

Revista Brasileira de Cartografia (2015) N<sup>o</sup> 67/6: 1265-1277  
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto  
ISSN: 1808-0936

## **MODELAGEM BATIMÉTRICA NO RESERVATÓRIO DE SOBRADINHO: II – AVALIAÇÃO DO VOLUME ATUAL E DA TAXA DE SEDIMENTAÇÃO NO ESPAÇO DE TEMPO ENTRE 1978 E 2009**

*Bathymetric Modeling at Sobradinho Reservoir: II - Assessment of Current Volume  
and the Sedimentation Rate in the Period from 1978 to 2009*

**Hélio Leandro Lopes<sup>1</sup> (in memoriam), Alfredo Ribeiro Neto<sup>2</sup>  
& José Almir Cirilo<sup>3</sup>**

**<sup>1</sup>Universidade Federal do Vale do São Francisco - UNIVASF**  
Centro de Ciências Agrárias - Colegiado de Agronomia - Laboratório de Tecnologias da Geoinformação  
Endereço: Rodovia BR 407 - KM 12 - Lote 543 PSNC, s/n<sup>o</sup> - C1, 56300-990, Petrolina/PE, Brasil

**<sup>2</sup>Universidade Federal de Pernambuco - UFPE**  
Centro de Tecnologia e Geociências - Departamento de Engenharia Civil - Laboratório de Hidráulica  
Rua Acadêmico Hélio Ramos, s/n - Cidade Universitária, 50.740-530, Recife/PE, Brasil  
alfredoribeiro@ufpe.br

**<sup>3</sup>Universidade Federal de Pernambuco - UFPE**  
Centro Acadêmico do Agreste – Núcleo de Tecnologia  
Rodovia BR-104 km 59 - Nova Caruaru, 55002-970, Caruaru/PE, Brasil  
almir.cirilo@gmail.com

*Recebido em 26 de Janeiro, 2015/ Aceito em 23 de Julho, 2015*  
*Received on January 26, 2015/ Accepted on July 23, 2015*

### **RESUMO**

O reservatório de Sobradinho é fundamental para regularização de vazão visando a geração de energia do sistema de usinas hidrelétricas da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco. Assim, o conhecimento sobre a evolução do volume de armazenamento e taxas de sedimentação torna-se importante para um programa de gestão ambiental desse corpo hídrico. Nesse sentido, esse trabalho tem por objetivo realizar a modelagem desses dois parâmetros por meio de técnicas de geoprocessamento. Foram georreferenciadas e digitalizadas 76 cartas topográficas com equidistância de 2,5 m da década de 70. Após, foi gerado o banco de dados altimétrico do fundo do reservatório e em seguida foi determinada a imagem do relevo por meio do interpolador rede irregular triangular (Linear), mesmo método aplicado aos dados da batimetria. Utilizando as duas superfícies, batimétrica e topográfica, foi gerado a imagem da diferença do relevo do reservatório entre os anos de 1978 e 2009. O volume de armazenamento determinado com base nas cartas topográficas em 1978 foi de 34,11 km<sup>3</sup> e o calculado no SPRING foi de 34,62 km<sup>3</sup> considerando a cota de 392,5 metros. O valor atual baseado na batimetria considerando o interpolador RTIL foi de 31,29 km<sup>3</sup>. Logo, o volume de sedimento acumulado foi de 3,33 km<sup>3</sup>, correspondendo a uma taxa de sedimentação no período avaliado de 8,25%. Considerando a média de todos os interpoladores o valor médio geral da taxa de sedimentação foi de 7,47 %.

**Palavras chaves:** Espacialização da Sedimentação, Modelagem de Volume, Reservatório.

## ABSTRACT

The Sobradinho reservoir is essential for regulating flow for power generation of the hydroelectric system of Hydroelectric Company of San Francisco. Thus, knowledge about the evolution of the storage volume and sedimentation rates becomes important for an environmental management program of this water body. Thus, this study aims to carry out the modeling of these two parameters using geoprocessing techniques. 76 topographic maps from 70s and with contour interval of 2.5 m were scanned, georeferenced and digitized. Afterward was generated the altimetric database of the reservoir bottom and then the image of the relief was determined by means of triangular irregular network (Linear), that was the same interpolator applied to the bathymetric data. Using both bathymetric and topographical surfaces, it was modeled the image of the difference of the bottom relief from 1978 and 2009. The storage volume determined based on topographic maps of 1978 was 34.11 km<sup>3</sup> and calculated by using SPRING was 34.62 km<sup>3</sup> considering the elevation of 392.5 meters. The current volume value based on bathymetry considering the interpolator RTIL was 31.29 km<sup>3</sup>. Therefore, the volume of accumulated sediment was 3.33 km<sup>3</sup>, corresponding to a sedimentation rate in the study period of 8.25%. Whereas the mean of all interpolation, the general average sedimentation rate was 7.47%.

**Keywords:** Spatialization of Sedimentation, Volume Modeling, Reservoir.

## 1. INTRODUÇÃO

O método batimétrico pode ser usado para criar mapas do fundo de reservatórios e para computar relações da área em um determinado nível da água e volume armazenado de forma que tomadores de decisão em recursos hídricos possam regular o uso desse recurso com mais confiabilidade (ALCÂNTARA *et al.*, 2010). A batimetria é um dos parâmetros chave para caracterização e entendimento de muitos processos em sistemas aquáticos. Sua determinação é realizada por diversos métodos, sendo um deles o uso de ecosondas (BARBOSA *et al.*, 2006). Ecosondas operam em baixa frequência (usualmente entre 24 kHz e 200 kHz) e podem ser usadas para medir a profundidade da água através de medidas do tempo necessário para a onda de som propagar do transmissor, refletir no fundo do corpo d'água, e retornar até o receptor. Variações nessa técnica têm sido usadas para determinar área e volume de reservatórios, sedimentos nos reservatórios e erosão em bacias hidrográficas (CHANG *et al.*, 2003). Assim, levantamentos precisos de batimetria e do interior das camadas de fundo em lagos, rios e oceanos traz informações importantes relacionadas à questões ambientais (LANE *et al.*, 1994; VAN RIJN, 1997). A caracterização geométrica de reservatórios é importante para determinação de deposição de sedimentos temporalmente (MAIA & VILLELA, 2010), informação essa bastante importante para o cálculo da taxa de sedimentação em corpos hídricos. Essas informações podem ser

armazenadas em um sistema de informações geográficas (SIG), contendo o desenho amostral das linhas de levantamento, os perfis batimétricos e a classificação morfológica de cada transecto (COOKE *et al.*, 2007).

