

Revista Brasileira de Cartografia (2017), Nº 69/2: 401-409
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

IDENTIFICAÇÃO DE FEIÇÕES GEOLÓGICAS, GEOMORFOLOGICAS E ANTRÓPICAS DO RESERVATÓRIO DE SÃO SIMÃO UTILIZANDO BATIMETRIA MULTIFEIXE

Identification of Geological, Geomorphological and Anthropic Features of the São Simão Reservoir using Multibeam Bathymetry

**Gabriella Aleixo Rocha¹, Marco Ianniruberto¹, Gustavo Macedo de Mello Baptista¹
& Kayque Bergamaschi Rodrigues Carneiro²**

¹Universidade de Brasília – UnB

Instituto de Geociências

Campus Darcy Ribeiro, ICC, Ala Norte, Caixa Postal 04465, 70919-970
gabriella.aleixo@gmail.com, ianniruberto@unb.br, gmbaptista@unb.br

²RuralTech

SMAS TR 3 Bloco A Sala 304 Ed. The Union - Guarã - Brasília, DF

kayque@ruraltech.com.br

Recebido em 14 de Dezembro, 2016/ Aceito em 11 de Fevereiro, 2017

Received on December 14, 2016/ Accepted on February 11, 2017

RESUMO

O objetivo deste estudo foi mostrar a aplicabilidade de sistemas de ecobatimetria multifeixe para identificar feições geológicas, geomorfológicas e antrópicas submersas no fundo do reservatório de São Simão – GO. O reservatório foi formado pelo represamento do rio Paranaíba e está inserido no contexto da bacia do Paraná. Ele ocupa uma área de 677,57km² e possui um volume de acumulação de 12540 hm³. O levantamento batimétrico foi realizado utilizando dois diferentes modelos de multifeixe de alta frequência e alta resolução, o ODOM MB2 e o RESON 7125. Aquisição, controle de qualidade e processamento dos dados foi realizado com os softwares Teledyne PDS 2000 e QINSy, respectivamente, para redução das sondagens ao mesmo *datum* vertical e remoção de dados espúrios. Para a geração dos mapas, utilizou-se o software ArcGIS, e a interpolação dos dados foi realizada por meio da ferramenta “topo to raster”, desenvolvida para modelar bacias hidrográficas. No ArcGIS, também foi possível realçar as feições localizadas com ferramentas de sombreamento e com o método *curvature*. Como resultado, a batimetria multifeixe apontou uma série de feições, nas quais se destacaram lineamentos, características do leito do canal e dos tributários, barras longitudinais, pontes submersas e pivôs de irrigação, mostrando que a batimetria multifeixe constitui uma ferramenta extremamente útil para o mapeamento e individualização de feições submersas.

Palavras-chave: Geofísica Aquática, Reservatório, Geomorfologia, Batimetria Multifeixe, Modelo Digital de Elevação.

ABSTRACT

The objective of this study was to show the applicability of multi - beam ecobatimetric systems to identify submerged geological, geomorphological and anthropogenic features in the São Simão - GO reservoir. The reservoir was formed by the impoundment of the Paranaíba river and is inserted in the context of the Paraná basin. It occupies an area of 677.57

km² and has an accumulation volume of 12540 hm³. The bathymetric survey was performed using two different high resolution multibeam models, the ODOM MB2 and the RESON 7125. Acquisition, quality control and data processing were performed with the Teledyne PDS 2000 and QINSy packages, respectively, for reduction of soundings to the same vertical datum and removal of spurious data. The software ArcGIS was used for the generation of the maps, where the interpolation of the data was carried out by means of the tool “top-to-raster”, especially suited for modelling hydrographic basins. In ArcGIS, it was also possible to highlight localized features with shading tools and with the “curvature” tool. As a result, multi-beam bathymetry showed a series of features, in which lineaments, channel and tributary bed characteristics, longitudinal bars, submerged bridges and irrigation pivots were highlighted, showing that such high resolution bathymetry is an extremely useful tool for mapping and characterize submerged features.

Keywords: Aquatic Geophysics, Reservoir, Geomorphology, Multi-Beam Bathymetry, Digital Elevation Model.

1. INTRODUÇÃO

Os métodos geofísicos incluem um conjunto de ferramentas de investigação indiretas, que podem ser utilizadas, em especial, no estudo de áreas submersas, considerando a dificuldade de acessibilidade a estes ambientes pelos métodos diretos (SOUZA, 2006). Dentre os métodos de geofísica aquática, há mais de duas décadas a batimetria multifeixe se destaca devido à possibilidade de se obter dados em alta resolução (HUGHES CLARKE *et al.*, 1996; IHO, 2008).

O Sonar Multifeixe (SMF) é uma evolução dos sonares acústicos de monofeixe. Enquanto o monofeixe transmite um feixe vertical, o qual a profundidade da lâmina d’água é determinada com base em medições do tempo de duplo percurso do sinal, o SMF pode transmitir simultaneamente centenas de feixes, realizando assim várias medidas de profundidade em um único ciclo, o que permite a observação em alta resolução e taxa de amostragem de áreas submersas. Por proporcionar uma varredura completa de regiões submersas, o SMF é um dos sistemas mais efetivos para a medição de profundidade com o objetivo de se obter dados de alta resolução e na detecção de objetos e feições submersas (IHO, 2008, FERREIRA *et al.*, 2016).

