

# ESTIMATIVAS DE CURVAS COTA-ÁREA-VOLUME E ÁREA ALAGADA DE RESERVATÓRIOS A PARTIR DE DIFERENTES MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO

Cássio Lemos Dutra Marçal<sup>1</sup>, Rafael Lopes Mendonça<sup>2</sup>, Adriano Rolim da Paz<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental UFPB, João Pessoa/PB, CEP 58059-900  
1 cassio.sd@hotmail.com.; 2 rafaellomendonca@gmail.com; 3 adrianorpaz@yahoo.com.br

## RESUMO

Sabendo da importância do gerenciamento dos recursos hídricos o monitoramento do volume e da disponibilidade de água são aspectos que auxiliam para um bom desenvolvimento econômico e social. Uma variável importante é a Cota-Área-Volume (CAV), no entanto a determinação dela depende de trabalhos de campo trabalhosos e custosos e por conta disso é deixada de lado. Visando uma alternativa para esse problema, este trabalho apresenta um algoritmo para estimar a CAV e a ocupação da área alagada do lago formado pelo barramento. O algoritmo trabalha com Modelos Digitais de Elevação (MDE) como dados de entrada. A fim de analisar a influência de diferentes MDEs foram usados o SRTM, ASTER, EarthEnv e BEST. Também foi feita uma análise de concordância para a área ocupada pelo lago gerado por diferentes MDEs. Os resultados foram validados a partir de um levantamento topográfico realizado na área de estudo.

**Palavras-chave** — Modelo Digital de Elevação, Reservatórios, Cota-Área-Volume.

## ABSTRACT

*Knowing the importance of water resources management, monitoring the volume and availability of water are fundamental aspects for a good economic and social development. An important variable is the Depth-Area-Volume (DAV) of the reservoirs, however the determination of it depends on fieldwork that is costly and because of that the DAV is left aside. Aiming to give a new approach to this problem This work presents new algorithm to estimate the DAV and the lake surface water area generated. The algorithm works with Digital Elevation Models (DEM) as input data. In order to analyze also the influence of different MDEs the SRTM, ASTER, EarthEnv and BEST were used. A concordance analysis among the surface area occupied by the lake was made. The results were validated from the topographic survey carried out in the study area.*

**Key words** — Digital Elevation Model, Reservoirs, Depth-Area-Volume

## 1. INTRODUÇÃO

Os reservatórios de água são uns dos mais eficientes meios de integração e de desenvolvimento no gerenciamento dos recursos hídricos promovendo a regularização de vazões, abastecimento público, geração de energia e controle de enchentes [1]. Para construção desses reservatórios é importante a determinação da curva cota-área-volume (CAV), que permite saber a área superficial do lago e seu volume a uma determinada cota auxiliando no planejamento e operação do reservatório [2]. No entanto, esse levantamento topográfico muitas vezes é trabalhoso, custoso e leva um tempo considerável. Além disso, sua complexidade aumenta proporcionalmente com a variabilidade da declividade e cobertura vegetal [1].

Com o desenvolvimento do sensoriamento remoto, formas baratas para determinar e atualizar batimetria e curvas cota-área-volume foram desenvolvidas [3]. A partir de produtos derivados de diferentes Modelos digitais de elevação (MDE), este artigo apresenta e valida estimativas de curvas CAV e geração da área alagada de um reservatório no agreste pernambucano.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Área de estudo

A área de estudo escolhida foi o reservatório de Igarapeba localizado no agreste pernambucano (Figura 1). Trata-se de reservatório para controle de enchentes e faz parte de um conjunto de reservatórios que foram inventariados após grandes enchentes atingirem a região de Pernambuco e Alagoas no ano de 2010 [4]. O levantamento topográfico ocorreu no ano de 2011 a partir da solicitação da secretaria de recursos hídricos do estado de Pernambuco. O reservatório ainda está em fase de construção e por isso não influenciou na coleta de dados pelos sensores que geraram os MDEs utilizados nessa pesquisa.