Levantamentos sucessivos da batimetria e de subcamadas antes e depois de eventos pluviométricos ajudam a quantificar a magnitude de erosão de sedimento de fundo, deposição e processos de redistribuição (OGSTON *et al.*, 2000; LEE *et al.*, 2004). Lin *et al.*, (2009) mapearam a geometria e as camadas de sedimentos em três lagos do Estado de Wisconsin, USA. A batimetria foi feita com técnica de ondas acústicas e a análise do sedimento foi obtida com técnica GPR (*ground penetrating radar*). Com isso, foi possível construir mapas 3D da batimetria e dos sedimentos de fundo. Dinehart e Burau (2005) utilizaram perfilador Doppler para mapear a dinâmica de sedimentos em rios, mostrando a importância de levantamentos repetidos na modelagem de descargas de sedimentos. Segundo Álvares *et al.* (2001), o monitoramento batimétrico permite determinar volumes de sedimentos depositados e sua evolução no tempo, possibilitando ainda o cálculo de volumes de armazenamento ou curva de capacidade dos reservatórios necessárias à modelagem e gestão dos mesmos e das bacias hidrográficas envolventes. Conforme Maia e Villela (2010), o sedimento pode se acumular no compartimento do volume útil do reservatório ou em cotas inferiores ao mesmo, em que desta maneira não altera o volume

útil, mas, por conseguinte, diminui o volume morto do reservatório e, conseqüentemente, a sua vida útil. Segundo Molino *et al.* (2001), um dos principais fatores que influenciam a vida operacional de um reservatório é a perda efetiva da capacidade de armazenamento de água devido à deposição de sedimentos. O volume de sedimento acumulado em um reservatório pode ser calculado a partir da comparação topográfica original do lago (planialtimetria, aerolevantamento, radar) com o levantamento topo-batimétrico atual do reservatório. De acordo com Maia e Villela (2010), esse procedimento é mais confiável do que os baseados na estimativa do sedimento afluente ao reservatório e da sua eficiência de retenção. No entanto, a comparação do levantamento planialtimétrico do fundo do reservatório em diferentes datas pode trazer incertezas relacionadas, na maioria dos casos, a plantas topográficas geradas antes da implantação do reservatório por um lado e a imprecisão dos equipamentos empregados no levantamento por outro.

Neste artigo, pretende-se determinar o volume atual e a perda de armazenamento no reservatório de Sobradinho a partir do cálculo determinado por meio da superfície batimétrica interpolada pelo método da rede triangular irregular (RTIL). Para isso, utilizou-se o levantamento aerofotogramétrico realizado na década de 1970 anterior ao enchimento do reservatório e o levantamento batimétrico realizado em 2009 com uso de ecossonda.

## 2. ÁREA DE ESTUDO

O reservatório de Sobradinho está situado na região chamada de sub-médio São Francisco no Nordeste do Brasil. A região apresenta um clima tipicamente semiárido, topografia irregular, precipitação total anual média variando entre 800 mm a valores abaixo de 400 mm na região de Petrolina-Juazeiro (CORREIA *et al.*, 2006). A temperatura do ar média é de 27°C e evaporação potencial anual em torno de 3.000 mm. A cobertura vegetal predominante na região do entorno é a caatinga juntamente com áreas de agricultura irrigada.

A área de drenagem da bacia do rio São Francisco até a entrada do reservatório é de 498.968 km<sup>2</sup>, com vazão média afluente de

2.800 m<sup>3</sup>/s. A grande extensão do reservatório, aproximadamente 308,5 km, concede-lhe características de escoamento semelhantes a trechos de rios, influenciando sua hidrodinâmica e, conseqüentemente, a relação entre nível da água e armazenamento (RIBEIRO NETO *et al.*, 2008). O uso do solo da bacia de drenagem do rio São Francisco até a entrada do reservatório é composto por áreas de cerrado, pastagem, agricultura e caatinga. O tipo de solo da mesma área tem predominância de latossolos, argissolos, cambissolos e neossolo litólico (SILVA, 2005).

O reservatório de Sobradinho é o maior responsável pela regularização de vazão para geração de energia do sistema de usinas hidrelétricas da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (Chesf). Possui área de 4.214,0 km<sup>2</sup> e extensão de 308,5 km no nível máximo operativo normal (392,50 m) (ONS, 2003). Segundo ONS (2003), a variação de 1 cm no nível da água no reservatório de Sobradinho, em seu nível máximo operativo normal, corresponde a aproximadamente 480 m<sup>3</sup>/s de variação do armazenamento e, conseqüentemente, numa variação de 1320 MWmed no armazenamento do Nordeste. Esse valor dá uma ideia da importância do reservatório e indica que seu volume disponível para armazenamento de água é uma variável fundamental para a geração de energia no sistema Chesf.

## 3. MATERIAL E MÉTODO

Apresentam-se, a seguir, os dados utilizados no estudo, assim como o procedimento para geração dos MDTs e estimativa do volume de sedimentos no reservatório.

### 3.1 Modelos Digitais do Terreno

A geração dos MDTs foi feita por meio dos dados do levantamento aerofotogramétrico para a situação pré-enchimento e levantamento batimétrico para o ano de 2009.

#### 3.1.1 Cartas Planialtiméticas

Foram disponibilizadas 115 cartas que compreendem uma área que se estende desde Barra até a barragem de Sobradinho. Desse total, foram selecionadas 76 cartas que representam a área do lago entre Fazenda das Pedras (início do reservatório) e a barragem (Figura 1).

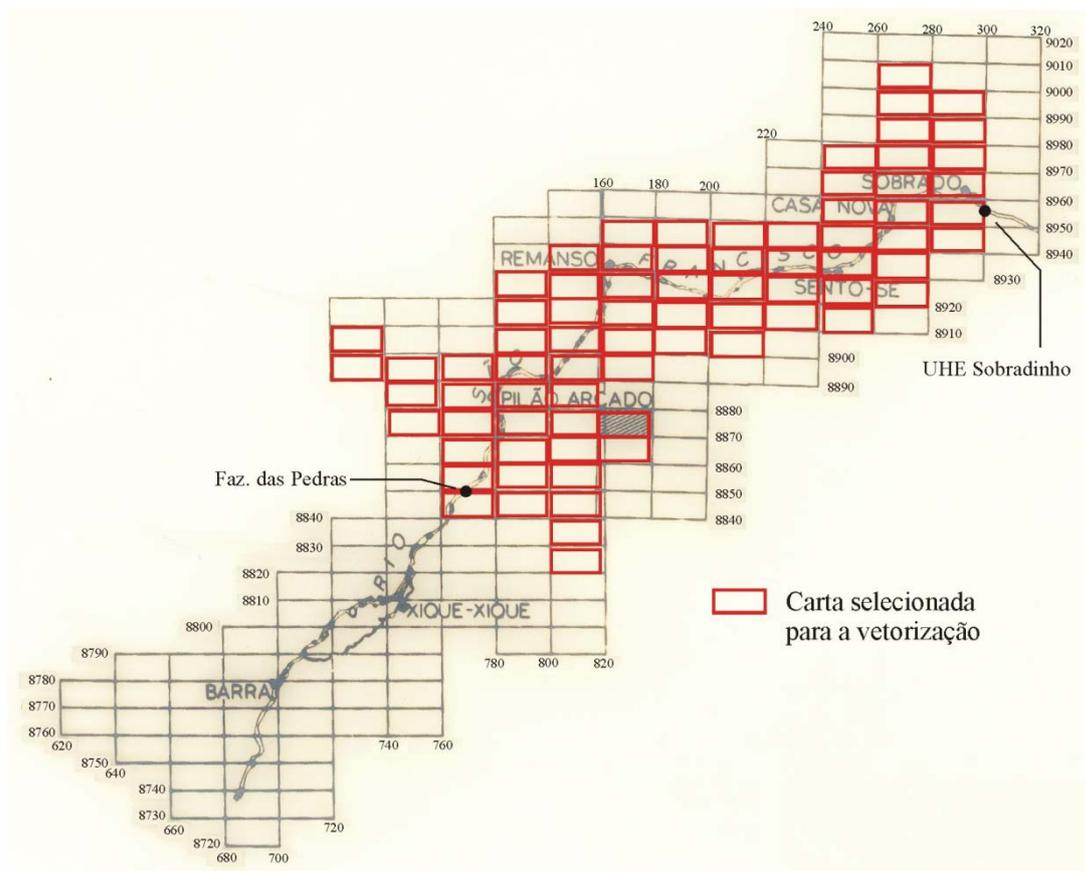


Fig. 1 - Articulação das cartas do levantamento aerofotogramétrico.

