrovia. Para a localização destes pontos são necessários levantamentos batimétricos sistemáticos, realizados com ecobatímetros instalados em embarcações. Neste trabalho é analisada a viabilidade de aplicação do sensor orbital ASTER como instrumento para a extração de informações batimétricas do rio Paraguai. Para tal, foram aplicadas técnicas de processamento digital de imagens e de análise geoestatística. Dados coletados no campo foram utilizados para correlações estatísticas e determinação do desvio padrão dos dados. Profundidades extraídas do comprimento de onda do vermelho (banda 2; 0,63 – 0,69 $\mu$ m) foram as que apresentaram maior correlação com os dados obtidos diretamente no campo, especialmente para profundidades inferiores a 1,7 m. O método geoestatístico diminuiu a dispersão do modelo de 43 cm para 36 cm, mitigando a influência de elementos indesejados, tais como vegetação macrófita aquática e sedimentos em suspensão. A morfologia do canal pode também ser reconstituída satisfatoriamente com os valores digitais de da faixa do vermelho, convertidos em informações batimétricas. Os resultados alcançados permitiram concluir que dados orbitais do sensor ASTER podem fornecer informações batimétricas confiáveis, sendo portanto muito úteis para o monitoramento da migração das barras fluviais e das variações batimétricas menores que 1,7 m ao longo do canal do rio Paraguai.

**Palavras chave:** ASTER, rio Paraguai, batimetria, sensoriamento remoto aplicado.

**ABSTRACT** - *H. Zani, M.L. Assine, A. Silva - River bathymetry estimated from satellite data: a case-study in the upper Paraguay River using ASTER sensor.* The Paraguay River is the main tributary of the Paraná River and has an extension of 1.693 km in Brazilian territory. The navigability conditions are very important for the regional economy because most of the central-west Brazilian agricultural and mineral production is transported by the Paraguay waterway. Increased sedimentation along the channel requires continuous dredging to waterway maintenance. Systematic bathymetric surveys are periodically carried out in order to check depth condition along the channel using echo-sounding devices. In this paper, digital image processing and geostatistical analysis methods were used to analyze the applicability of the ASTER sensor to estimate channel depths in a segment of the upper Paraguay River. The results were compared with field data in order to choose the band with better adjustment and to evaluate the standard deviation. Comparing the VNIR bands, the best fit was presented by the red wavelength (band 2; 0,63 – 0,69  $\mu$ m), showing a good representation of the channel depths shallow than 1,7 m. Applying geostatistical methods, the model accuracy was enhanced from 43 cm to 36 cm and undesired components were slacked. It was concluded that the digital number of band 2, converted to bathymetry information allows a good estimation of river depths and channel morphology.

**Keywords:** ASTER, Paraguay River, bathymetry, applied remote sensing.

## INTRODUÇÃO

O rio Paraguai é um dos mais importantes rios de planície do Brasil e o principal tributário do rio Paraná.

Percorre 2.621 km de sua nascente a norte, na chapada dos Parecis, até sua confluência com o rio Paraná na

fronteira do Paraguai com a Argentina. Sua bacia de drenagem possui uma área de 496.000 km<sup>2</sup>, dos quais 396.800 km<sup>2</sup> em território brasileiro (Figura 1).

A hidrovia do rio Paraguai inicia-se na cidade de Cáceres e se estende em território brasileiro até a foz do rio Apa, com extensão total de 1.323 km. Possui grande importância na economia regional, pois é uma das principais vias de transporte dos produtos agrícolas.

O rio Paraguai apresenta boas condições para a navegação (Silva, 2006), mas com o aumento do desmatamento nas regiões próximas às suas nascentes, processos de sedimentação no canal têm comprometido a funcionalidade da hidrovia (Silva et al., 2007), demandando dragagem em áreas críticas para remoção de sedimentos que se acumulam sob a forma de barras arenosas. Para isso, levantamentos batimétricos sistemáticos, com equipamentos de campo, são periodicamente realizados no canal do rio.

Dados coletados por sensores orbitais constituem uma interessante alternativa para a avaliação da profundidade do leito de canais fluviais (e.g., Fonstad & Marcus, 2005). Esta abordagem considera que a reflectância superficial em um corpo de água ópticamente

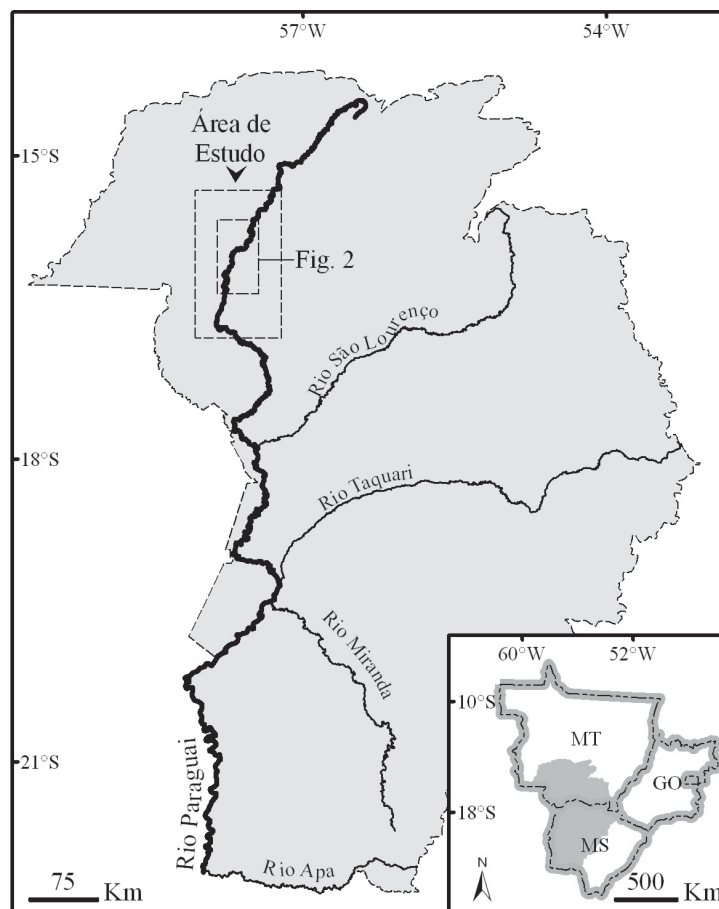
raso é composta por informações de seu leito (Maritorena et al., 1994) e que a diferença de intensidade da energia eletromagnética em distintos níveis de profundidade pode revelar informações batimétricas, conforme demonstra a Equação de Beer-Lambert (Serway, 1983):

$$I = I_0 e^{-cx} \quad (1)$$

onde: (I) é a intensidade da luz, (I<sub>0</sub>) é a intensidade da luz em x = 0, (e) é a base dos logaritmos naturais, (c) é constante de absorção média da luz através da coluna d'água e (x) é a espessura do meio percorrido pela energia eletromagnética.

Imagens multiespectrais têm-se mostrado a alternativa mais viável para este tipo de análise em ambiente fluvial (e.g., Lyon et al., 1992; Whited et al., 2002, Fonstad & Marcus, 2005; Gilvear et al., 2007). No entanto, erros e limitações relacionadas ao seu processo de captação são comuns em dados de sensores remotos, como distorções geométricas e interferência atmosférica (Novo, 1992; Campbell, 2002).

