



Avaliação de metodologia para estimativa de características técnicas em barramentos

Walter Corrêa Carvalho Junior ¹

Luciana Rezende Almeida ²

Rodrigo Cognasc Visentin Santos Gonçalves²

¹ Centro Universitário de Várzea Grande - UNIVAG
Av. Dom Orlando Chaves, 2655, Bloco D – Cristo Rei
78118-900 – Várzea Grande - MT, Brasil
walter.carvalho@univag.edu.br

² SAVANA Assessoria e Projetos Florestais
Av. Carmindo de Campos, 146, Centro
Carmindo da Construção, Sala 02 –Jardim Petrópolis
78070-100 - Cuiabá - MT, Brasil
{luciana, rodrigo}@savanaprojetos.com.br

Resumo. Tornou-se voga a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) devido aos recentes acontecimentos de rompimentos em certas regiões do país. Na PNSB é estabelecido que os órgãos fiscalizadores devem classificar os barramentos segundo o grau de risco em função, dentro outros, de características técnicas como altura da barragem e do volume de água acumulado. Buscou-se então, como forma de auxílio na tomada de decisão e simplificação das análises técnicas, validar uma técnica de estimação destes parâmetros. A técnica consiste em aferir a altura do barramento através de sensoriamento remoto pela metodologia Campos (2015) e para o cálculo do volume acumulado foi desenvolvida uma metodologia denominada de “*um quarto, meio e três quartos*” que consiste em estimar a área alagada ao reservatório pela ferramenta “medição de polígonos” do Software Google Earth Pro e linearizar as porções alagadas pela proporção $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ e $\frac{3}{4}$ da altura de água na barragem, sendo enfim calculado os volumes acumulados pelo método das seções transversais. Realizou-se este experimento em três barragens situadas na Bacia Hidrográfica Amazônica e comparado com dados medidos em campo. O erro relativo médio entre as metodologias avaliadas para estimativa do volume de água acumulado foi de 58,37%, variando entre 21,96% e 79,71% e o erro relativo médio para estimativa da altura do barramento foi de 43,98%, variando entre 21,87% e 63,64%. Os resultados demonstram potencial na utilização destas ferramentas sociais para aferir características técnicas em barramentos na bacia hidrográfica do Alto Paraguai com a condicionante do aprimoramento da resolução espacial das imagens disponíveis gratuitamente e prosperar a precisão da altimetria resultante do Modelo Digital de Elevação de maneira a detectar modificações antrópicas no ambiente.

Palavras-chave: estimação de parâmetros, sensoriamento remoto, segurança de barragens.

Abstract. It has become fashionable the National Policy on Dam Safety (NPDS) due to recent disruptions of events in certain regions of the country. In NPDS is established that enforcement agencies should classify the dams according to the degree of risk because, in others, technical characteristics as dam height and the accumulated water capacity. It sought then, as a way to democratize and simplify technical analysis, validate an estimation technique of these parameters. The technique is to measure the height of the dam by Campos (2015) and to calculate the volume accumulated a so-called methodology was developed to “a quarter, half and three quarters” which is to estimate the flooded area to the reservoir by the tool “measurement of polygons” Google Earth Pro Software and linearize the portions flooded by the proportion $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ and $\frac{3}{4}$ of the water level in the dam, and finally calculated the volumes accumulated by the method of cross sections. We conducted this experiment in three dams located in the Amazon Basin and compared with measured data in field. The average relative error between the evaluated methods for estimation of the accumulated water volume was 58.37%, ranging between 21.96% and 79.71%, and the average relative error for estimating of the dam height was 43.98% ranging from 21.87% to 63.64%. The results demonstrate the potential in using these social tools to assess technical features in dams in the basin of the Upper Paraguay with the condition of spatial resolution enhancement of free images available and prosper the accuracy of the resulting altimetry of Digital Elevation Model in order to detect changes anthropogenic environmental.

Key-words: parameter estimation, remote sensing, dam safety.

1. Introdução

Devido aos recentes acidentes com rompimento de barragens, tornou-se voga a Política Nacional de Segurança de Barragens (Lei nº 12.334/2010) que visa principalmente garantir padrões de segurança de barragens de maneira a reduzir a possibilidade de acidentes e suas consequências. Dentre outros, a aplicabilidade da lei se refere a barramentos destinados à acumulação de água para quaisquer usos, que apresentem pelo menos uma das seguintes características:

“I – altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a 15 m (quinze metros).