A seguir, apresentam-se as informações técnicas das cartas altimétricas produzidas a partir do levantamento aerofotogramétrico realizado na década de 1970.

- projeção UTM
- zonas 23 e 24
- datum planimétrico: Córrego Alegre
- datum altimétrico: SUVALE (RN 2.007, Altitude 368,041)
- equidistância das curvas de nível: 2,5 m
- escala 1:20.000

Após a digitalização, todas as cartas foram unidas em cada zona e, para a união das zonas, foi realizada a reprojeção de cada zona para o sistema WGS84 em coordenadas geográficas.

Diferentes resoluções espaciais foram testadas e verificou-se que o valor de 600 dpi era satisfatório, pois fornecia imagens com qualidade adequada para a vetorização. Resoluções maiores que 600 dpi não trouxeram ganhos que justificassem seu uso. A resolução radiométrica, o outro parâmetro relacionado à qualidade da imagem escaneada, é dada pelo número de valores digitais representando níveis de cinza.

É expressa em função do número de dígitos binários (bits) necessários para armazenar, em forma digital, o valor do nível máximo. O valor em bits é sempre uma potência de 2. No caso das cartas escaneadas, utilizou-se uma resolução radiométrica de 8 bits, que corresponde a  $2^8 = 256$  níveis de cinza.

Para uma melhor compreensão da importância desses dois parâmetros, pode-se destacar que a resolução espacial adequada permite a distinção de linhas menos espessas, enquanto que uma resolução radiométrica apropriada auxilia na identificação de linhas com aparência mais “apagada”.

A vetorização propriamente foi realizada com o programa de geoprocessamento ArcGIS versão 9.2. Quando possível, fez-se uso do modo de vetorização semi-automática, em que, a partir de um clique na curva de nível, o programa gera a curva até um ponto em que ocorra cruzamento com outras feições ou interrupção da curva. Quando não foi possível utilizar o modo semi-automático, a vetorização foi realizada manualmente, tendo o arquivo de 8 bit's como suporte de fundo.

Deve-se ressaltar que, além das curvas de nível, foram vetorizados, também, os pontos cotados existentes no levantamento. Esses pontos são bastante úteis na geração do modelo numérico do terreno.

### 3.1.2 Modelo digital do terreno e batimétrico

O modelo digital da batimetria foi gerado a partir da rede triangular irregular (linear), que apresentou melhor desempenho estatístico conforme apresentado em Lopes *et al.* (2013). O modelo digital do terreno, a partir das cartas topográficas, foi produzido pelo mesmo interpolador aplicado na geração da superfície batimétrica, que apresentou melhor RMSE e coeficiente de determinação (LOPES *et al.*, 2013). A Figura 2 mostra o traçado das linhas de navegação executadas na batimetria do reservatório, totalizando 2.040,06 km. Apesar de terem sido obtidos ao todo 82.520 pontos batimétricos, há regiões em que a concentração de pontos é esparsa como destacado na Figura 2. Os principais fatores que contribuíram para isso foram a ocorrência de vegetação na superfície (próximo à entrada do reservatório) e presença de marolas provocadas pelos fortes ventos (regiões central e próxima à barragem).

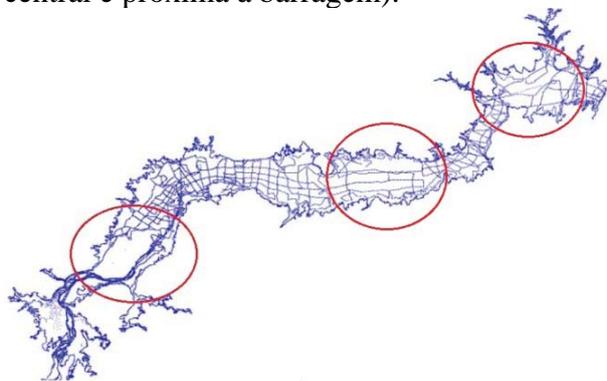


Fig. 2 - Traçado da batimetria realizada com destaque para região com pontos esparsos.

### 3.1.3 Perfis batimétricos e topográficos

Os perfis batimétricos e topográficos foram gerados no programa computacional SPRING e comparados para se ter uma noção da espessura da camada de sedimentos no fundo do lago. Quatro seções transversais foram geradas para comparação de perfis em quatro regiões no reservatório. Para cada região, foram plotados os perfis correspondentes à topografia original e à superfície batimétrica.

## 3.2 Determinação do volume e carga de sedimentos

O volume da barragem de Sobradinho é de 34.116,0 hm<sup>3</sup>, sendo o volume morto de 5.447,0 hm<sup>3</sup> conforme Tabela 1 (ONS, 2003).

A partir das duas superfícies, determinou-se o volume por meio do software SPRING de forma a se obter resposta da capacidade de volume em 1978 e atual relacionado ao ano do levantamento batimétrico realizado em 2009. O volume foi calculado considerando a cota 392,5 m.

Para determinação da espacialização da carga de sedimento depositado no reservatório, foi gerada a carta imagem da diferença batimétrica e topográfica do fundo do reservatório por meio de uma programação em LEGAL, de forma que os valores positivos correspondem à deposição de sedimentos e os valores negativos à erosão.

Tabela 1: Dados sobre o reservatório de sobradinho

Característica	Valor
Área de reservatório na cota 392,50 m	4.214,0 km <sup>2</sup>
Volume total do reservatório	34.116,0 hm <sup>3</sup>
Volume útil do reservatório	28.669,0 hm <sup>3</sup>
Vazão regularizada	2.060 m <sup>3</sup> /s
Nível máximo maximorum	393,50 m
Nível máximo operativo normal	392,50 m
Nível mínimo operativo normal	380,50 m

Fonte: ONS (2003).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, realizou-se uma comparação entre seções transversais para os dois MDTs gerados. Em seguida, procedeu-se com a espacialização da sedimentação e erosão, bem como o cálculo do total de sedimentos.

### 4.1 Comparação de Perfis batimétricos e topográficos

Quatro linhas foram traçadas no SPRING para geração dos perfis batimétricos, topográficos e da diferença dessas superfícies. A Figura 3 mostra a localização geográfica no reservatório dos traçados dessas linhas.