Em ambientes fluviais, outros fatores podem comprometer a análise batimétrica baseada em informações orbitais. A variabilidade litológica ao longo



**FIGURA 1.** Localização da área de estudo na bacia hidrográfica do Alto Paraguai, com destaque para seus principais afluentes.

do canal, a presença de vegetação macrófita aquática e o grande volume de carga de sedimentos em suspensão comumente provocam equívocos na análise da profundidade do leito e estimativa da coluna d'água (Meer & Jong, 2002). Técnicas de processamento digital de imagens podem mitigar a influência destes componentes indesejados (Jensen, 2000) e aumentar

a correlação estatística entre os dados reais de profundidade e os estimados a partir de sensores remotos (e.g., Carbonneau et al., 2006).

Este trabalho tem por objetivo avaliar o potencial de dados orbitais provenientes do sensor ASTER para análise de profundidades do rio Paraguai e criar um modelo para a geração de mapas batimétricos do canal.

## MATERIAIS E MEIOS

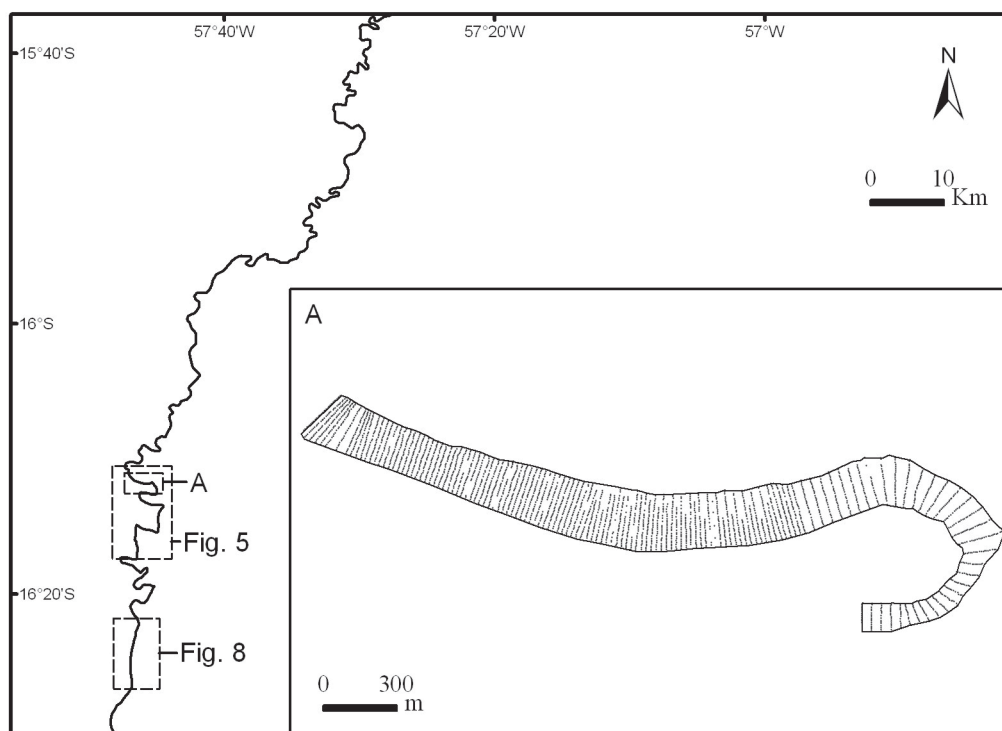
### DADOS BATIMÉTRICOS

O levantamento em campo dos dados batimétricos foi executado pela Hidrovia do Rio Paraguai (AHIPAR) nos meses de Julho e Agosto de 2004. As informações foram coletadas em seções transversais ao talvegue principal do rio Paraguai, formando sucessivos perfis com espaçamento médio de 20 m e extensão variável de acordo com a largura do rio.

Uma embarcação munida do Sistema de Posicionamento Global Diferencial (DGPS) OmniSTAR, com receptor Max-CSI, acoplado a um ecobatímetro digital Raytheon 719-MK4 com transdutor de 200 kHz, adquiriu sistematicamente dados de profundidade com precisão horizontal e vertical, respectivamente, de  $\pm 1$  m e  $\pm 0,01$  m (com 95% de intervalo de confiança).

Operações diárias para calibração do transdutor em profundidades conhecidas foram realizadas para manter a acurácia dos dados. Os dados de posicionamento e profundidade do canal foram integrados através do *software* Hypack e convertidos para o formato tabular ASCII (x,y,z), resultando em uma tabela de pontos batimétricos georreferenciados.

Somente algumas áreas do rio Paraguai apresentam este tipo de levantamento detalhado. Para o presente estudo foram adquiridos dados de um segmento do rio Paraguai conhecido como Passagem Velha (Figura 2), que apresenta padrão meandrante de canal e profundidades que oscilam de 0,1 a 8,0 m. Este trecho possui extensão aproximada de 4.000 m e é composto por 2.048 pontos de informações batimétricas georreferenciadas.



**FIGURA 2.** Trecho Passagem Velha no rio Paraguai, com indicação dos perfis batimétricos coletados em campo.

## IMAGENS ASTER

O sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) é um componente a bordo do satélite EOS-Terra, composto pelos instrumentos VNIR (visível e infravermelho próximo; 0,52 a 0,86  $\mu\text{m}$ ), SWIR (infravermelho de ondas curtas; 1,60 a 2,43  $\mu\text{m}$ ) e TIR (infravermelho termal; 8,12 a 11,65  $\mu\text{m}$ ) (Abrams, 2000). Na análise apresentada neste trabalho foram utilizados dados VNIR devido ao fato de apresentarem alta resolução espacial (15 m) e se aproximarem das regiões ideais do espectro eletromagnético para a análise batimétrica (e.g., Lyzenga, 1981; Carbonneau et al., 2006).

As imagens do sensor ASTER são distribuídas pelo *Land Processes Distributed Active Archive Center* (LP-DAAC) em três níveis de processamento. Todos os dados adquiridos pelo sensor ASTER são corrigidos para o nível 1 (L1) antes de sua distribuição comercial. Os principais processamentos nessa etapa são a separação dos dados em bandas espectrais, edição de um cabeçalho de leitura e correção geométrica das imagens com precisão de  $\pm 0,1$  *pixel* (Abrams & Hook, 2002). As imagens dos níveis 2 (L2) e 3 (L3) são produtos específicos, gerados sob demanda, a partir das imagens L1. Neste trabalho foi utilizado o produto

L2-AST07, que contém dados dos instrumentos VNIR e SWIR corrigidos para o efeito da atmosfera e convertidos em reflectância de superfície. A cena utilizada foi captada no dia 14 de Julho de 2004 às 14:17 h e não apresenta cobertura de nuvens.