O uso da batimetria multifeixe vem se firmando como ferramenta para determinação do modelo digital do fundo e o cálculo acurado do volume de reservatórios hídricos (CHOWDHURY *et al.*, 2017), pois as cartas topográficas da época do preenchimento dos reservatórios são geralmente em escala de 1:100.000 ou menores. Modelos digitais obtidos por meio de levantamentos com SMF’s são de grande importância para a caracterização

morfométrica de corpos hídricos (RESCK *et al.*, 2007) e podem auxiliar em estudos evolução de assoreamento, qualidade da água, entre outros. Ferreira *et al.* (2016) apontam ainda que o conhecimento do relevo submerso é essencial para estabelecimento e manutenção de hidrovias, obras civis, locação de cabos e dutos, prospecção de recursos minerais, monitoramento de assoreamento de reservatórios, entre outros.

Apesar de existirem outros métodos para o cálculo de volume dos reservatórios, incluindo alguns de baixo custo (ALCÂNTARA *et al.*, 2010), os levantamentos batimétricos em alta resolução realizados com SMF oferecem também a possibilidade de identificar as feições morfológicas do leito dos reservatórios, apesar de serem poucos os exemplos que desfrutam a metodologia com esta finalidade.

Este trabalho apresenta um método de processamento de dados para realçar o contraste de imagens obtidas de modelos digitais do fundo de reservatórios, visando facilitar a individualização e reconhecimento das feições geológicas, geomorfológicas e antrópicas com aplicação ao reservatório de São Simão (Goiás).

O modelo de elevação obtido neste trabalho apontou, dentre as feições que mais se destacaram, possíveis lineamentos, barras submersas, padrões dos canais dos tributários e do rio principal, diferença de sedimentação ao longo do reservatório e possíveis relíquias de estruturas construídas antes da inundação do reservatório. A identificação destas feições pode ser de grande utilidade no gerenciamento de um reservatório, por exemplo, no entendimento de processos de assoreamento, no resgate de dados morfológicos e geológicos de áreas não previamente mapeadas.

2. METODOLOGIA

O presente estudo foi desenvolvido utilizando-se dados batimétricos e todas as etapas metodológicas são descritas a seguir.

2.1 Caracterização da área

A área de estudo na qual ocorreu o levantamento de batimetria no período entre dezembro de 2015 e janeiro de 2016 refere-se

ao reservatório de São Simão, formado pelo represamento do rio Paranaíba, entre os estados de Goiás e Minas Gerais (Figura 1). De acordo com a CEMIG, Companhia Energética de Minas Gerais, o reservatório, inaugurado em 1978, apresenta uma área de 677,57km² e um volume de acumulação de 12540 hm³. Ele é o último de um complexo de reservatórios antes da confluência com o rio Grande, onde origina-se o rio Paraná.

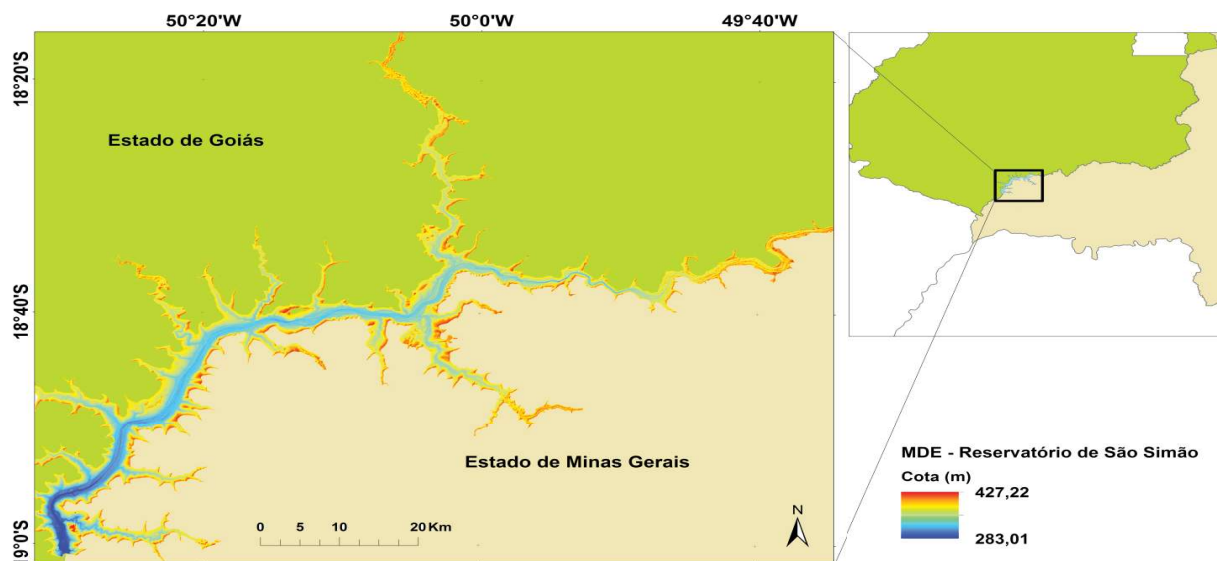


Fig. 1 - Mapa de localização do reservatório de São Simão e o Modelo Digital de Elevação obtido a partir da batimetria do reservatório

O rio Paranaíba está localizado na bacia do Paraná, que faz parte da Supersequência Gondwana III e é caracterizada pelos sedimentos eólicos da Formação Botucatu e os magmáticos da Formação Serra Geral (MILANI *et al.*, 2007).