Procura-se aqui a comparação dos perfis localizados em quatro áreas do reservatório: fluvial, duas centrais e próximo à barragem

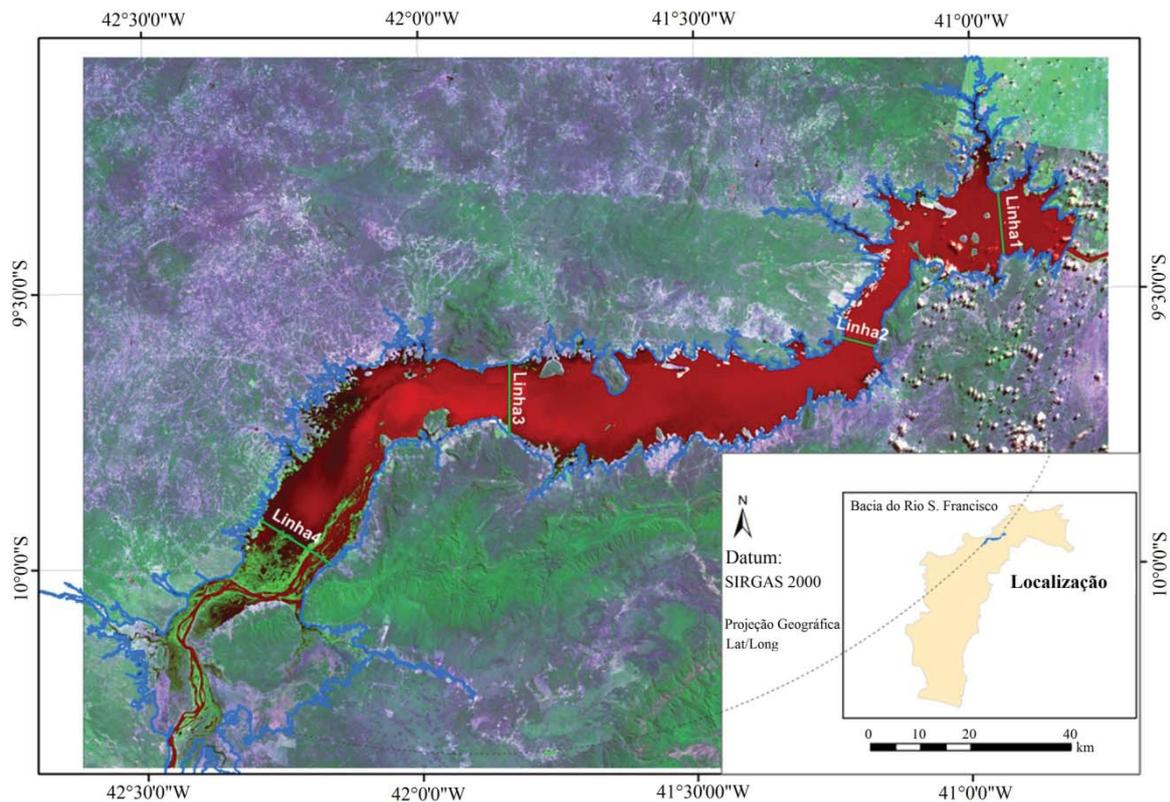


Fig. 3 - Localização no reservatório de Sobradinho das seções transversais (Linhas 1 a 4) referentes aos perfis batimétricos e topográficos.

representados na Figura 4. Os perfis batimétricos e topográficos foram elaborados por meio de dados de elevação num total de quatro seções transversais perpendiculares a linha de fluxo do reservatório, considerando a distância na curva de nível com cota 392,5 m de um lado a outro do reservatório representando o eixo X e a altitude (ortométrica) representada no eixo Y. Dessa forma, buscou-se representar, por meio do perfil, o fundo do reservatório em seções diferentes possibilitando uma análise das superfícies interpoladas por meio da rede triangular irregular linear. A partir dessa análise visual, pode-se verificar as diferenças ocorridas entre as épocas de 1978 e 2009.

A comparação dos perfis batimétricos e topográficos permite uma análise do comportamento do interpolador, bem como verificar a morfologia do fundo do reservatório. Cooke *et al.* (2007) geraram diversos perfis batimétricos da costa brasileira de forma a evidenciar mudanças abruptas, fortes inclinações com presenças de muitas irregularidades formadas por vales e canyons. Esse procedimento também foi realizado por Souza-Vieira e Hartmann (2008) em uma zona estuarina, os

quais construíram perfis transversais nas margens das ilhas de forma a verificar sua morfologia e identificação de processo de erosão.

Molino *et al.* (2001) geraram perfis batimétricos de diferentes datas para verificação de sedimentação e análise de performance de modelos. Wheeler *et al.* (2010) realizaram a análise de perfil batimétrico em duas seções transversais, uma em região fluvial e outra na área de delta, em três épocas diferentes, de forma a verificar a retirada e deposição de sedimentos. Os perfis foram gerados a partir dos dados batimétricos interpolados pelo método TIN.

Na Figura 4/Linha 1, observa-se que a região 1A no perfil corresponde a feição do relevo que pode estar associado a pequena montanha não representada na carta topográfica, enquanto que a indicação do ponto 1B corresponde a calha fluvial, que no mapa topográfico não é bem representada.

Observa-se na Figura 4/Linha 2 que na área 2A indicada pela seta, o perfil topográfico apresenta uma linha reta indicando a existência do rio. Mesmo sem a profundidade do rio na carta topográfica, verifica-se que o perfil batimétrico está acima do perfil topográfico indicando

ocorrência de deposição de sedimentos. Esse perfil localiza-se entre a região central e a barragem em que o fluxo de água é mínimo facilitando a deposição de sedimentos.

Esse mesmo comportamento ocorre no perfil da Linha 3, conforme indicado pela seta 3B em que o perfil batimétrico se localiza acima do perfil topográfico. A configuração geométrica indicada pela seta 3A representa uma curva de nível fechada, que ocorre nos dados planialtimétricos da carta topográfica. Logo, como no interpolador TIN o vértice do triângulo intercepta o ponto topográfico, a interpolação dentro da curva torna-se um plano. Barbosa *et al.* (2006) relatam que o interpolador TIN gera algumas formas triangulares na superfície do relevo, como no caso da seta 3A (Figura 4/ Linha 3) em que houve a ocorrência de triângulos horizontais.

Na Linha 4, observa-se que o perfil da batimetria localiza-se abaixo do perfil topográfico em uma grande extensão. Há duas possibilidades para a ocorrência desse comportamento. O primeiro é ter havido erosão nessa região e o segundo é que o interpolador não foi capaz de representar essa forma do relevo, principalmente, devido ao levantamento esparsos da batimetria. A Figura 3/Linha 4 é a região com menor densidade batimétrica principalmente pela ocorrência de vegetação na superfície (transectos na Figura 2). Como se pode observar no perfil batimétrico, há ocorrência de linhas retas (4A) características de interpolações com pouca densidade de pontos.

A Figura 5 mostra as diferenças dos quatro perfis, em que os valores positivos representam sedimentação e os negativos representam regiões com erosão. De acordo com a análise da Figura 4, as regiões na Figura

5 que se encontram abaixo da linha horizontal que corta o valor zero são, principalmente, devido a falta de cobertura do levantamento batimétrico em alguns locais do reservatório ou representa a calha do rio (não representada adequadamente nas cartas topográficas). A linha horizontal que representa a não mudança no fundo do reservatório possui valor 0 (zero) no eixo Y. Os valores acima dessa linha indicam deposição de sedimentos no período de 1978 a 2009.

A Tabela 2 a seguir mostra informações sobre a estatística descritiva dos quatro perfis

referentes à diferença entre a superfície batimétrica e a topográfica.