II – capacidade do reservatório maior ou igual a 3.000.000 m³ (três milhões de metros cúbicos); [...]” (BRASIL, 2010, parágrafo único, art. 1º)

Os itens supracitados são essenciais para definição do risco associado aos barramentos devido as suas características técnicas.

Campos (2015) testou um método de estimativa da altura de barramentos em usinas hidrelétricas na Bacia Hidrográfica do Alto Paraguai. Este método baseia-se na inferência dos dados do Modelo Digital de Elevação (MDE) disponibilizados pela Agência Norte Americana de Aeronáutica e Administração Espacial (NASA, sigla em inglês).

Concordando com Farkuh Neto e Lima (2005) *apud* Campos (2015), é interessante a utilização de Sistemas de Informações Geográficas como ferramentas tecnológicas que auxiliam e potencializam procedimentos de planejamento, gerenciamento e tomada de decisões em diversas áreas do conhecimento, além de socializar, simplificar e diminuir custos de projeto.

Neste sentido este trabalho se propôs a adaptar a metodologia descrita em Campos (2015) e confrontá-la com dados mensurados em campo através da técnica já consagrada de utilização de ecobatímetro.

Tem-se a intenção de validar a técnica simplificada de obtenção dados de características técnicas em barramentos, notadamente altura da barragem e volume acumulado, ao se comparar as metodologias. Esses dados são fundamentais para os Órgãos Fiscalizadores responsáveis pelas ações estabelecidas na Política Nacional de Segurança de Barragens (Lei nº 12.334/2010).

2. Objetivo

Verificar o potencial de metodologia para se averiguar e/ou estimar altura da barragem, área alagada e volume de água armazenado em reservatórios utilizando imagens do Google Earth.

3. Materiais e Métodos

A metodologia de estimativa das características técnicas em barramentos foi realizada na Bacia Amazônica, Estado de Mato Grosso, conforme a identificação apresentada na **Tabela 1**.

Tabela 1. Identificação dos barramentos estudados.

Numeração	Coordenadas Geográficas	Município	Finalidade de Uso
1	56°13'51,26"W e 13°22'27,47"S	Nova Mutum	Irrigação
2	56°22'20,07"W e 13°24'42,42"S	Nova Mutum	Irrigação
3	56°12'29,93"W e 09°53'03,85"S	Alta Floresta	Aquicultura

Para o levantamento topobatimétrico dos reservatórios utilizou-se a metodologia baseada na configuração de um sistema integrado, envolvendo um Real Time Kinematic – RTK do modelo Promark 500, que vincula-se ao Sistema de Geoposicionamento Global – SGG (leia-se: em inglês GPS), de precisão milimétrica. Este foi utilizado para delimitar a área alagada pelo barramento e do nível da água (N.A).

Outro equipamento utilizado na coleta de campo foi o GPSMAP 526S, doravante denominado Ecobatímetro. Trata-se de um chartplotter compacto que possui um visor colorido QVGA ultra-brilhante de 4", permitindo a visualização de imagens de alta resolução, visualizações em 3-D com tecnologia de orientação automática.

Além destes, outros equipamentos auxiliaram na coleta de campo, tais como: bote, salva vidas, remos, pranchetas, máquinas fotográficas, GPS's, notebook e cadernetas de campo.

O processamento dos dados foi realizado através dos softwares suporte do equipamento RTK Promark 500, onde se obteve como dados às coordenadas dos pontos de medição de profundidade e o traçado do perímetro do lago. De posse destas coordenadas, adicionou-se a coluna de profundidades medidas com o ecobatímetro, com o auxílio do ambiente MS Excel 2010. As cotas de fundo foram calculadas pela Equação 1:

$$\text{Cota de Fundo} = \text{Cota N.A} - (\text{Profundidade} + \text{Distância do Sensor ao N.A}) \quad (1)$$

A partir dos pontos cotados e do perímetro da lagoa determinado, foi realizado o processamento dos dados no software Datageosis, através da interpolação sobre uma malha retangular de dados.

Após a determinação das curvas de nível de fundo, o software Datageosis calcula o volume útil da lagoa com base no N.A obtido no levantamento realizado *in loco*. A altura do barramento é estimada através da somatória entre a maior profundidade da lagoa e a diferença da cota da crista do barramento com o N.A. A **Figura 1** apresenta fotografias do trabalho de campo.