O método utilizado pelo LP-DAAC para a geração do produto L2-AST07 consiste na aplicação de um modelo que prevê a absorção e reflexão da radiação pela atmosfera (Thome et al., 1998), em conjunto com dados climatológicos obtidos pelo *National Center for Environmental Prediction* (NCEP). Posteriormente, um modelo digital de elevação fornece a declividade e elevação do terreno para a obtenção da reflectância de superfície (Abrams & Hook, 2002). Em áreas com relevos de baixas amplitudes, como a região estudada neste trabalho, a acurácia absoluta do produto L2-AST07 é de  $\pm 0,01$  % para terrenos com reflectância inferior a 0,15 (adimensional) e  $\pm 7$  % para terrenos com reflectância superior a 0,15 (adimensional) (Abrams & Hook, 2002). A utilização de um produto com estas especificidades justifica-se pela necessidade da atenuação de efeitos causados pela geometria do satélite e posição solar, assim como correção atmosférica para os dados registrados pelo sensor, fundamental neste tipo de abordagem.

## MÉTODOS

### INTERPOLAÇÃO DOS DADOS DE CAMPO

A malha de pontos batimétricos georreferenciados referente ao trecho Passagem Velha do rio Paraguai, após conversão para o formato ASCII, foi inserida no *software* Surfer 8 para interpolação dos dados e formação de um plano de informação matricial. A alta densidade dos pontos da malha Passagem Velha permitiu a geração de um plano de informação com resolução espacial de 15m, com as mesmas dimensões dos dados orbitais. Para a interpolação dos dados foi utilizado o algoritmo da Mínima Curvatura (Smith & Wessel 1990). Este método faz uso de uma série de polinômios locais, que atribuem menor peso às informações com valores anômalos, o que resulta em uma superfície de aspecto suavizado (Webster & Oliver, 2007).

Este plano de informação possibilitou o estabelecimento de relações entre os dados de profundidade medidos no campo com os valores de *pixel* das imagens ASTER. A comparação estatística destes dados determinou o comprimento de onda ideal para a representação dos dados de profundidade e forneceu a relação para determinar a constante de absorção média da luz através da coluna d'água (*c*).

### ANÁLISE DOS DADOS ORBITAIS

A análise dos dados orbitais teve início com a delimitação precisa do canal do rio Paraguai. Para isto foi realizada uma classificação supervisionada da imagem ASTER, com as faixas espectrais do verde (banda 1; 0,52 – 0,60  $\mu\text{m}$ ), vermelho (banda 2; 0,63 – 0,69  $\mu\text{m}$ ) e infravermelho próximo (banda 3; 0,76 – 0,86  $\mu\text{m}$ ) do instrumento VNIR. Através do *software* ENVI 4.0 foram selecionados 12.152 *pixels* de treinamento no canal do rio Paraguai, em composição colorida 3R2G1B e utilizado o classificador da Maxver com 90% de limiar de aceitação. Posteriormente, foram utilizados filtros de aglutinação (*clump*) e peneiramento (*sieve*) para homogeneização dos resultados e conversão dos mesmos em um polígono do tipo *shape*.

O passo seguinte foi a construção de diagramas de dispersão, relacionando as informações batimétricas interpoladas dos dados de campo com os valores digitais (*digital numbers*, DN) das bandas 1, 2 e 3 do sensor ASTER. Através do polígono obtido na classificação, foi possível recortar os dados de batimetria e da imagem com as mesmas dimensões e visualizar a dispersão do DN de cada faixa espectral com relação aos valores de batimetria mensurados em campo. Estes gráficos

foram úteis para mostrar a correlação dos dados de profundidade do rio Paraguai com os valores registrados pelo sensor, assim como auxiliar na determinação da profundidade máxima que pode ser estimada a partir dos dados orbitais. Para suporte quantitativo, na escolha da faixa espectral com melhor representatividade, foi calculado o coeficiente de correlação de Pearson ( $r^2$ ).

Após a seleção da faixa espectral com melhor representatividade da profundidade, o método geoestatístico de krigagem foi aplicado unicamente nos DN da banda do sensor ASTER com maior  $r^2$  com relação aos dados batimétricos de campo. A etapa inicial desta metodologia, segundo Webster & Oliver (2007), consiste na verificação de possível correlação espacial dos *pixels* que representam o canal do rio. Esta correlação é demonstrada através do semivariograma experimental, que descreve quantitativamente a variância de dados regionalizados, sendo sua modelagem fundamental no processo de interpolação pelo método da krigagem (Landim, 2006). O ajuste do semivariograma experimental, obtido com os dados extraídos da imagem orbital, à um modelo teórico de comportamento de dados correlacionados espacialmente, permite a interpolação de valores não amostrados e enquadra os existentes ao comportamento regional (Goovaerts, 1997). Portanto, ao se realizar este procedimento nos dados ASTER dentro do canal do rio Paraguai, elementos que foram capturados pelo sensor e que não apresentam correlação espacial direta com o leito (e.g., vegetação macrófita, sedimentos em suspensão, pequenas variações litológicas) serão atenuados após interpolação pelo método da krigagem.

Os semivariogramas experimentais foram construídos a partir dos valores de *pixel* da imagem ASTER, exportados do *software* ENVI 4.0 em formato ASCII para o Surfer 8. As amostras utilizadas para composição dos semivariogramas foram coletadas aleatoriamente, em regiões da imagem que representam o canal do rio Paraguai. Foi amostrado um máximo de 3.500 *pixels* para cada semivariograma experimental construído, a fim de priorizar relações espaciais locais e evitar influência de possível tendência global nos dados. As amostras que demonstraram melhor representatividade do leito foram ajustadas manualmente à um modelo teórico de semivariância, fornecendo os coeficientes utilizados na krigagem ordinária para a interpolação dos dados orbitais (Matheron, 1963).

## DESENVOLVIMENTO DO MODELO

Para a generalização do princípio de Beer-Lambert (Serway, 1983) em dados orbitais deve-se considerar que a irradiância solar possui ângulo de incidência homogêneo ( $46,16^\circ$  na coordenada central da imagem

utilizada) em toda a cena e que a espessura percorrida pela luz na coluna d'água ( $x$ ) representa a profundidade do canal ( $z$ ) (Denny, 1993). Desta maneira os valores de intensidade ( $I$ ) utilizados na Equação 1 podem ser substituídos pelo número digital (DN) de cada *pixel* que compõe a imagem:

$$DN = DN_0 e^{-c \cdot z} \quad (2)$$

onde: (DN) é o número digital do *pixel* em ( $z$ ) e ( $DN_0$ ) é o número digital do *pixel* em litologia semelhante ao leito com  $z = 0m$ .

Isolando-se o termo da função que representa o valor de profundidade ( $z$ ), a Equação 2 passa a ser reescrita para a seguinte forma:

$$z = -1/c \ln (DN / DN_0) \quad (3)$$

O termo ( $DN_0$ ) é constante para qualquer forma da Equação 3. Seu valor foi determinado de forma direta, sobre a imagem ASTER, através da mediana de um conjunto de 530 *pixels*, representativo para barras longitudinais emersas no rio Paraguai. Considerou-se que estes elementos são compostos pelo mesmo material do leito submerso e que seu comportamento radiométrico não sofre alterações ao longo do canal. Para que  $DN_0$  expresse corretamente a reflectância inicial é fundamental que as amostras digitais coletadas sejam de locais úmidos, mas sem a presença de lâmina d'água (Fonstad & Marcus, 2005).