2.2 Aquisição dos dados

Para alcançar a cobertura máxima da área inundada do reservatório e reduzir o tempo de aquisição, os dados batimétricos foram levantados por dois modelos de SMF diferentes, sendo eles o *ODOM MB2* e o *RESON 7125*, ambos anexados em suportes elaborados especificamente para coleta de dados de batimetria, instalados em embarcações cabinadas do tipo *Levefort CAB 26'*. A batimetria multifeixe cobriu toda a área do reservatório com profundidade acima 10 metros, totalizando aproximadamente 850 linhas de sondagem.

O multifeixe *ODOM MB2* tem uma largura

de faixa de aquisição que chega a até 140°. O equipamento funciona tanto com frequências de 200 kHz quanto 460 kHz, adquirindo até 256 feixes, podendo alcançar uma varredura de até 5,5 vezes a profundidade. O multifeixe *Reson 7125* opera com frequências de 200 a 400 kHz, com um número de feixes entre 256 e 512, respectivamente, distribuídos uniformemente num setor angular de até 165°, podendo alcançar profundidade de até 200 metros (400kHz) ou 500m (200kHz). A varredura máxima pode atingir oito vezes a profundidade da área estudada. Por esse motivo, o multifeixe 7125 foi utilizado em áreas mais profundas do reservatório, a fim de aproveitar a máxima capacidade de cobertura do equipamento. Os dados foram obtidos utilizando frequências de 460 kHz e 400 kHz. Ambos os SMFs utilizados possuem a capacidade de alcançar resolução centimétrica na determinação da profundidade

e resolução espacial decimétrica, na gama de profundidades observadas neste reservatório, com taxa de amostragem de até 50Hz. Os SMF's foram interfaceados com sistemas de posicionamento GNSS diferencial e calibrados seguindo o procedimento padrão, denominado de *patch-test* (GUERLOT, 2000), e perfis de velocidade do som na água foram adquiridos periodicamente com uma sonda *Valeport Mini SVP*.

2.3 Processamento dos dados

O objetivo do processamento dos dados batimétricos adquiridos com os sistemas de multifeixe apresentados nesse trabalho foi à criação de um modelo digital de elevação (MDE) com alta confiabilidade e resolução que pudesse ser utilizado para a identificação de feições geológicas, geomorfológicas e antrópicas. De acordo com Felgueiras (1998), um MDE é uma representação matemática computacional da distribuição de amostras dadas dentro de uma determinada região.

Para obter o MDE, primeiramente selecionaram-se os dados brutos de sondagens com base na eliminação de dados espúrios. Diferentes operações permitem que o usuário elimine as supostas sondagens ruidosas e, portanto, selecione o melhor conjunto de dados (BOURILLET *et al.*, 1996). A eliminação de dados ruidosos ou duvidoso foi realizada por meio dos softwares *Teledyne PDS 2000* e *QINSy*. Ambos os softwares permitem com que cada linha de aquisição seja analisada individualmente e que ruídos, *spikes* e *outliers* sejam eliminados de forma manual ou automática.

Filtros automáticos como, por exemplo, métodos de *de-spiking* (elimina spikes nos dados) e *Adaptive clip* (segue uma média de valores de profundidade e elimina dados fora de uma especificada janela de valores), foram aplicados nessa etapa do processamento. Grande parte dos dados espúrios observados estavam relacionados à vegetação submersa, que não foi retirada na época do enchimento do reservatório.

Após a filtragem dos dados, o MDE foi gerado por meio do software *ArcGIS*, com a ferramenta *Topo to raster*, que é um método de interpolação baseado no algoritmo

ANUDEM (HUTCHINSON *et al.*, 2011), especificamente designado para a criação de MDEs de bacias hidrológicas. Esse método utiliza a técnica de interpolação por diferenças finita e foi aperfeiçoado para ter a eficiência computacional de métodos de interpolação locais como o método de interpolação do Inverso do Quadrado da Distância, mantendo a continuidade da superfície, como acontece nos métodos de interpolação *Kriging* e *Spline*, mas com a capacidade de representar redes de drenagens conectadas. Foi essa característica que orientou a escolha do algoritmo de interpolação do MDE do reservatório, cuja morfologia se encaixa no padrão de redes de drenagens dendríticas.

Para facilitar a visualização de feições no modelo gerado, aplicou-se um efeito de sombreamento no MDE. Um segundo MDE foi gerado por meio da função *curvature*, do módulo *3D Analyst* do *ArcGIS*. Essa ferramenta calcula o valor da segunda derivada de cada célula da superfície de entrada (ESRI, 2016; ZHU, 2016) e permitiu realçar as feições de interesse.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As imagens de batimetria utilizadas nesse estudo são compostas por um MDE colorido obtido por meio da ferramenta *topo to raster* do *ArcGIS* e imagens em tom de cinza obtidas a partir do MDE supracitado com a ferramenta *curvature*, que se mostrou eficiente para realçar feições já detectadas a partir do MDE colorido.

3.1 Feições geológicas e geomorfológicas

Dentre as feições geológicas observadas, as que mais se destacaram foram possíveis lineamentos na direção NW/SE, apresentados por feições alongadas (Figura 2). Os lineamentos são quase sempre controlados estruturalmente e são reportados em diversos mapas geológicos da região do rio Paranaíba, como no estudo da depressão Tectônica Associada ao Lineamento do Rio Paranaíba (OLIVEIRA & CAMPOS, 2012), no diagnóstico hidrográfico do rio Paranaíba (COBRAPE, 2011) e em estudos aerogravimétricos e aeromagnéticos da região (SOARES *et al.*, 2007). No caso mostrado na

Figura 2, os sulcos são provavelmente relacionados às calhas de tributários do rio, com orientação estruturalmente controlada e compatível com a direção preferencial dos lineamentos reportados nos citados estudos geológicos.