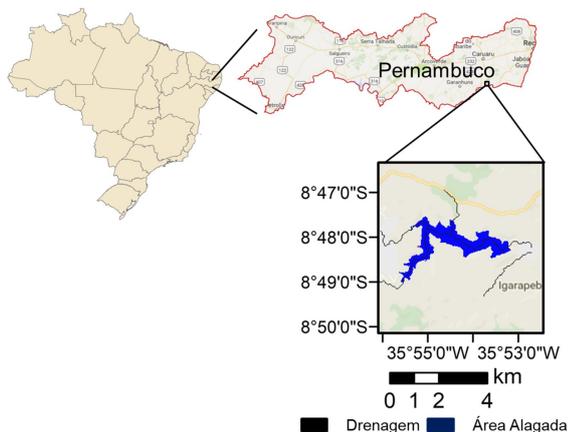


Figura 1. Localização do reservatório de Igarapeba (a imagem do lago foi gerada a partir deste estudo).

## 2.2 Metodologia de estimativa da CAV

### 2.2.1 Área Alagada

A metodologia utilizada é baseada nas direções de fluxos e rede de drenagem derivadas do MDE. Foi desenvolvido um algoritmo implementado em rotina computacional em linguagem de programação FORTRAN pelo grupo de pesquisa. Após o tratamento das depressões e processamento das direções de fluxo e rede de drenagem, um pixel que simula um barramento é adicionado exatamente sobre a drenagem, sendo registrada nele a altitude igual à altura da barragem que se pretende simular. Ao posicionar o barramento o algoritmo de inundação considera como parte do reservatório os pixels que atendam simultaneamente às seguintes condições: (i) drenam para a barragem; (ii) cota igual ou superior ao topo da barragem (cota do terreno + cota da barragem); (iii) caminho de fluxo a jusante do pixel até alcançar o ponto da barragem possui cota igual ou inferior à cota do topo da barragem.

Esse procedimento é repetido para  $n$  valores intermediários de cota inferior ao topo da barragem, para estimar analogamente a área alagada correspondente e elaborar uma curva cota-área.

### 2.2.2 Curva Cota-Área-Volume

Com a determinação da área alagada, resolução do pixel ( $\Delta x$ ) e diferença entre a altitude do terreno e a cota da superfície do lago ( $z$ ) em cada pixel, como o produto entre a área superficial do pixel ( $\Delta x^2$ ) e a cota  $z$ . O volume do reservatório é dado pela soma dos volumes inundados acima de cada pixel integrante do lago. Com a variação da cota da superfície da barragem é possível variar o volume do reservatório gerando assim a curva Cota-Volume. Juntando as informações geradas acerca de área alagada e volume, tem-se a curva CAV. A Figura 2 apresenta a esquematização das etapas do algoritmo.

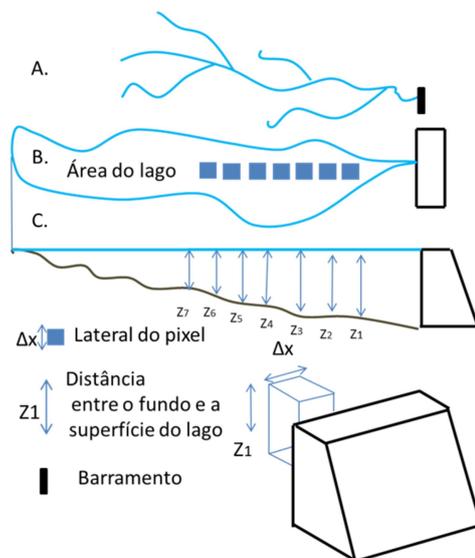


Figura 2. Etapas para a geração da curva CAV: A) Escolha do local do barramento sobre a rede drenagem; B) Geração do lago do reservatório; C) Cálculo do volume do reservatório a partir da distância e da área do pixel.

## 2.3 Modelos Digitais de Elevação (MDE)

Foram utilizados quatro MDEs de fontes e resoluções diferentes (Tabela 1): Shuttle Radar Topography Mission [5] (SRTM), Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer versão 2 [6] (ASTER), EarthEnv [7] e Bare Earth (BEST) [8].