O termo ( $c$ ) da Equação 3 também é invariável e, para a definição do modelo, se mantém constante em todo o canal do rio Paraguai. Sua determinação foi realizada de forma empírica, através de regressão estatística não-linear (logarítmica) dos dados batimétricos de campo com os *pixels* da mesma região que compõe a imagem orbital. O procedimento computacional envolvido consistiu na conversão dos planos de informação georreferenciados de batimetria e imagem ASTER, ambos representando a mesma área do canal e com mesmas dimensões espaciais, para o formato ASCII. Esta tabela foi inserida no *software* Excel 2003, por meio do qual se realizou o cálculo da regressão com as colunas de profundidade, mensurada em campo, e dados de reflectância orbital, obtendo assim a constante ( $c$ ). Este procedimento foi realizado somente com a faixa espectral do ASTER que melhor representou os dados de profundidade e posterior ao tratamento geoestatístico. Quando não há a disponibilidade de levantamentos prévios, a constante de absorção da luz ( $c$ ) pode ser encontrada a partir da análise da turbidez do rio (e.g., Carbonneau et al., 2006) ou por meio de equações dirigidas a dados hidrológicos de estações fluviométricas (e.g., Knighton, 1998).

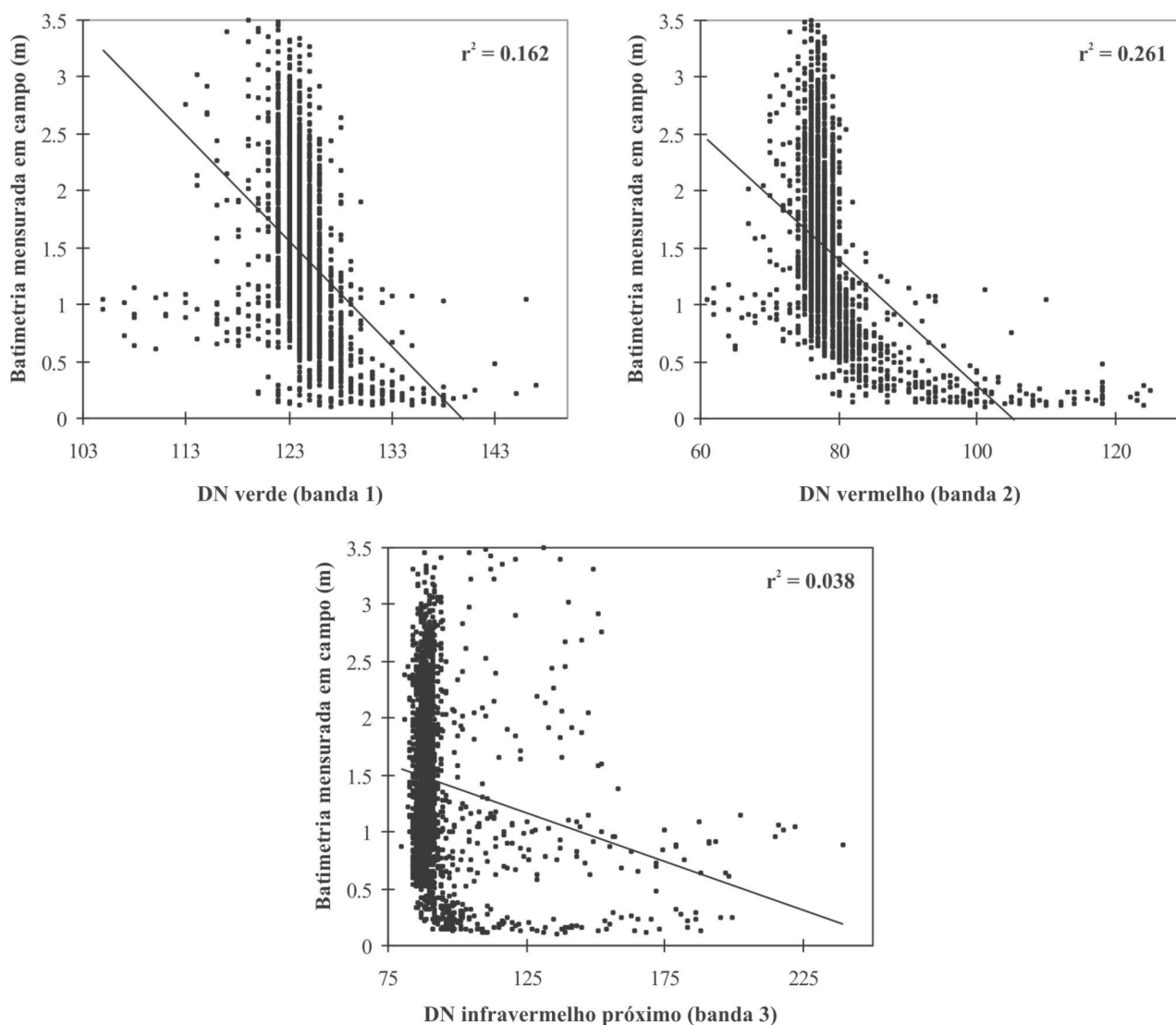
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Diagramas de dispersão evidenciaram que a faixa espectral do vermelho do sensor ASTER (banda 2) possui comprimento de onda com maior coeficiente de correlação linear com dados batimétricos de campo. A Figura 3 permite visualizar que quanto maior a intensidade do DN vermelho, menor a profundidade medida em campo. Este arranjo também aponta que a relação entre a profundidade e os valores registrados pelo sensor não é linear, mas pode ser expressa por uma função logarítmica decrescente, conforme a Equação 3.

Os outros dois gráficos de dispersão não demonstraram tais características, pois nas faixas espectrais do verde e do infravermelho próximo do sensor ASTER, para este trecho do rio Paraguai, não foi verificada correspondência dos dados batimétricos

de campo com os da imagem orbital. Desta maneira, os procedimentos de análise geoestatística, de determinação das constantes para a Equação 3 e de aplicação do modelo foram restritos ao comprimento espectral do vermelho, banda 2 do sensor ASTER.

Embora comprimentos de onda de maior frequência que o vermelho sejam apontados por alguns autores como ideais para a extração de informações sobre a coluna d'água (Lyzenga, 1981; Legleiter et al., 2004; Gilvear et al., 2004; Fonstad & Marcus, 2005; Mishra et al., 2005), a faixa espectral do vermelho também foi utilizada com sucesso para o cálculo de batimetria fluvial em outras pesquisas (Lyon et al., 1992; Winterbottom & Gilvear, 1997; Carbonneau et al., 2006; Gilvear et al., 2007). Em um estudo experimental, Gilvear et al. (2007) identificou que profundidades de



**FIGURA 3.** Gráficos de dispersão dos DN do VNIR do sensor ASTER com os dados de campo.

canais fluviais com substrato litológico homogêneo são melhores caracterizadas na faixa do vermelho, ao passo que nos rios com substratos heterogêneos, a faixa do azul produz melhores resultados. Outras características do ambiente fluvial que apontam para o uso de comprimentos de ondas na faixa do vermelho, são a predominância de baixas profundidades (Lyon et al., 1992; Winterbottom & Gilvear, 1997; Legleiter et al., 2004) e de carga sedimentar suspensa superior a  $20\text{mg.l}^{-1}$  (Alföldi, 1982).