Em contrapartida, foi aplicada a metodologia de estimativa da altura do barramento descrito em Campos (2015). Este método se utiliza do MDE da NASA disponível concomitantemente com imagens georreferenciadas do Software Google Earth. O método consiste basicamente em supor que a cota do vértice correspondente ao fim do alagamento é a mesma do vértice correspondente ao nível máximo de água da barragem. Então a cota apresentada no barramento se refere à altimetria do terreno e, portanto, a diferença entre a cota do vértice do fim do alagamento com este último é condizente a altura de água na barragem. Por fim, a altura do barramento é resultante do acréscimo de um metro a altura de água da barragem. Esta folga de um metro se refere à borda de segurança que geralmente é utilizada em barramentos pequenos.



Figura 1. Visualização da tela do GPSMAP526S sobre o perímetro da lagoa e calibração do RTK em campo.

A **Figura 2** representa esquematicamente a lógica do método sendo o cálculo da altura do barramento realizado de acordo com a Equação 2.

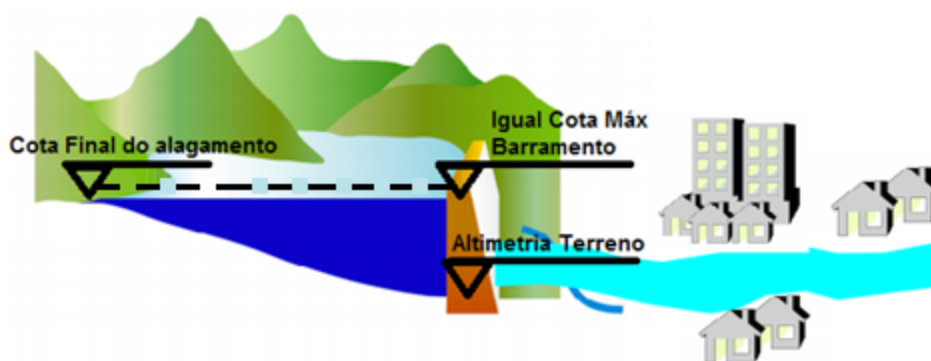


Figura 2. Esquematização da lógica da estimativa da altura do barramento.

$$H_b = C_{va} - C_{vb} + 1 \quad (2)$$

Em que H_b é a altura do barramento em metros, C_{va} a cota do vértice do fim do alagamento em metros e C_{vb} a cota do vértice no barramento em metros.

Posteriormente, foi estimada a relação cota x área alagada x volume acumulado aplicando um método aqui denominado “*um quarto, meio e três quartos*”. O método consiste em linearizar a relação área alagada com a altura do nível de água no barramento ($C_{va} - C_{vb}$). A linearização é realizada pela proporção de $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ e $\frac{3}{4}$ da altura do nível de água no barramento.

Para estimativa do volume acumulado, utilizou-se o método das “*seções transversais*” que é um método clássico para cálculo de volumes na área de topografia, por exemplo, descrito em Veiga (2007).

As cotas dos vértices do fim do alagamento e do barramento são estimadas pela altimetria resultante do Modelo Digital de Elevação (MDE) do software gratuito Google Earth.

A fim de possibilitar a comparação das metodologias, assumindo que o valor verdadeiro é o resultante das medições *in loco*, estimou-se o erro absoluto pela Equação 3 e o erro relativo pela Equação 4.

$$E_A = H_b - H \quad (3)$$

$$E_R = E_A / H_p \times 100 \quad (4)$$

Sendo E_A o erro absoluto em metros, E_R o erro relativo em porcentagem, H_b a altura do barramento calculada pela metodologia Campos (2015) e H altura do barramento medido *in loco*.

Para comparação das estimativas dos volumes acumulados entre as metodologias, utilizou-se das Equações 5 e 6.

$$E_A = Vol_{\text{estimado}} - Vol_{\text{calculado}} \quad (3)$$

$$E_R = E_A / Vol_{\text{calculado}} \times 100 \quad (4)$$

Sendo E_A o erro absoluto em metros, E_R o erro relativo em porcentagem, Vol_{estimado} o volume de água acumulada tendo sua área alagada calculada pela metodologia “*um quarto, meio e três quartos*” e o volume pelo método das seções transversais e $Vol_{\text{calculado}}$ o volume de água acumulada mensurado com as medições *in loco*.

4. Resultados e Discussão

Os mapas com as curvas de nível resultantes do levantamento em campo são mostrados na **Figura 3**.



Figura 3. Curvas Isobatimétricas a) barramento 1, b) barramento 2 e c) barramento 3.

Através deste levantamento em campo se calculou as curvas cota versus área alagada e cota versus volume acumulado apresentados nas **Figuras 4, 5 e 6**.