O modelo SRTM é resultado de um projeto de cooperação internacional para geração do primeiro radar para aquisição de valores de altitude a nível global, tendo sido utilizado neste trabalho o MDE-SRTM com resolução de 30 m. O MDE ASTER, versão dois, tem resolução de 30 m e provém de uma cooperação entre o Japão e Estados Unidos e foi distribuído aos usuários a partir de outubro de 2011, trazendo significativas melhorias e correções em relação a sua primeira versão. O MDE EarthEnv tem resolução de 90 m e é resultado da fusão entre dados ASTER e SRTM, para correção e distribuição de dados de elevação para até 91% da superfície do globo. Já o BEST apresenta os valores de altitudes do SRTM 90m com o efeito da vegetação removido.

O objetivo foi analisar qual o efeito da resolução e de diferentes produtos sobre os resultados das estimativas CAV geradas.

Tabela 1. Modelos digitais de elevação utilizados na pesquisa.

MDE	Resolução	Fonte	Datum horizontal	Datum vertical
SRTM	30m	[5]	WGS84	EGM96
ASTER	30m	[6]	WGS84	EGM96
EarthEnv	90m	[7]	WGS84	EGM96
BEST	90m	[8]	WGS84	EGM96

## 2.4 Avaliação de resultados

As estimativas das CAV foram avaliadas comparativamente aos dados topográficos de campo por duas abordagens. Embora os dados topográficos de campo também apresentem erros e incertezas, tais dados foram tomados como a verdade para efeito de análise neste trabalho. Na primeira abordagem, foram comparadas diretamente as CAV resultantes do processamento dos diferentes MDEs em relação à CAV de dados topográficos e calculados erros relativos de volume e área alagada.

Na segunda abordagem, as áreas dos lagos das barragens estimadas a partir de cada MDE foram cruzadas entre si para avaliar o grau de concordância em termos de interseção das áreas entre elas (Aint). Esse resultado foi expresso como percentual da área média (eq.1) dos lagos em análise. Como não há imagem de referência a área comum foi dividida pelo pela média das áreas dos dois lagos

$$A. Comum(\%) = \left( \frac{A_{int}}{\frac{(AMDE_1 + AMDE_2)}{2}} \right) * 100 \quad \text{Equação 1}$$

## 3. RESULTADOS

As curvas CAVs geradas para o reservatório de Igarapeba são mostradas na Figura 3. De modo geral, percebe-se relativa concordância nos padrões das curvas obtidas a partir de cada MDE e a CAV dos dados de campo.

Visualmente o MDE que mais se aproximou dos dados de campo, na figura representada por “Topog.”, foi o BEST e o ASTER. Os outros modelos também tiveram bom desempenho ao representar tanto o volume quanto a área do reservatório cota a cota. Mas observa-se, claramente, que as curvas resultantes do SRTM30 e do EarthEnv estão mais deslocadas em relação à curva obtida dos dados de campo, indicando subestimativa de área e volume inundado a cada cota.

Também foi calculado o erro relativo em porcentagem cota a cota para os valores de volume mostrados na Figura 4. Percebe-se um grande erro no início de todas as curvas geradas, mas que vão se compensando com o incremento de cota, isto é, devem haver áreas erroneamente incluídas na delimitação do lago (erro que leva à superestimava da área) e áreas erroneamente omitidas do lago (erro que leva à subestimativa da área) que se compensam e diminuem o erro final. Esse efeito tende a aumentar com o aumento da cota e a maior abrangência do lago formado.

O melhor resultado continuou sendo os gerados a partir do MDE BEST onde o erro ficou menor que 1% negativo para as últimas cotas.

O MDE EarthEnv apresentou os piores valores ficando próximo a 25% de subestimação no topo da barragem, SRTM teve aproximadamente 18% de subestimação também no topo da barragem e o ASTER superestimou em aproximadamente 2,3% para as últimas cotas.