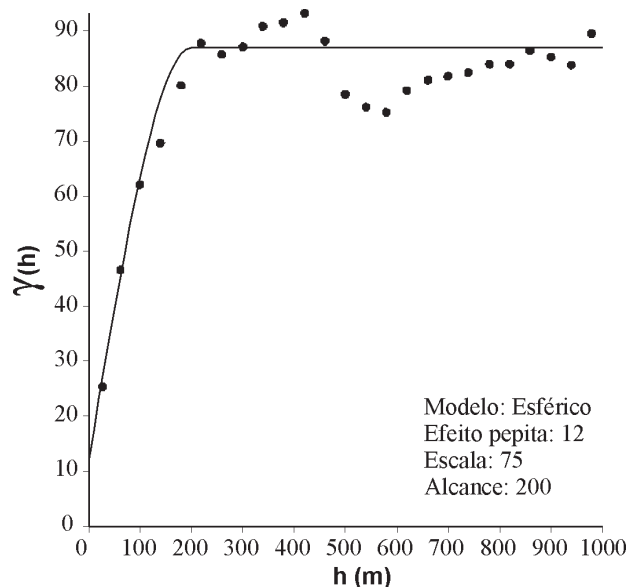
Próximo à área estudada neste trabalho, Silva (2006) constatou uma concentração de  $23\text{mg.l}^{-1}$  de carga sedimentar suspensa (mês de Setembro de 2004) e profundidades médias menores que 1,5 m na estação seca (meses de Junho e Julho). Assim, a utilização da banda 2 do sensor ASTER (faixa espectral do vermelho) justifica-se devido às características físicas do rio Paraguai, sendo apropriado considerar que a moderada carga suspensa e as baixas profundidades são fatores que limitaram a penetração, na coluna d'água, da banda 1 (faixa espectral do verde) do sensor ASTER.

Semelhante aos resultados de Lyzenga (1981) e Carbonneau et al. (2006), os gráficos de dispersão também evidenciaram que a relação entre o DN vermelho (eixo x) e a batimetria (eixo y) deixa de ocorrer em profundidades superiores a 1,6m, restringindo a aplicação do modelo a profundidades máximas de 1,7 m de coluna d'água. Devido a esta penetração limitada da radiação incidente na coluna d'água, as melhores amostras para a construção do semivariograma experimental foram coletadas nas partes de menor profundidade do canal. É muito provável que regiões mais profundas também apresentem interdependência espacial entre seus atributos de profundidades, que, entretanto, não puderam ser verificadas devido às características dos comprimentos de ondas utilizados.

Para verificar se a interdependência espacial dos *pixels* do vermelho varia de acordo com diferentes direções, ou seja, se possui propriedade anisotrópica, foram construídos semivariogramas orientados para  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $135^\circ$  e  $225^\circ$ . Todos mostraram o mesmo resultado, sugerindo característica isotrópica dentro do canal do rio para profundidades inferiores a 1,7 m.

O semivariograma experimental da Figura 4 exhibe a variabilidade dos *pixels* (eixo y) condicionada pela distância (eixo x). Nota-se que o alcance de influência das amostras é de 200 m, ou seja, dois pontos com distância igual ou inferior a 200 m estão correlacionados espacialmente. Esta variabilidade evidencia um controle local sobre o fenômeno, que no presente caso são os ND do vermelho registrados pelo sensor.

A construção do semivariograma permite também a quantificação da aleatoriedade dos dados amostrados.



**FIGURA 4.** Semivariograma experimental (pontos) sobreposto ao modelo teórico esférico (linha) dos DN's na faixa do vermelho, para a aplicação da krigagem ordinária.

Esta característica é expressa pelo efeito pepita. O grau desta aleatoriedade pode ser expresso em três níveis (baixa, média e alta), através da razão entre o efeito pepita e o alcance (Guerra, 1988). No presente semivariograma experimental, construído com os dados orbitais, verificou-se uma componente aleatória média dos dados amostrados. Tal fato sugere que uma malha de dados de maior densidade poderia diminuir esta aleatoriedade e caracterizar melhor o fenômeno, ou seja, dados orbitais de maior resolução espacial possivelmente apresentariam menor efeito pepita nesta mesma área.

Após a aplicação do método geoestatístico na faixa do vermelho, banda 2 do sensor ASTER, foram identificadas as constantes (c) e ( $DN_0$ ) da Equação 3. Uma regressão não-linear entre os dados do ecobatímetro com os valores digitais da faixa do vermelho resultou no valor de  $c = 0,061$ ; para a mediana das amostras digitais, coletadas sob barras emersas úmidas, foi identificado  $DN_0 = 123$ . Desta maneira, com a incorporação dos valores de (c) obtido através de regressão não-linear e da constante ( $DN_0$ ) mensurada a partir da imagem, o modelo para a estimação dos valores batimétricos, definido através da Equação 3, foi reescrito para:

$$z = -1/0.061 \ln (\text{banda 2} / 123) \quad (4)$$

Com o plano de informação gerado pela classificação supervisionada do rio Paraguai criou-se uma máscara digital que foi utilizada para confinar a

aplicação do modelo somente nos limites do canal da área de estudo. O modelo de dado, resultante dos processamentos de imagens e análise geoestatística, foi do tipo matricial. Neste formato, cada *pixel* representa um dado quantitativo. Assim, a Equação 4 foi aplicada individualmente nos *pixels* do canal do rio, extraídos com o método de classificação Maxver e transformados em valores de batimetria. O agrupamento em camadas homogêneas dos dados resultantes forneceu as classes batimétricas identificadas no canal (Figura 5).

Verificou-se que, após a aplicação do método geoestatístico, houve redução na medida de dispersão entre as profundidades reais e as estimadas pelo modelo, sugerindo incremento na precisão. Valeriano (2004) e Valeriano et al. (2006) utilizaram metodologia semelhante para a modelagem de dados topográficos e concluíram que o método geoestatístico eliminou componentes indesejados, como edificações e antenas, mantendo a acurácia dos dados. Este procedimento, empregado nos DN's do vermelho da banda 2, resultou em um aumento da correlação com os dados batimétricos medidos com ecobatímetro (Figura 6) e forneceu maior acurácia ao modelo. O desvio padrão das amostras, que quantifica o grau de dispersão dos dados e, conseqüentemente, o erro médio dos valores estimados, após a interpolação por krigagem foi de 36 cm, contra 43 cm sem a aplicação da análise geoestatística. No entanto, esta medida de erro só pode ser obtida em locais onde existem informações de campo, sendo restrita, portanto ao trecho Passagem Velha.

O aumento da correlação entre os dados e menor grau de dispersão do modelo sugere que o método geoestatístico mitigou a influência dos componentes indesejados presentes no canal. Portanto, a maior dispersão presente na Figura 6A pode ser atribuída à presença de elementos como vegetação macrófita ou carga sedimentar suspensa, que obliteram parcialmente a visibilidade do leito.