Tabela 2: Estatística referente à diferença de cotas em metros

	Perfis			
	1	2	3	4
Média	-0,0313	0,8788	0,7586	-0,9645
Máximo	7,0400	7,8100	12,1700	5,2400
Mínimo	-7,2900	-2,2800	-2,5700	-7,7700
Mediana	-0,0300	0,3000	0,0900	-1,1000
Desvio	2,7958	1,9887	2,6423	2,3013
Variância	7,8164	3,9548	6,9818	5,2962
Moda	0,3500	-1,6100	0,0700	2,5000

A estatística descritiva referente ao perfil 1 mostrada na Tabela 2 representa a falta de dados referente a profundidade do rio por um lado e por outro o problema de dados esparsos relacionado ao levantamento batimétrico conforme identificado na Figura 2. A falta de dados de profundidade do rio na carta topográfica é observada no valor -7,29 metros que pode indicar a profundidade da calha do rio. Já o valor 7,04 metros pode indicar sedimentação, porém pode haver um exagero devido ao levantamento pouco detalhado nesse perfil. A média de -0,03 metros poderia indicar um equilíbrio entre a erosão e a sedimentação, o que representa uma incongruência haja vista que na região da seção 1 espera-se que a deposição supere a erosão de forma mais acentuada que em outras áreas do reservatório. Quanto aos valores da estatística descritiva relacionada ao perfil 2, pode-se verificar uma altura média de deposição de sedimentos de 0,87 metros, sendo essa mesma análise para o perfil 3. O valor negativo da média do perfil 4 pode ser uma indicação de erosão, principalmente, por ser uma região de maior velocidade do fluxo d'água.

Verifica-se que os resultados menos satisfatórios encontram-se nas Linhas 1 e 4, justamente onde o levantamento batimétrico é mais esparsos. Nesses locais, as linhas batimétricas distanciam-se por volta de 2.200 metros. Para ser compatível com as cartas topográficas, a malha deveria ter equidistância máxima de 300 metros conforme orientação apresentada em Carvalho *et al.* (2000) a partir de recomendações da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHI)

da Marinha. Por outro lado, a recomendação da Agência Nacional de Águas (ANA, 2013) é estimar o espaçamento entre seções por meio de equações que utilizam a área e o comprimento do reservatório. Para a área e comprimento de Sobradinho, o valor do espaçamento seria de 200 metros.

Entende-se que as recomendações da DHI são voltadas, prioritariamente, para navegação aquaviária, a qual necessita de um levantamento batimétrico muito mais detalhado se comparado com levantamentos para a determinação do volume de reservatórios. Quanto a orientação presente em ANA (2013), a publicação chama a atenção para o fato de que o espaçamento dado em função da área e comprimento dos reservatórios “*deve ser flexível às necessidades de adequações que se fizerem necessárias, face às especificidades de cada reservatório*”. É importante salientar que o reservatório de Sobradinho é o maior do Brasil em área (quase o dobro do segundo maior, Tucuruí que possui 2.430,0 km<sup>2</sup>). Além disso, ressalta-se que não se adotou o planejamento por meio exclusivamente de seções transversais. Optou-se por uma configuração da navegação que é uma composição de formas, com predominância de linhas paralelas e transversais às margens e zigue-zagues (Figura 2). Em traçados com essa característica, para avaliação da quantidade de pontos levantados, dever-se-ia tomar a densidade de transectos por unidade de área. O levantamento em Sobradinho possui densidade de 0,4841 km de transectos por km<sup>2</sup>. Esse valor é compatível com levantamentos realizados pelo *United States Geological Survey* em reservatórios dos Estados Unidos para determinação de volume. A parte sul do lago Great Salt tem área de 2056 km<sup>2</sup> e densidade de transectos de 0,8220 km/km<sup>2</sup> (BASKIN, 2005) e o lago Walker possui área de 1131 km<sup>2</sup> e densidade de transectos de 0,3555 km/km<sup>2</sup> (USGS, 2007).

Outros aspectos que podem ser fonte de erros foram tratados por outros autores. Alcântara *et al.* (2010) afirmam que, no seu estudo, a principal fonte de erro foi devido a mapas topográficos históricos, em que os levantamentos topográficos realizados em 1979 não incluíam informações da profundidade do rio. Se houvesse essa informação, provavelmente, o erro seria

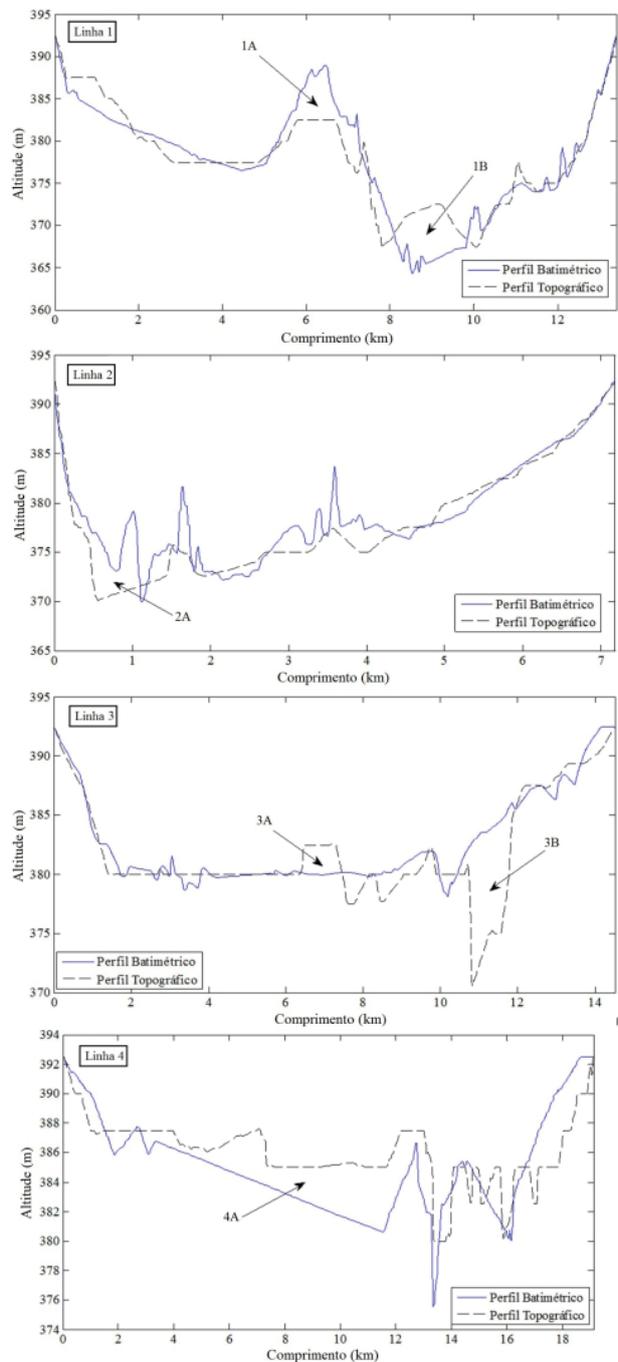


Fig. 4 - Perfis batimétricos e topográficos para quatro regiões no reservatório de Sobradinho.

menor. A inexistência de informações do levantamento batimétrico antes da implantação de uma barragem resulta na falta de dado importante para o estudo da evolução volumétrica e de sedimentação do empreendimento. Maia e Villela (2010) relatam que a comparação da topografia do fundo do reservatório em diferentes datas pode trazer incertezas que estão relacionadas, principalmente, a obtenção das cartas topográficas e o nível de qualidade que algumas podem apresentar.