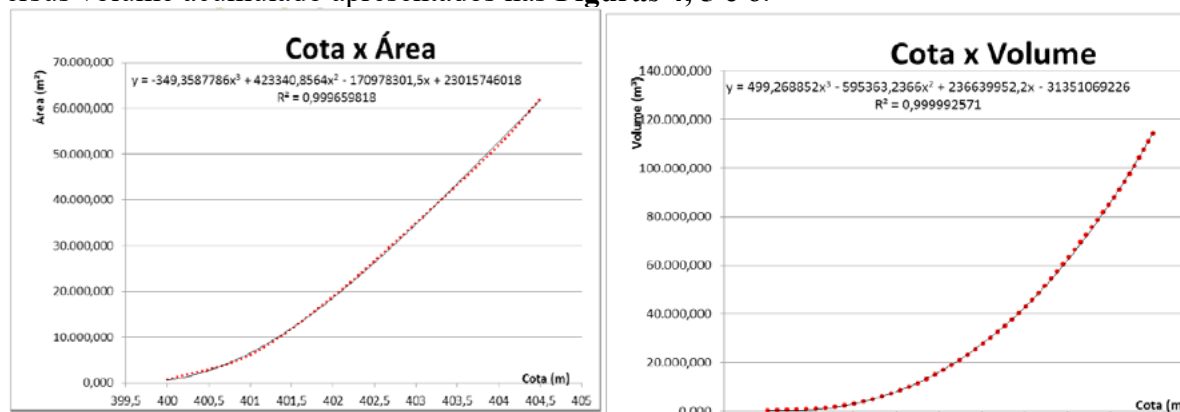


Figura 4. Curva Cota VS área alagada e Cota VS Volume Acumulado do barramento 1.

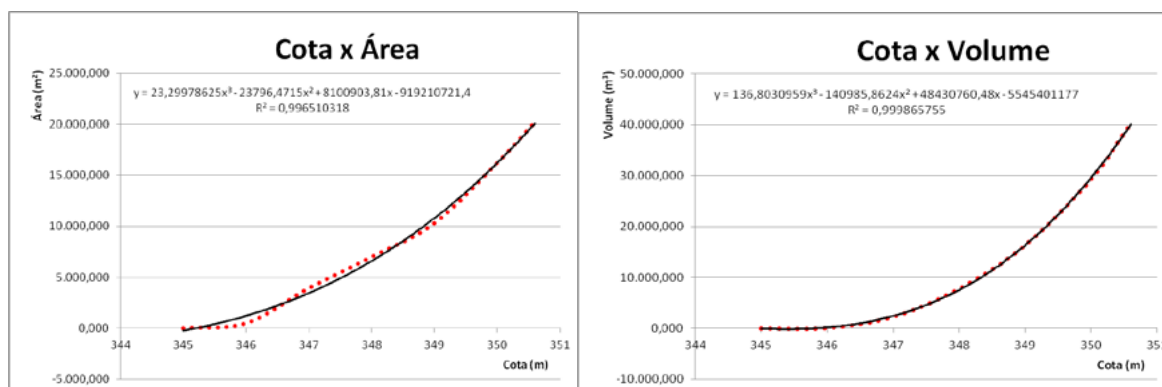


Figura 5. Curva Cota VS área alagada e Cota VS Volume Acumulado do barramento 2.

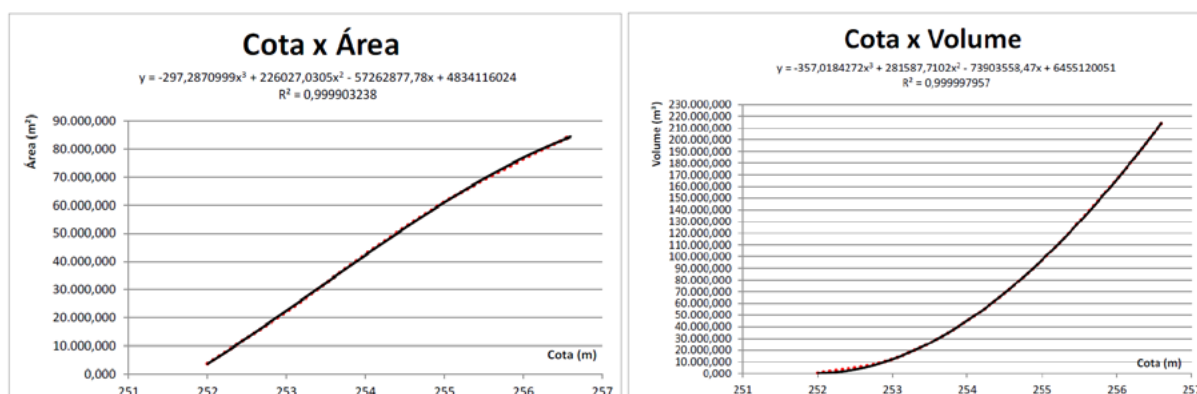


Figura 6. Curva Cota VS área alagada e Cota VS Volume Acumulado do barramento 3.