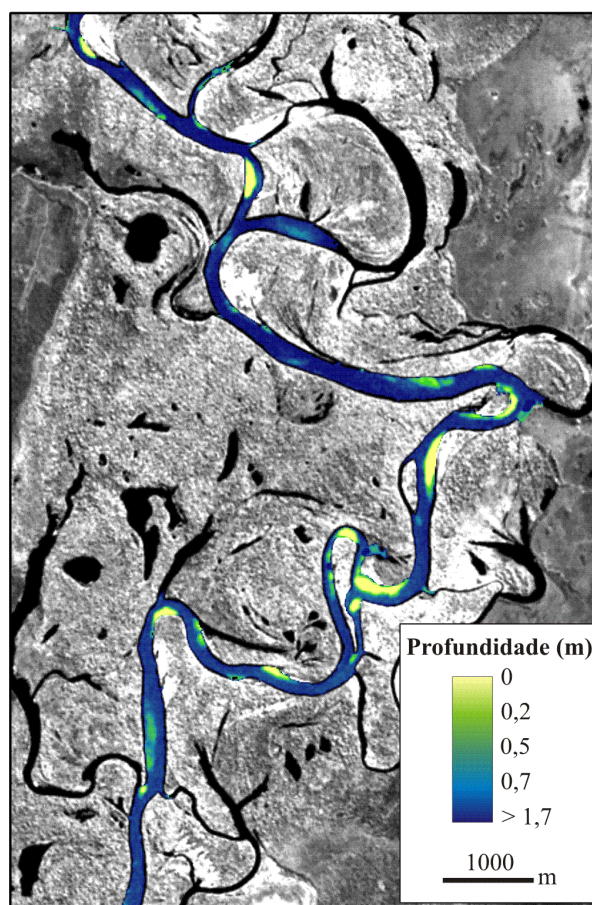
Tolk et al. (2000) identificou que cargas sedimentares superiores a  $100 \text{ mg.l}^{-1}$  passam a ser um obstáculo para a penetração da energia eletromagnética na coluna d'água. No trecho do rio Paraguai analisado por Silva (2006), os valores quantificados em período seco não excedem  $23 \text{ mg.l}^{-1}$ , no entanto a distribuição deste valor não é homogênea. Em canais de padrão meandrante, as maiores concentrações de sólidos suspensos estão na parte côncava do canal, em profundidades de 10 a 30 cm. Zonas próximas às barras não vegetadas também possuem maior volume de sedimentos suspensos (Younis, 1996). Nestes locais os valores batimétricos estimados de forma remota são subestimados, resultando em valores menores de profundidade (Figura 7).

Ao contrário dos sólidos suspensos, vegetação do tipo macrófita está espacialmente concentrada em

locais de menor turbulência. Regiões marginais, meandros abandonados e braços secundários tenderão a apresentar valores superestimados (maior profundidade). Portanto, quando se assume que a constante (c) da Equação 3 é homogênea para todo o rio, tem-se um desvio padrão maior dos valores estimados nestas porções do canal.

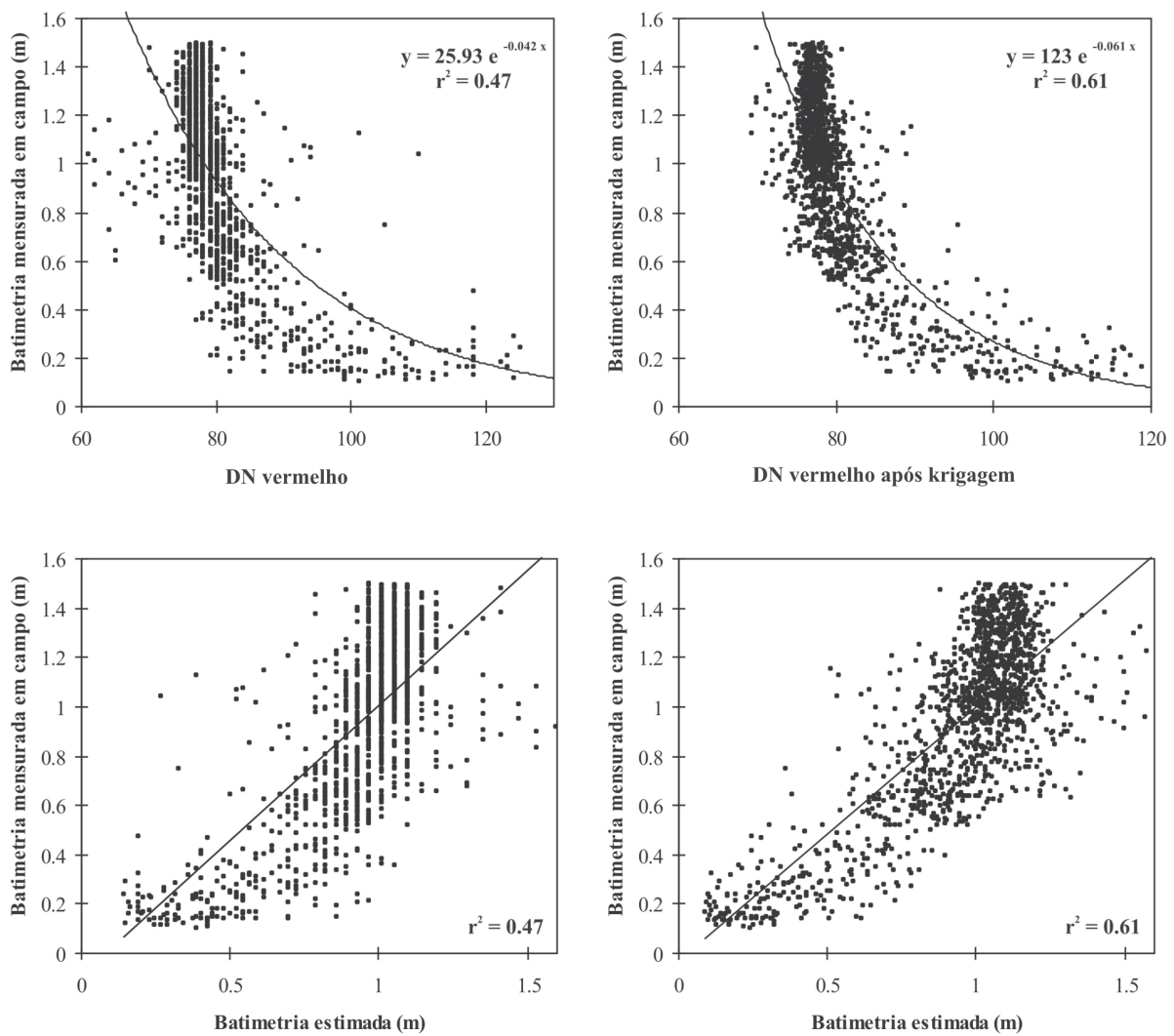
A resolução espacial do produto gerado pelo modelo possui a mesma dimensão do pixel da imagem. Deste modo, a cada  $225\text{m}^2$  foi estimado um valor de profundidade. Barras de areia no interior do canal e depósitos de barra em pontal se destacam na representação dos dados, apresentando boa definição batimétrica.