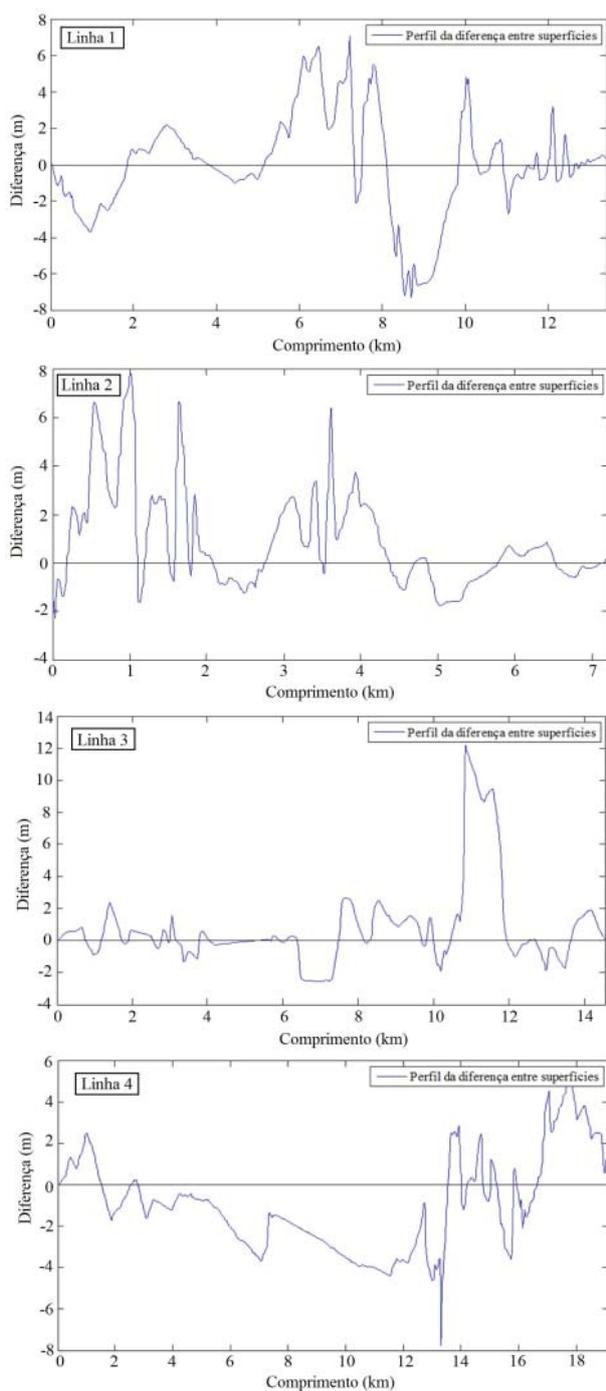


Fig. 5 - Perfis da diferença das superfícies batimétricas e topográficas do fundo do reservatório.

#### 4.2 Distribuição dos sedimentos

A partir das superfícies batimétricas do ano de 2009 e do modelo digital do terreno tendo como dados altimétricos as curvas de nível, gerou-se a imagem da diferença das duas superfícies, de forma a encontrar espacialmente informações sobre a deposição de sedimentos e localização de áreas erodidas. Apresenta-se na Figura 6 a imagem da diferença dos modelos de

elevação do fundo do reservatório gerada a partir da linguagem LEGAL no SPRING. Novamente, os valores positivos indicam sedimentação e negativos indicam erosão.

Os valores (“dummy”) elevados de erosão e sedimentação vistos no mapa podem estar associados a vazios no levantamento batimétrico e a relevos não representados nas cartas topográficas. O valor médio da superfície da diferença entre a batimetria e a topografia foi de 0,513 m, a moda teve valor de 2,50 m, e o desvio padrão foi de 2,46 m. Esses valores indicam que na maior parte do lago há ocorrência de sedimentação entre 0,51 m e 2,5 m. De acordo com a Figura 6, observa-se que há uma mancha escura no sentido longitudinal representando a calha do rio. Isso ocorre devido à calha do rio não ser representada nas cartas topográficas. Dessa forma, a imagem da diferença das superfícies representam valores negativos indicativos de “erosão” do fundo do reservatório. Por outro lado, verificam-se manchas claras entre a margem do reservatório (cota 392,5 m) e a calha do rio. Essas áreas são indicativas de deposição de sedimentos e ocorrem principalmente em áreas localizadas no centro do reservatório bem como em regiões próximas da barragem. Isso condiz com a dinâmica do fluxo das águas, ou seja, maior ocorrência de sedimentação na região central e próxima a barragem devido a menor velocidade da coluna d’água.

#### 4.3 Volumes e taxa de Sedimentação

A partir da superfície batimétrica e topográfica, determinaram-se o volume inicial e atual do reservatório. Essa determinação foi realizada por meio de uma função existente no software SPRING 5.1, que utiliza o polígono limite do reservatório, a cota do nível da água e a grade da superfície em análise. Barbosa *et al.* (2006) afirmam que o cálculo de volume baseado em curvas de nível e suas áreas é adequado para corpos hídricos isolados e em forma de lago. Nesse sentido, aplicou-se o método de determinação de volume existente no SPRING que, conforme Barbosa *et al.* (2006), parece mais adequado e de fácil execução.

O volume determinado com base nas cartas topográficas em 1978 e adotado oficialmente pela Chesf é de 34.116,0 hm<sup>3</sup> e o calculado no SPRING foi de 34.620,0 hm<sup>3</sup> considerando a

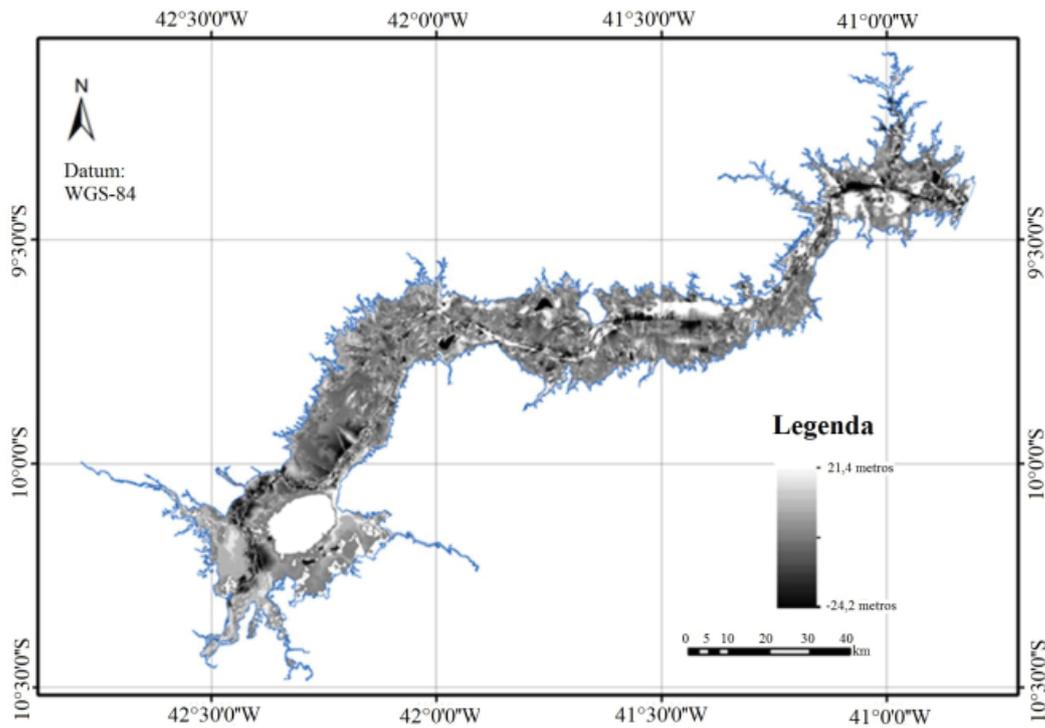


Fig. 6 - Imagem da diferença entre as superfícies batimétricas e topográficas interpoladas.