As feições geomorfológicas que ocorrem no leito do canal e na planície de inundação estão associadas principalmente às características hidrossedimentológicas do rio principal e dos tributários, e elas continuam preservadas no fundo do atual reservatório. Entre as mudanças que podem ocorrer na geomorfologia de áreas

impactadas pela criação de um reservatório, podem se observar o assoreamento na desembocadura e no vale dos afluentes devido à elevação do nível de base (COELHO NETTO, 2008). Assim no fundo do atual reservatório encontram-se, por exemplo, feições sedimentares desativadas nos antigos deltas dos tributários do canal principal, pois a deposição de sedimentos foi transferida a montante. As figuras 3 e 4 mostram o padrão sinuoso dos meandros abandonados dos tributários na planície de inundação do antigo canal principal.

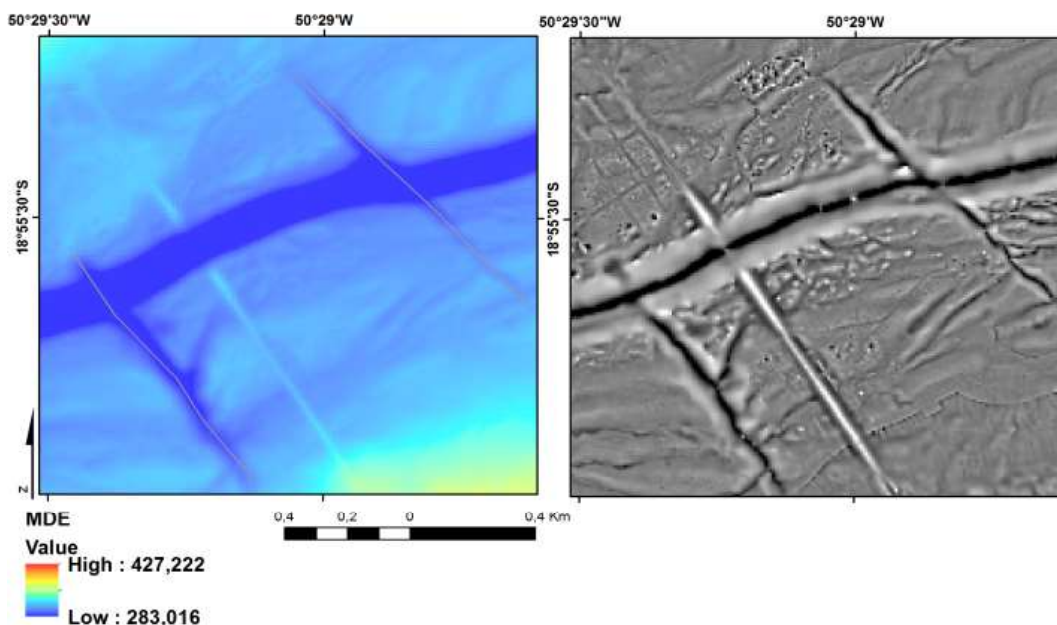


Fig. 2 - Lineamentos na direção NW/SE. Observa-se também a presença de uma ponte submersa localizada entre os lineamentos, relatada por antigos moradores da região.

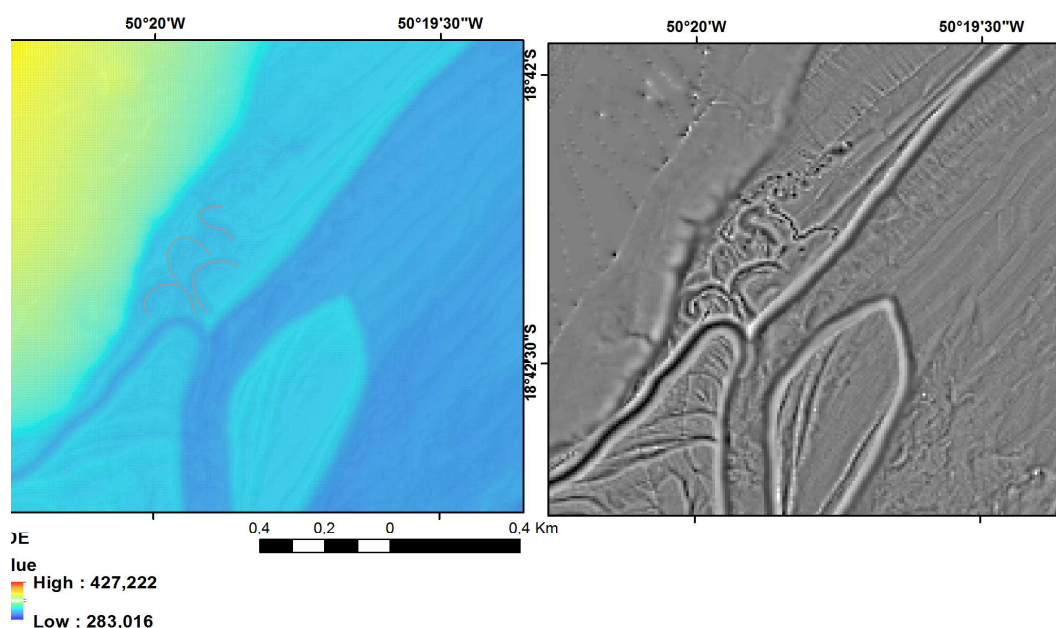


Fig. 3 - Meandro de padrão irregular localizado as margens do canal principal do rio.