A elaboração de perfis transversais a partir dos dados obtidos pelo modelo permitiu identificar a forma do canal e a localização do talvegue, como no segmento ilustrado pela Figura 8, onde predomina padrão retilíneo de canal. Rios retilíneos com moderada carga sedimentar em suspensão tendem a favorecer a construção de barras alternadas (Schumm, 1977), resultando em assimetria do canal, como pode ser observado nos perfis da Figura 8.

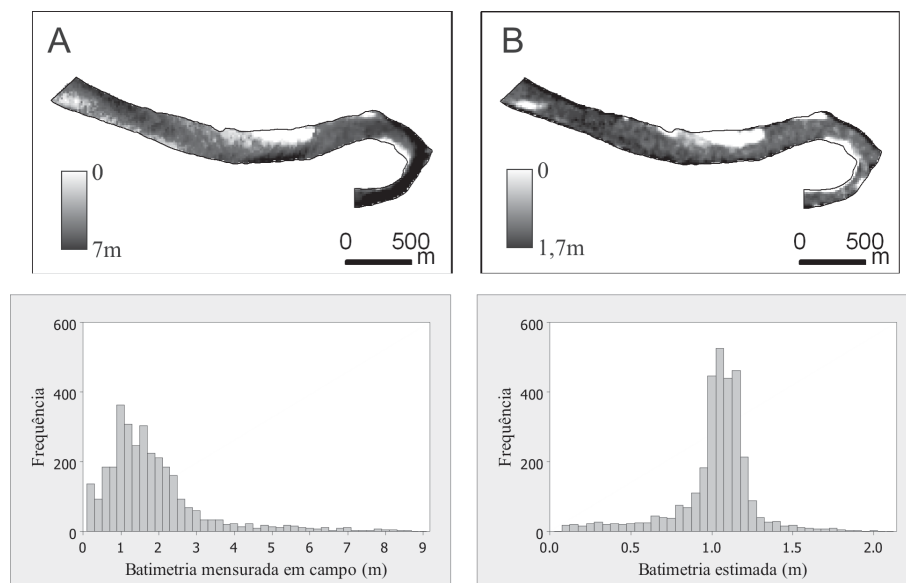


**FIGURA 5.** Batimetria estimada a partir da aplicação da Equação 4 na banda 2 pós-processada. As informações batimétricas estão sobrepostas à banda 3 do sensor ASTER.

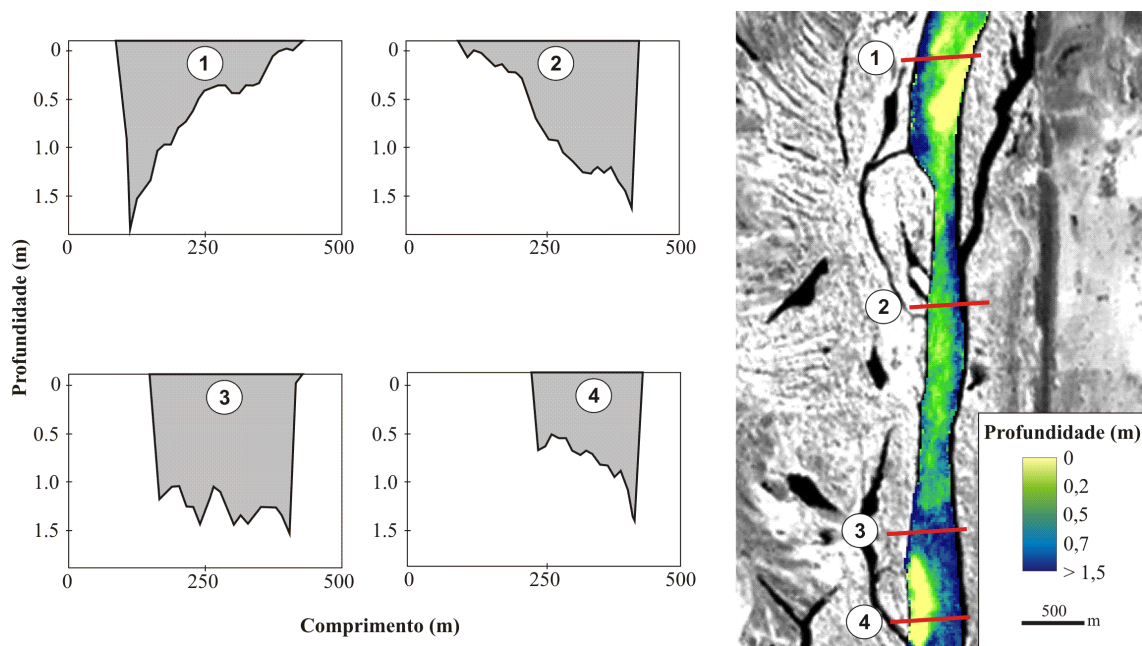




**FIGURA 6.** Comparação entre modelos batimétricos. A- sem análise geoestatística; B - com a aplicação do método geoestatístico.



**FIGURA 7.** Comparação visual entre (A) Matriz de dados batimétricos obtidos em campo e (B) matriz dos dados batimétricos calculados pelo modelo. As menores profundidades estimadas pelo modelo na parte côncava do canal não condizem com a realidade, sendo este erro associado à maior concentração de sedimentos suspensos nesta porção do canal. Da comparação dos histogramas, nota-se a limitação do modelo em estimar profundidades superiores a 1,7 m.



**FIGURA 8.** Perfis transversais de profundidade do rio Paraguri derivados de valores batimétricos estimados a partir da banda 2, sobrepostos a uma imagem da banda 3 do sensor ASTER.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Informações batimétricas coletadas em campo com ecobatímetro possuem alta resolução e abrangência, constituindo o método mais preciso para a caracterização detalhada das profundidades do canal. Projetos de grande porte e de ampla importância regional, como a construção de uma hidrovía, necessitam de informações minuciosas para o planejamento e bom funcionamento do sistema. Neste caso, a coleta de dados de profundidade deve ser realizada com grande controle de campo. Técnicas de sensoriamento remoto, quando empregadas para análise batimétrica, devem ser aplicadas com cautela, porque ainda necessitam de mais testes de confiabilidade.

Este trabalho representa uma contribuição neste sentido. A principal conclusão é que informações obtidas

a partir da banda 2 (faixa espectral do vermelho) do sensor ASTER permitiram reproduzir com fidelidade as formas e a profundidade do canal, constituindo uma ferramenta de baixo custo para análises expeditas. Avanços recentes na resolução espacial de sensores orbitais comerciais poderão fornecer futuramente dados para a elaboração de produtos com maior detalhe e confiabilidade.

A técnica utilizada pode também auxiliar em estudos sobre a evolução de sistemas fluviais como o do rio Paraguri. Imagens obtidas em diferentes datas podem fornecer importantes informações sobre a dinâmica de sedimentação ao longo do canal, permitindo assim traçar cenários a respeito de seu comportamento futuro.