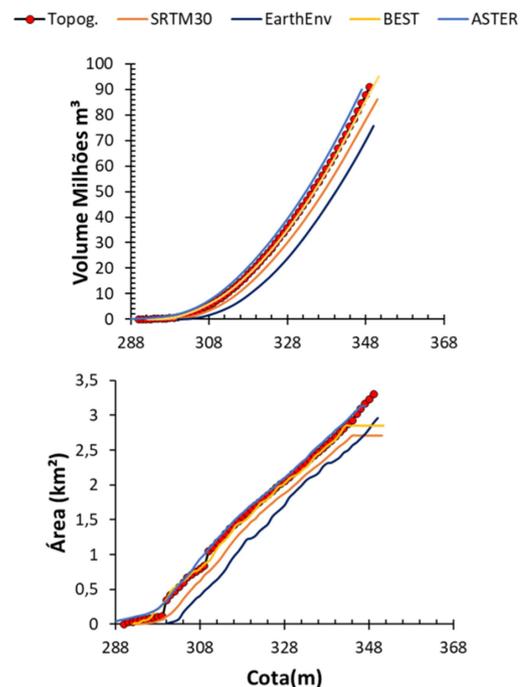


Figura 3. Curvas Cota-Volume e Cota-Área para a área de estudo. Todos os modelos apresentaram boa concordância e representatividade quando comparados com dados observados

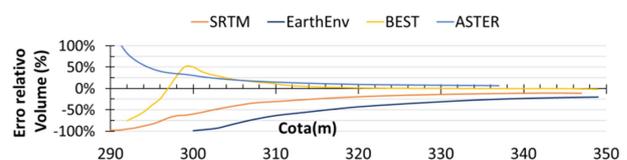


Figura 4. Erro relativo do volume em relação ao levantamento topográfico cota a cota para os quatro MDEs.

Com relação à área a figura 5 mostra padrão semelhante ao padrão do erro da figura 4, muito alto no início e tendência de compensar os erros para cotas mais altas. Nota-se, inclusive, que o MDE BEST, para os primeiros valores de cota, chegou a superestimar em mais de 100% o valor da área alagada.

No quesito área o que melhor representou o valor para cotas mais altas foi o MDE ASTER que para as últimas 10 cotas teve uma média de superestimação de 2,3% da área quando comparado com o levantamento de campo. Tanto o EarthEnv e SRTM subestimaram a área superficial em 10,8% e 12,98%, enquanto que o BEST teve um valor subestimado em relação ao dado de campo que ficou em torno de 5,1%.

Na Figura 6 temos as bacias hidráulicas geradas Por este trabalho. Percebe-se que todas respeitaram bem um padrão de formação e mostram grande variabilidade e contorno com o terreno. As imagens SRTM e ASTER apresentam mais os contornos devido ao pixel de melhor resolução (30m) em oposição aos pixels de 90m (BEST e EarthEnv).

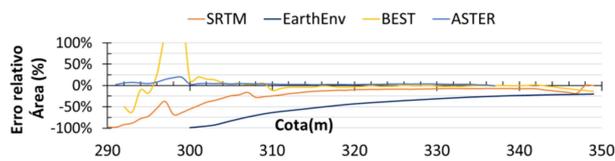


Figura 5. Erro relativo da área em relação ao levantamento topográfico cota a cota para os quatro MDEs.

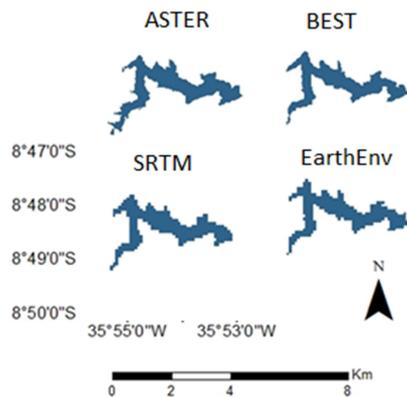


Figura 6. Áreas alagadas geradas a partir do algoritmo.