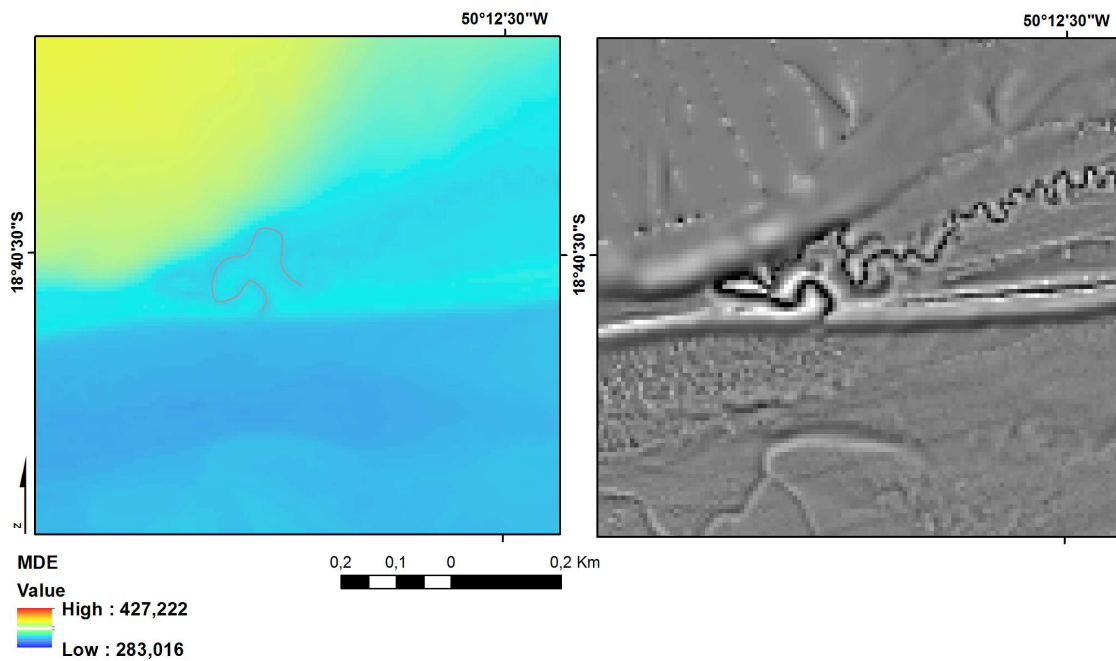


Fig. 4 - Meandros abandonados encontrados ao leito maior do rio Paranaíba.

As feições longitudinais observadas ao longo da planície de inundação no leito maior do antigo curso do rio Paranaíba, agora submerso, como as representadas na Figura 5, poderiam estar relacionadas com depósitos de diques marginais simétricos relativamente ao leito de vazante, formados quando o rio transborda, depositando sedimentos de grossos a finos, em função do afastamento da margem (BIGARELLA, 2003).

Outras feições relevantes encontradas são as barras centrais do canal (Figura 6) que, de acordo com Santos *et al.* (1992), são depósitos cuja altura é inferior ao nível d'água no período da cheia. Ainda segundo Santos *et al.* (1992), as barras se referem desde uma simples feição deposicional até complexas formas derivadas de múltiplos eventos erosivos e deposicionais controlados por processos de acréscimo lateral e vertical de material.