## AGRADECIMENTOS

Os autores externam seus agradecimentos à FAPESP pelo apoio à pesquisa (processo 07/55987-3); ao CNPq pela concessão de bolsa PQ a Mario L. Assine (308724/2006-2) e de doutorado a Aguinaldo Silva; à AHIPAR pela concessão dos dados batimétricos; ao LP-DAAC por processar e fornecer as imagens ASTER gratuitamente; aos professores Paulo M. Barbosa Landim e Edvard Elias de Souza e ao colega Ericsson Hideki Hayakwa pela leitura crítica do texto, correções e sugestões apresentadas. Os autores também agradecem aos revisores anônimos, cujas contribuições foram essenciais para o aprimoramento deste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABRAMS, M.J. The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER): Data products for the high resolution imager on NASA's Terra Platform. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21, p. 847-859, 2000.
2. ABRAMS, M. & HOOK, S. **ASTER user handbook**. Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory, 2002.
3. ALFÖLDI, T.T. Remote sensing for water quality monitoring. In: C.J. JOHANNSEN & J.L. SANDERS, **Remote sensing**

- for resources management, Iowa: Soil Conservation Society of America, p. 317-328, 1982.
4. CAMPBELL, J.B. **Introduction to remote sensing**. Nova York: Guilford, 3. ed., 621 p., 2002.
  5. CARBONNEAU, P.E.; LANE, S.N.; BERGERON, N. Feature based image processing methods applied to bathymetric measurements from airborne remote sensing in fluvial environments. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 31, p. 1413-1423, 2006.
  6. DENNY, M.W. **Air and Water: The Biology and Physics of Life's Media**. Princeton University Press, Princeton, NJ, 360 p., 1993.
  7. FONSTAD, M.A. & MARCUS, W.A. Remote sensing of stream depths with hydraulic assisted bathymetry (HAB) models. **Geomorphology**, v. 72, p. 320-329, 2005.
  8. GILVEAR, D.; HUNTER, P.; HIGGINS, T. An experimental approach to the measurement of the effects of water depth on optical and near infra-red reflectance: a field-based assessment of the feasibility of mapping submerged instream habitat. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, p. 2241-2256, 2007.
  9. GILVEAR, D.; TYLER, A.; DAVIDS, C. Detection of estuarine and tidal river hydromorphology using hyperspectral and LiDAR data. Forth Estuary, Scotland. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 61, p. 379-392, 2004.
  10. GOOVAERTS, P. **Geostatistics for Natural Resources Evaluation**. Oxford University Press, 496 p., 1997.
  11. GUERRA, P.A.G. **Geostatística operacional**. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, 145 p., 1988.
  12. JENSEN, J.R. **Remote sensing of environment: an earth resource perspective**. USA: Prentice-Hall, 544 p., 2000.
  13. KNIGHTON, A.D. **Fluvial Forms and Processes: A New Perspective**. Nova York, John Wiley & Sons, 383 p., 1998.
  14. LANDIM, P.M.B. Sobre geoestatística e mapas. **Terræ Didática**, v. 2, p. 19-33, 2006.
  15. LEGLEITER, C.J.; ROBERTS, D.A.; MARCUS, W.A.; FONSTAD, M.A. Passive optical remote sensing of river channel morphology and in-stream habitat: physical basis and feasibility. **Remote Sensing of Environment**, v. 93, p. 493-510, 2004.
  16. LYON, J.G.; LUNETTA, R.S.; WILLIAMS, D.C. Airborne multispectral scanner data for evaluating bottom sediment types and water depths of St. Marys river, Michigan. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 58, p. 951-956, 1992.
  17. LYZENGA, D.R. Remote sensing of bottom reflectance and water attenuation parameters in shallow water using aircraft and Landsat data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 2, p. 71-82, 1981.
  18. MARITORENA, S.; MOREL, A.; GENTILI, B. Diffuse reflection of oceanic shallow waters: influence of water depth and bottom albedo. **Limnology and Oceanography**, v. 39, p. 1689-1703, 1994.
  19. MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**, v. 58, p. 1246-1266, 1963.
  20. MEER, F.D. & JONG, S.M. **Imaging Spectrometry, Basic Principles and Prospective Applications**. Nova York: Kluwer, 403 p., 2002.
  21. MISHRA, D.R.; NARUMALANI, S.; RUNDQUIST, D.; LAWSON, M. Characterizing the vertical diffuse attenuation coefficient for downwelling irradiance in coastal waters: Implications for water penetration by high resolution satellite data. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 60, p. 48-64, 2005.
  22. NOVO, E.M.L.M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. Edgard Blücher, 2 ed., 308 p., 1992.
  23. SCHUMM, S.A. **The fluvial system**. Nova York: John Wiley & Sons, 338 p., 1977.
  24. SERWAY, R.A. **Physics for Scientists and Engineers**. CBS, p. 132-133, 1983.
  25. SILVA, A. **Padrões de Canal do rio Paraguai na região de Cáceres, MT**. Maringá, 2006. 80 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual de Maringá.
  26. SILVA, A.; ASSINE, M.L.; ZANI, H.; SOUZA FILHO, E.; ARAÚJO, B. Compartimentação geomorfológica do rio Paraguai na borda norte do Pantanal Mato-Grossense, região de Cáceres, MT. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 59, p. 73-81, 2007.
  27. SMITH, W.H.F. & WESSEL, P. Gridding with Continuous Curvature Splines in Tension. **Geophysics**, v. 55, n. 3, p. 293-305, 1990.
  28. THOME, K.; PALLUCONI, F.; TAKASHIMA, T.; MASUDA, K. Atmospheric correction of ASTER. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, p. 1199-1211, 1998.
  29. TOLK, B.L.; HAN, L.; RUNDQUIST, D.C. The impact of bottom brightness on spectral reflectance of suspended sediments. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21, p. 2259-2268, 2000.
  30. VALERIANO, M.M. **Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul**. São José dos Campos: INPE, 72 p., 2004.
  31. VALERIANO, M.M.; KUPPLICH, T.M.; STORINO, M.; AMARAL, B.D.; MENDES, J. Modeling small watersheds in Brazilian Amazonia with shuttle radar topographic mission-90 m data. **Computer & Geosciences**, v. 32, p. 1169-1181, 2006.
  32. WEBSTER, R. & OLIVER, M.A. **Geostatistics for Environmental Scientists**. Nova York: John Wiley & Sons, 2 ed., 330 p., 2007.
  33. WHITED, D.; STANFORD, J.A.; KIMBALL, J.S. Application of airborne multispectral digital imagery to quantify riverine habitats at different base flows. **River Research and Applications**, v. 18, p. 583-594, 2002.
  34. WINTERBOTTOM, S.J. & GILVEAR, D.J. Quantification of channel bed morphology in gravel-bed rivers using airborne multispectral imagery and aerial photography. **Regulated Rivers: Research and Management**, v. 13, p. 489-499, 1997.
  35. YOUNIS, B.A. Progress in turbulence modeling for open-channel flows. In: ANDERSON, M.; WALLING, D.; BATES, P. (Eds.), **Floodplain Processes**. Nova York: John Wiley & Sons, 658 p., 1996.

*Manuscrito Recebido em: 20 de outubro de 2008  
Revisado e Aceito em: 25 de março de 2009*