cota de 392,5 metros. O valor atual baseado na batimetria considerando o interpolador RTIL foi de 31.290,0 hm<sup>3</sup>, que foi o método que obteve os melhores resultados estatísticos na validação das superfícies interpoladas (LOPES *et al.*, 2013), correspondendo a uma taxa de sedimentação no período avaliado de 8,28%. Apesar do interpolador Mitasova (MS) ter sido o segundo com melhor desempenho na validação estatística, o mesmo apresentou

uma diminuição no volume muito pequena (Figura 7) que pode estar associado ao cálculo da interpolação. Em locais com vazio amostral, esse método tende a diminuir o valor dos pontos estimados. O método que apresentou a maior perda de volume foi a Krigagem ordinária isotrópica com um valor de 11,86%. Considerando a média de todos os interpoladores o valor médio geral da taxa de sedimentação foi de 7,47%.

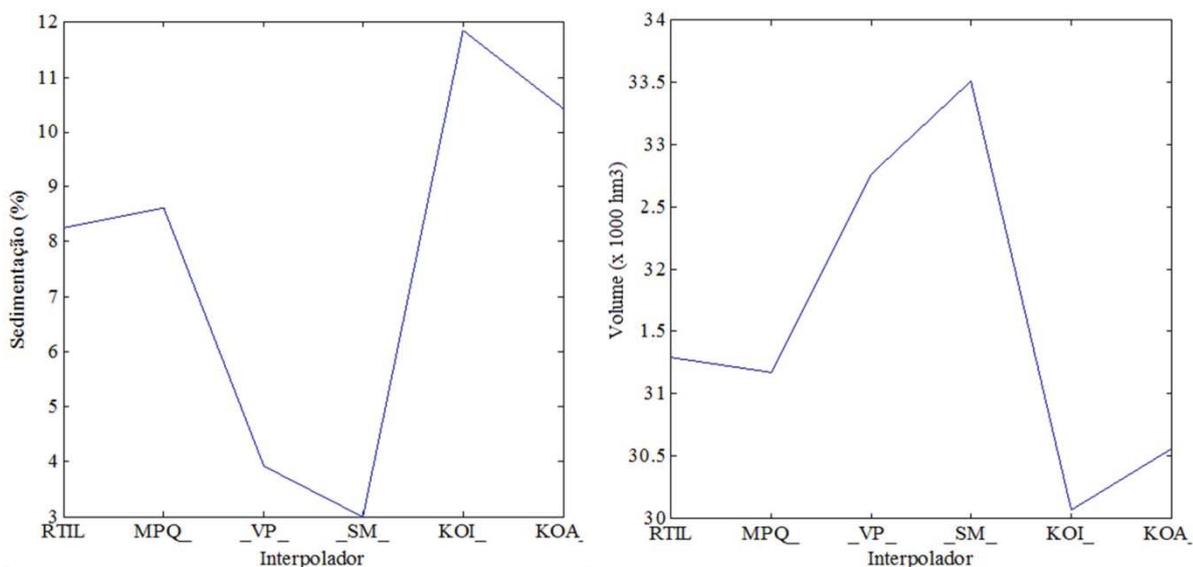


Fig. 7 - Gráficos de (A) sedimentação e de (B) volume para cada técnica de interpolação: RTIL (rede triangular irregular linear), MPQ (média ponderada por quadrante), VP (vizinho mais próximo), SM (spline mitasova), KOI (krigagem ordinária isotrópica), KOA (krigagem ordinária anisotrópica).

Por meio da ferramenta de determinação de volume no SPRING, foi possível determinar o volume sedimentado e erodido, e calcular indiretamente o volume atual estimado da calha do rio. O total de volume de sedimentos depositados foi de 5.914 hm<sup>3</sup>, enquanto que o total erodido foi de 3.203 hm<sup>3</sup>, perfazendo um balanço de 2.711 hm<sup>3</sup>. Ao se diminuir do volume total do reservatório, encontra-se 31.400 hm<sup>3</sup>. Diminuindo esse valor do volume total determinado pelo método RTIL resulta em 0,11 hm<sup>3</sup> que em metros cúbicos é igual a 104.040.000, sendo este o valor estimado da calha atual do reservatório, visto que na carta topográfica não há sua representação.

A sedimentação no reservatório não se restringe à área correspondente ao volume morto, ou seja, áreas com cota abaixo do nível mínimo operativo normal (380,0 m). Dessa forma, é possível realizar duas análises a respeito da vida útil do reservatório. Caso se considere o volume sedimentado em todo o reservatório (2.711 hm<sup>3</sup>), a taxa anual de sedimentação seria de 87,5 hm<sup>3</sup>/ano (para o período de 31 anos). Com essa taxa de sedimentação, a vida útil seria de 64,3 anos.

Por outro lado, se considerar-se apenas a sedimentação ocorrida na área correspondente ao volume morto, o volume de sedimentos seria de 616,05 hm<sup>3</sup>. A taxa de sedimentação seria de 19,9 hm<sup>3</sup>/ano, o que corresponde a uma vida útil de 274 anos. Lima *et al.* (2001) avaliaram o comportamento hidrossedimentológico da bacia do rio São Francisco por meio da análise do fluxo de sedimentos em suspensão nas estações fluviométricas. Com base nos resultados, os autores estimaram um tempo de vida útil do reservatório de Sobradinho de 545 anos. A estimativa de vida útil do presente trabalho reduziria à metade do tempo estimado por Lima *et al.* (2001).

## 5. CONCLUSÕES

A análise do levantamento batimétrico realizado em 2009 no reservatório de Sobradinho mostra as dificuldades relativas à representação da superfície do leito. O levantamento batimétrico com a quantidade de transectos recomendado por instituições oficiais (ANA, 2013, Carvalho *et al.*, 2000) mostraram-se onerosas para o reservatório de Sobradinho. Aspectos como a grande extensão do lago, a presença de vegetação na superfície da

água e fortes ventos dificultaram a navegação em algumas áreas. O resultado disso foi uma malha de pontos batimétricos esparsa em algumas regiões.

Para uma melhor programação do levantamento batimétrico de forma a melhor representar a morfologia do fundo do reservatório, deve ser levado em consideração os dados planialtimétricos da região inundada caso haja disponibilidade dos dados.

Além disso, conforme visto nos perfis da Figura 4, é aconselhável a realização de levantamento longitudinal seguindo a calha do rio submerso pelo reservatório, de forma a incluir sua batimetria.