O grau de concordância entre as áreas alagadas (Tabela 2) foi bem satisfatório. Com a maioria dos valores acima de 80%. Para a comparação entre os pixels de tamanho diferente os de 90m foram expandidos para 30m. Isso não interfere na qualidade do resultado porque não há alteração na delimitação do lago, apenas um pixel de 90m transformou-se em nove de 30m, e eles ocupam a mesma área e o mesmo local.

Tabela 2. Análise de concordância (% de área comum aos dois MDEs, tomando) entre as áreas do lago do reservatório estimadas a partir de diferentes MDEs, para a cota máxima.

MDE	SRTM	ASTER	BEST	EarthEnv
SRTM	-	81%	84%	91%
ASTER	-	-	79%	86%
BEST	-	-	-	84%
EarthEnv	-	-	-	-

#### 4. DISCUSSÃO

Os resultados apresentam grande potencial para representatividade das curvas CAV em áreas que se pretende construir barramentos com erros que variam de 25% a menos 1% dependendo do tipo de DEM utilizado nesta pesquisa. As áreas geradas também apresentaram bons resultados, porém o melhor resultado, que foi a superestimava de 2,3% da área para as últimas cotas, foi de um MDE diferente daquele que representou o melhor volume. Logo se percebe que não há um padrão claro para o modelo que gerou bons valores para volume será o mesmo para a área. Em relação à área alagada se pode notar uma concordância de pelo menos que 80% em todos os

resultados. Isso mostra baixa variabilidade espacial para a imagem da bacia hidráulica gerada na área.

#### 5. CONCLUSÕES

O estudo ilustrou a viabilidade de usar dados globais de sensoriamento remoto de elevação do terreno, disponibilizados gratuitamente, como fonte de informação para elaborar CAV de reservatórios.

De modo geral todos os MDEs apresentaram resultados satisfatórios, mas houve melhor desempenho para o MDE ASTER e MDE BEST, que é o SRTM90m com remoção de altura de vegetação.

Como continuidade da pesquisa, um maior número de reservatórios deve ser analisado para melhor avaliar comparativamente diferentes MDEs, além de incluir outras fontes de dados de elevação como LIDAR. O algoritmo proposto também deve ser comparado quanto ao procedimento mais trivial de usar ferramentas de geoprocessamento comuns disponíveis sem softwares comerciais ou gratuitos.

#### 6. REFERÊNCIAS

- [1]Peng, D; Gou, S; Liu, P; Liu, T. "Reservoir Storage Curve Estimation Based on Remote Sensing Data". Journal of hydrology eng. 2006.
- [2] Rodrigues, L. N; Liebe, J. "Small reservoirs depth-area-volume relationships in Savannah Regions of Brazil and Ghana". Water Resources and Irrigation Management. 2013.
- [3]Nascimento, V. F.; Ribeiro Neto, A. "Characterization of reservoirs for ater supply in Northeast Brazil using high resolution remote sensing". Brazillian journal of water resources. v. 22, e50, 2017.
- [4] Moreira, M. S.; Silva, M. A. "A enchente de 2010 em união dos palmares - al: os impactos socioambientais das áreas ribeirinhas". Revista do Centro do Ciências Naturais e Exatas. 2013.
- [5] Shuttle Radar Topography Mission, 2018. Disponível em: <<https://lta.cr.usgs.gov/SRTM1Arc>> Acessado em 28/09/2018.
- [6]Routine ASTER Global Digital Elevation Model , 2018. Disponível em: <<https://goo.gl/agqkoT> >. Acessado em 28/09/2018.
- [7]Robinson, N., Regetz, J., and Guralnick, R. P. "EarthEnv-DEM90: A nearly-global, void-free, multi-scale smoothed, 90m digital elevation model from fused ASTER and SRTM data". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 87:2014, 57-67. 2014.
- [8] O'Loughlin F.E., Paiva, R.C.D., Durand M., Alsdorf D.E., Bates, P. D. "A multi-sensor approach towards a global vegetation corrected SRTM DEM product". Remote Sensing of Environment V. 182, pp. 49-59. 2016.