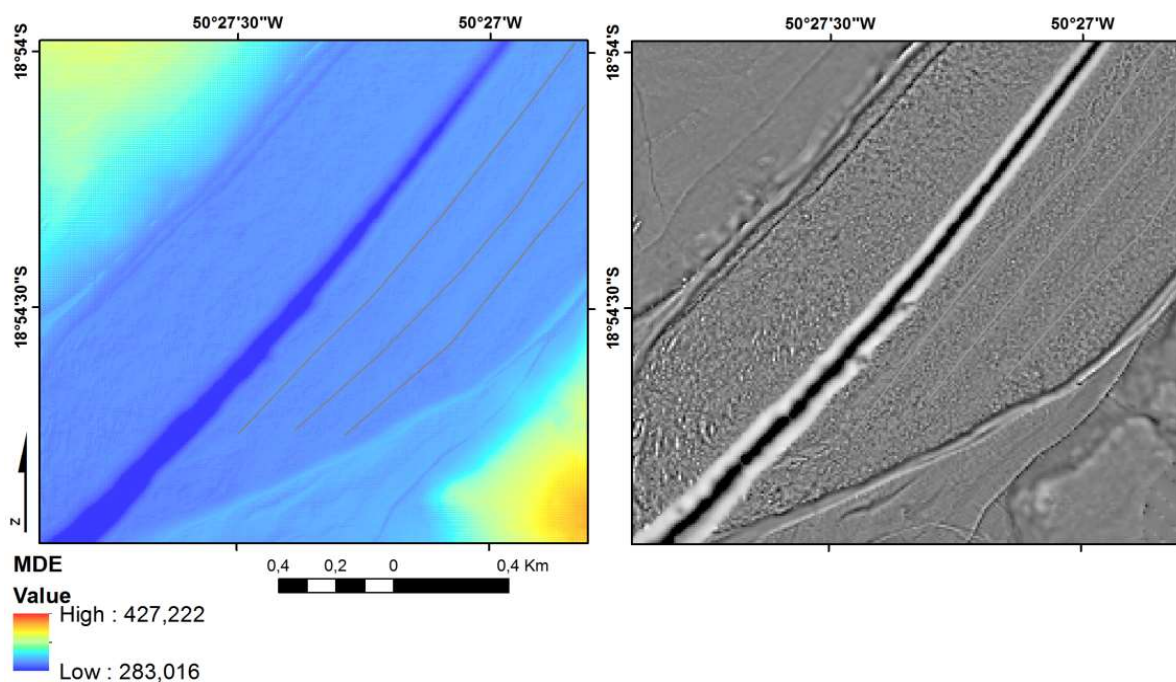


Fig. 5 - Feições longitudinais formadas pelo fluxo do rio.

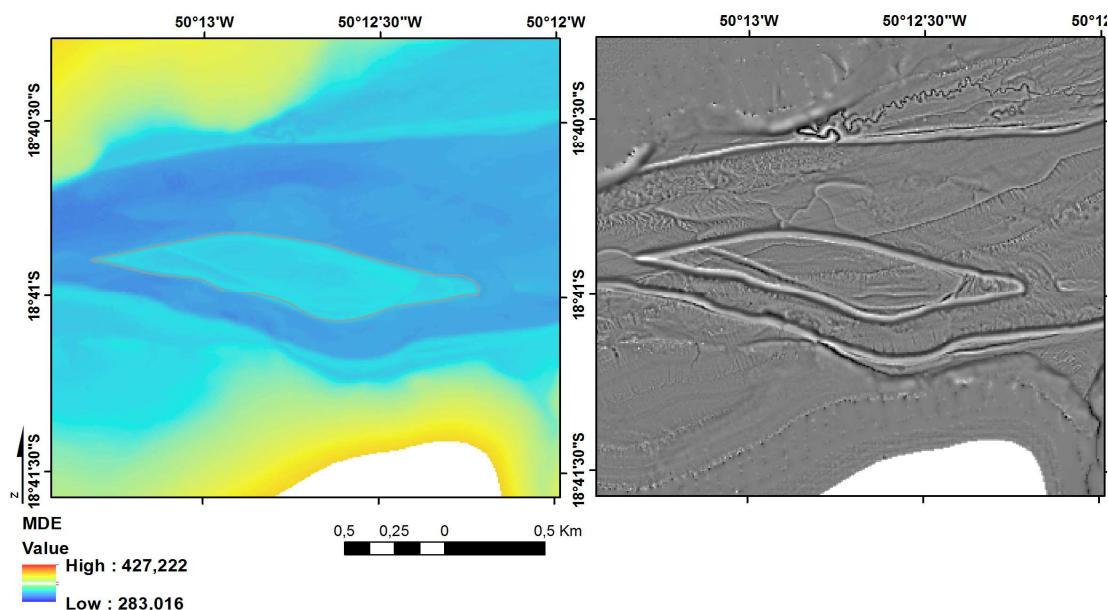


Fig. 6 - Barras longitudinais de meio de canal.

3.2 Feições antrópicas

As estruturas antrópicas dispostas ao longo do canal foram facilmente identificadas pelo distinto padrão morfológico em relação ao meio natural. Em particular, foram identificadas às antigas pontes que cortavam o canal e seus tributários e estruturas circulares que poderiam estar associadas com sistemas de irrigação (Figura 7). Considerando que não foram encontradas imagens de satélite anteriores ao ano de 1978,

data de preenchimento da barragem, não foi possível confirmar essas evidências, entretanto, relatos de antigos moradores indicaram a presença de uma ponte que cortava o canal principal (Figura 2) e a presença de outra ponte que cortava um de seus tributários localizados a sudeste do reservatório (Figura 8). Além disso, a técnica de irrigação com pivô central está amplamente difundida na região do rio Paranaíba (LANDAU, 2013), e há relatos do uso desses sistemas já no início da década de 1980.