Para a determinação de volume e taxas de sedimentação em um dado reservatório, torna-se necessário gerar a superfície batimétrica por diversos modelos de forma a validar estatisticamente cada interpolador, visto que, conforme o arranjo espacial do levantamento, um interpolador terá diferente desempenho estatístico. A implantação de interpoladores em programas de hidrografia é uma alternativa viável para dar suporte a essa análise conforme tratado em Souza *et al.* (2006).

A despeito das dificuldades do levantamento batimétrico realizado, pode-se afirmar que o MDT resultante representa suficientemente bem a superfície do leito do reservatório para comparação com a topografia anterior ao enchimento e, conseqüentemente, estimativa da sedimentação. Essa afirmação é possível graças aos resultados coerentes das zonas de sedimentação apresentadas na Figura 6. Considerando o método que apresentou melhores resultados estatísticos, o reservatório de Sobradinho apresentou uma taxa de sedimentação de 8,25 % e na média geral dos modelos foi de 7,47 % para os 32 anos de intervalo entre as duas medições.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho é afetuosamente dedicado ao excelente profissional e grande amigo Hélio Leandro Lopes que nos deixou precocemente em abril de 2013.

Os autores agradecem à Companhia Hidroelétrica do São Francisco pelo financiamento do projeto e à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE)

pela concessão de bolsa de Desenvolvimento Científico Regional para o segundo autor.

## 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**, v. 389, n. 3-4, p. 311–316, 2010.
- ÁLVARES, M.T.; FERNANDES, S.; MARIANO, A.C.; PIMENTA, M.T. Monitorização batimétrica para gestão de albufeiras: estudo piloto. In: VI Encontro de Utilizadores de Informação Geográfica, Tagus Park, Oeiras, 2001. **Anais**. 2001.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Orientações para atualização das curvas cota x área x volume**. Brasília, Ministério do Meio Ambiente, 2013, 36p.
- BARBOSA, C.C.F.; NOVO, E.M.L.M.; MELACK, J.M.; FREITAS, R.M.; PEREIRA FILHO, W. Metodologia de análise da dinâmica de área e volume inundável: o exemplo da várzea do lago grande de Curuai. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 58/3 p. 201-210, 2006.
- BASKIN, R.L. **Calculation of Area and Volume for the South Part of Great Salt Lake, Utah**. U.S. Department of the Interior/U.S. Geological Survey, 2005. 7p.
- CARVALHO, N.O., FILIZOLA JÚNIOR, N.P., SANTOS, P.M.C., LIMA, J.E.F.W. **Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios**. Brasília, ANEEL, 2000, 106p.
- CHANG, T.J.; BAYES T.D.; McKEEVER S. Investigating reservoir sediment and watershed erosion using a geographical information system. **Hydrological Processes**, v.17, n.5, p. 979-987, 2003.
- COOKE, C.V.; MADUREIRA, L.S.P.; GRIEP, G.H.; PINHO, M.P. Análise de dados de ecosondagem de fundo oriundos de cruzeiros realizados entre Fortaleza (CE) e Chuí (RS) com enfoque na morfologia e tipos de fundo. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 25, n. 4, p. 443-457, 2007.
- CORREIA, M.F.; DA SILVA DIAS, M.A.F.; DA SILVA ARAGÃO, M.R. (2006). Soil occupation and atmospheric variations over Sobradinho Lake area. Part one: an observational analysis. **Meteorology and Atmospheric Physics**, 94, 1-4, pp. 103-113.
- DINEHART, R.L.; BURAU, J.R.. Repeated surveys by acoustic Doppler current profiler for flow and sediment dynamics in a tidal river. **Journal of Hydrology**, v. 314, n. 1-4, p. 1–21, 2005.
- LANE, S.N.; CHANDLER, J.H.; RICHARDS, K.S. Developments in monitoring and modeling small-scale river bed topography. **Earth Surface Processes Landform**. v.19, p.349–368, 1994.
- LEE, C.; WU, C.H.; HOOPEES, J.A. Automated sediment erosion testing system using digital imaging. **Journal of Hydraul. Eng.**, v. 130, n. 8, pp. 771–781, 2004.
- LIMA, J.E.F.W.; SANTOS, P.M.C.; CHAVES, A.G.M.; SCILEWSKI, L.R. **Diagnóstico do fluxo de sedimentos em suspensão na bacia do rio São Francisco**. Brasília, ANEEL, EMBRAPA, ANA, 2001. 108 p.
- LIN, Y.-T.; SCHUETTPELZ, C.C.; WU, C. H., FRATTA, D. A combined acoustic and electromagnetic wave-based techniques for bathymetry and subbottom profiling in shallow waters. **Journal of Applied Geophysics**. V. 68, n. 2, p. 203–218, 2009.
- LOPES, H.L.; RIBEIRO NETO, A.; CIRILO, J.A. Modelagem batimétrica no reservatório de Sobradinho: I – geração e avaliação de superfícies batimétricas utilizando interpoladores espaciais. **Revista Brasileira de Cartografia**, nº 65/5, p. 887-902, 2013.
- MAIA, A.G.; VILLELA, S.M. Análise Qualitativa do Assoreamento do Reservatório de Promissão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 15, nº 1, p. 39-46 , 2010.
- MOLINO, B.; GRECO, M.; ROWAN, J.S. A 2-D Reservoir Routing Model: Sedimentation History of Abbeystead Reservoir, U.K. **Water Resources Management**, v. 15, n. 2, p. 109-122, 2001.
- OGSTON, A.S.; CACCHIONE, D.A.; STERNBERG, R.W.; KINEKE, G.C.

- Observations of storm and river flood-driven sediment transport on the northern California continental shelf. **Continental Shelf Research**, v. 20, n. 16, p. 2141–2162, 2000.
- ONS. Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Balço Hídrico do Reservatório de Sobradinho - Caracterização do Problema (Nota Técnica, NT-040-100-2003)**. Rio de Janeiro, 2003, 21p.
- RIBEIRO NETO, A.; DANTAS, C.E.O.; CIRILO, J.A. Hydrodynamic Modelling in Large Reservoirs for Water Resources Management. In: XIII World Water Congress, Montpellier, 2008. **Proceedings of the XIII World Water Congress**, 2008.
- SILVA, B.C. **Previsão hidroclimática de vazão para a bacia do rio São Francisco**. 2005. 220f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas/Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- SOUZA, E.C.B.; KRUEGER, C.P.; RIBEIRO, S.R.A.; SLUTER, C.R. Método para modelagem do relevo oceânico usando redes neurais artificiais. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 12, n. 2, p. 195-214, 2006.
- SOUZA-VIEIRA, S.R. de; HARTMANN, C. Modificação marginal das ilhas estuarinas usando ferramentas de aerofotografia, sedimentologia e batimetria. **Revista Brasileira de Cartografia**, Nº 60/4, pp. 307-318, 2008.
- USGS. U.S. Geological Survey. **Bathymetry of Walker Lake, West-Central Nevada**. Scientific Investigations Report 2007–5012, U.S. Department of the Interior/U.S. Geological Survey, 2007. 27p.
- Van RIJN, L.C. Sediment transport and budget of the central coastal zone of Holland. **Coastal Engineering**, v.32, p.61–90, 1997.
- WHEELER, P.J.; PETERSON, J.A.; GORDON-BROWN, L. Channel dredging trials at Lakes Entrance, Australia: A GIS-Based approach form monitoring and assessing bathymetric change. **Journal of Coastal Research**, v.26, n. 6, p. 1085-1095, 2010.