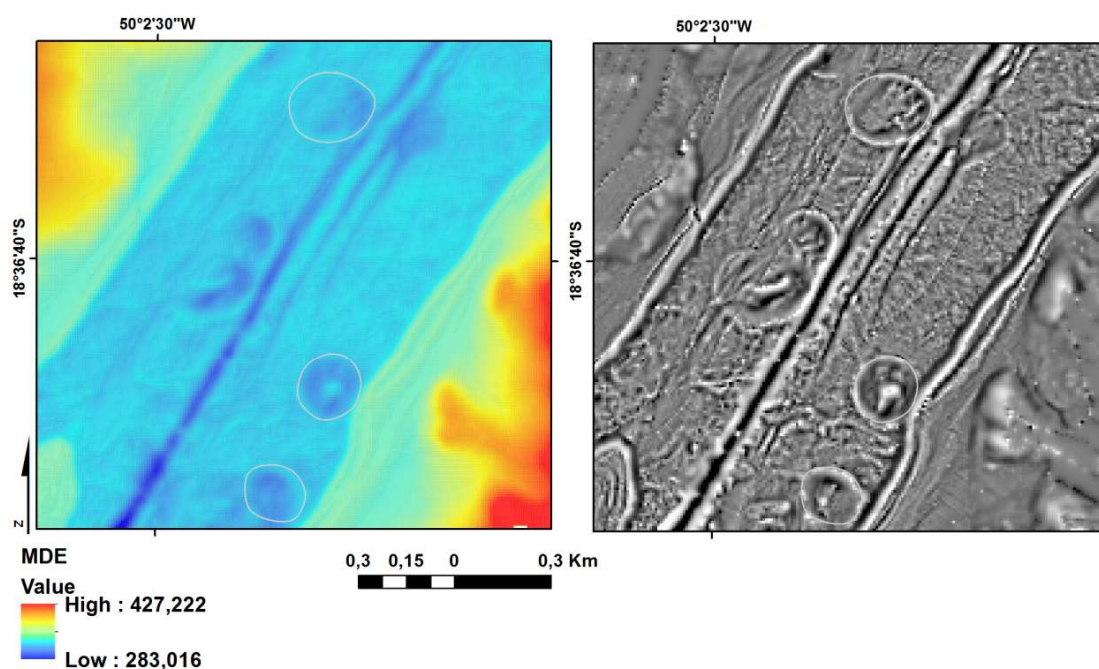


Fig. 7 - Pivôs de Irrigação, estruturas circulares de raio de aproximadamente 200 metros.

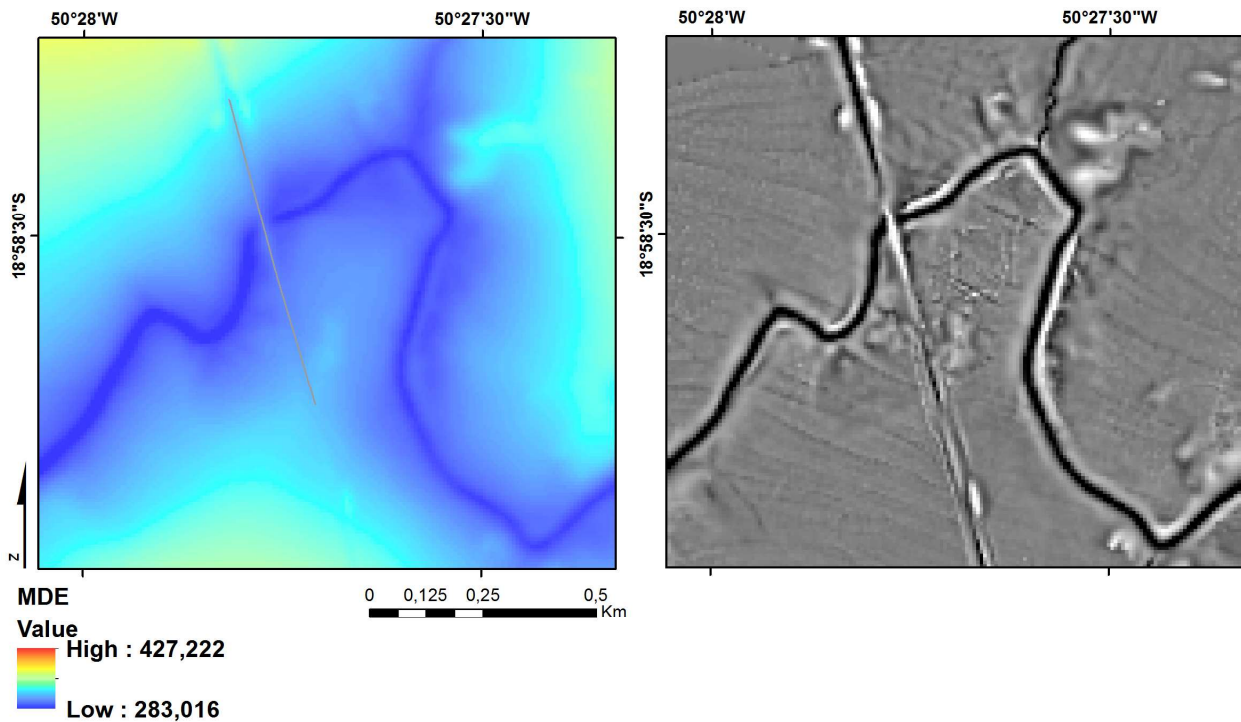


Fig. 8 - Ponte submersa de aproximadamente 1,5 km atravessando um dos tributários localizados a sudeste do reservatório.

É válido ressaltar que embora o SMF produza imagens com alta resolução do fundo, métodos indiretos apresentam muitas vezes ambiguidades em relação à interpretação dos resultados. Outros métodos como, por exemplo, sonar de varredura lateral, imageamento do fundo por meio de fotos e filmagens ou coleta de amostra de matérias do fundo do reservatório, aplicados junto à batimetria, aumentariam a confiabilidade da interpretação das feições descritas nesse trabalho.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo visou demonstrar a possibilidade de utilizar SMF para detecção de feições geológicas, geomorfológicas e antrópicas em áreas submersas, visando complementar levantamentos realizados com sensores remotos e estudos de campo. A área de estudo foi alagada no processo de formação do reservatório da PCH de São Simão, gerando uma relevante alteração tecnogênica da paisagem, enquanto as feições submersas ficaram preservadas.

Apesar de o levantamento ter sido realizado visando o simples cálculo do volume do reservatório e atualização da curva cota-área-volume, os dados foram adquiridos respeitando os

procedimentos para levantamentos hidrográficos categoria 1b da norma S44 (IHO, 2008), portanto garantindo acurácia submétrica, cobertura total do fundo do reservatório e confiabilidade na individualização e posicionamento das feições.

Os mapas gerados mediante batimetria multifeixe de alta resolução permitiu a identificação de feições na superfície submersa do reservatório, mostrando a variedade de estruturas e formas de leito. As características das feições morfológicas encontradas foram realçadas utilizando a função *curvature* do *L*.

O mapeamento das feições submersas de reservatórios proporciona uma ferramenta de análise que contribui na compreensão da evolução do mesmo, ajudando na definição e discussão dos processos naturais e antrópicos responsáveis pelas mudanças na paisagem ao longo dos anos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCÂNTARA, E.; NOVO, E.; STECH, J.; ASSIREU, A.; NASCIMENTO, R.; LORENZZETTI, J.; SOUZA, A. Integrating historical topographic maps and SRTM data to derive the bathymetry of a tropical reservoir. **Journal of Hydrology**, 389(3–4), 2010, p. 311–316.

- BIGARELLA, J.J. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. Florianópolis, Editora da UFSC, 2003 1436p.
- BOURILLET, J.F.; EDY, C.; RAMBERT, F.; SATRA, C.; LOUBRIEU, B. Swath mapping system processing: bathymetry and cartography, **Marine Geophysical Researches**, 18, 1996, p. 487-506.
- COBRAPE. RP 03 - Diagnóstico da Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba. 2011. Disponível em: <http://cbhparanaiba.org.br/uploads/documentos/PRH_PARANAIBA/DOCUMENTOS_APOIO/Parte_A_Caracterizacao_Bacia.pdf> Acesso: 01 janeiro 2017.
- COELHO NETTO, A. L. Geomorfologia fluvial de rios impactados por barragens. **Caminhos de Geografia**, 9(26), 2008, p.16–32.
- ESRI. ArcGIS Pro: How Topo to Raster works. 2016. Disponível em: <<http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/3d-analyst/how-topo-to-raster-works.htm>>. Acesso: 01 janeiro 2017.
- FELGUEIRAS, C. A. Modelagem Numérica de Terreno. In: CÂMARA, G.; MEDEIROS, J.S. (Organizadores) Geoprocessamento para Projetos Ambientais. 1998. Disponível em: < http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis_ambiente/>. Acesso: 01 janeiro 2017.
- FERREIRA, I. O.; RODRIGUES, D. D.; AYRES NETO, A.; MONTEIRO, C. S. Modelo de Incerteza para Sondadores de Feixe Simples. **Revista Brasileira de Cartografia**: Edição Especial Aplicações dos SIG, v. 68, n. 5. 2016 p.863-881.
- GUERLOT, D.; CHEDRU, J.; DANIEL, S.; MAILLARD, E. The Patch Test: a comprehensive calibration tool for multibeam echosounders. **IEEE Ocean Conference and Exhibition**, Vol. 3, 2000, p.1655-1661
- HUGHES CLARKE, J. E.; MAYER, L. A.; WELLS, D. E. Shallow-water imaging multibeam sonars: A new tool for investigating seafloor processes in the coastal zone and on the continental shelf. **Marine Geophysical Researches**, 18, 1996, p.607-629. <https://doi.org/10.1007/BF00313877>
- HUTCHINSON M.F.; XU T.; STEIN, J.A. A recent progress in the ANUDEM elevation gridding procedure. In: HENGL, T.; EVANS, I.; WILSON, J.; GOULD, M. (eds), **Geomorphometry**, Redlands, California, USA, 2011, p. 19-22.
- IHO. **IHO Standards for Hydrographic Surveys**. 5th Edition, Special Publication No. 44, 2008, 160p.
- LANDAU, E. C.; GUIMARÃES, D. P.; REIS, R. J. Mapeamento das áreas irrigadas por pivôs centrais no Estado De Goiás e no Distrito Federal - Brasil. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, n. 77, Embrapa Milho e Sorgo, 2013, 35p.
- MILANI, E. J.; MELO, J. H. G.; SOUZA, P. A.; FERNANDES, L. A.; FRANÇA, A. B. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobras**, 2(15), 2007, p. 265-287.
- RESCK, R. P.; BEZERRA NETO, J. F.; COELHO, R. M. P. Nova batimetria e avaliação de parâmetros morfométricos da Lagoa da Pampulha (Belo Horizonte, Brasil). **Geografias**, v. 3, n. 02, 2007, p. 24-37.
- OLIVEIRA, L. A.; CAMPOS, J. E. G. Comportamento estrutural do Sistema Aquífero Guarani no estado de Goiás, Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, 42 (Supl. 1), 2012, p. 128-141.
- SANTOS, M. L.; FERNANDEZ, O. V. Q.; STEVAUX, J. C. Aspectos morfogenéticos das barras de canal do rio Paraná, trecho de Porto Rico, PR. **Boletim de Geografia**, 1, 1992, p. 11-24.
- SOARES, A. P.; SOARES, P. C.; BETTÚ, D. F.; HOLZ, M. Compartimentação estrutural da bacia do Paraná: A questão dos lineamentos e sua influência na distribuição do Sistema Aquífero Guarani. **Geociências**, 26(4), 2007, p. 297-311.
- SOUZA, L. A. P. **Revisão crítica da aplicabilidade dos métodos geofísicos na investigação de áreas submersas rasas**. USP, São Paulo, 2006, 311p.
- ZHU, X. **GIS for Environmental Applications: A Practical Approach**. New York, Routledge Ed, 2016, 461p.