Pela equação dos gráficos, realizada com a ferramenta linha de tendência do MS Excel 2010, tem-se que o barramento 1 possui uma área alagada de 62.173,95 m² e volume acumulado de 114.699,21 m³ na cota máxima de 404,5 m resultando na altura da barragem de 5,5 m; o barramento 2 possui uma área alagada de 20.164,90 m² e volume acumulado de 40.215,09 m³ na cota máxima de 350,4 m contando com uma altura da barragem de 6,4 m e; para o barramento 3, com uma área alagada de 81.246,10 m² e volume acumulado de 215.917,04 m³ na cota máxima de 256,6 m tendo uma altura do barramento de 5,6 m.

4.1 Análise da Área Alagada

O software Google Earth possui disponível gratuitamente uma ferramenta que possibilita o cálculo de polígonos. Esta ferramenta é chamada “Google Earth Pro” e foi utilizada na estimativa da área alagada pelos barramentos. Os Resultados são apresentados nas **Figuras 7, 8 e 9**.

O software Google Earth disponibiliza imagens de satélites gratuitamente, sendo que para os barramentos 1 e 3, continha imagens Landsat 7, resolução 15 m datadas de 24/03/2000 e 13/11/2010, respectivamente. E para o barramento 2 o Google Earth tinha disponível imagens Spot, resolução 30 m sem informações de data.

Então, a área alagada do barramento 1 estimada pela ferramenta Google Earth Pro resultou em um valor de 62.212,24 m², valor este muito próximo do medido em campo de 62.173,95 m². Já o valor retornado para área alagada do barramento 2 foi de 16.026,06 m² e o medido em campo foi de 20.164,90 m². E para o barramento 3, a área alagada estimada foi de 44.461,71 m² e o medido em campo foi de 81.246,10 m².

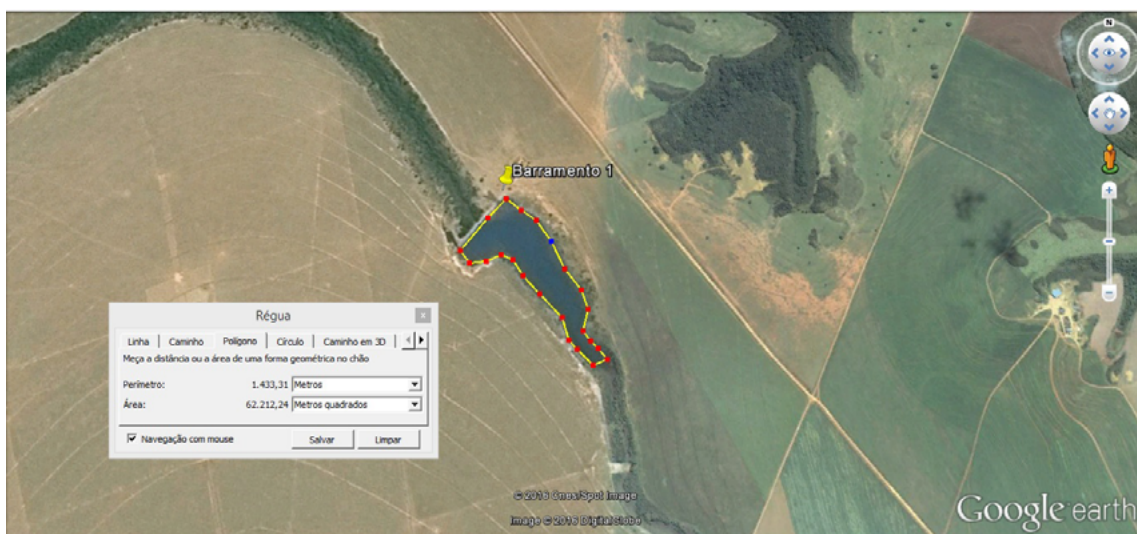


Figura 7. Área alagada pelo barramento 1 utilizando a ferramenta Google Earth Pro.

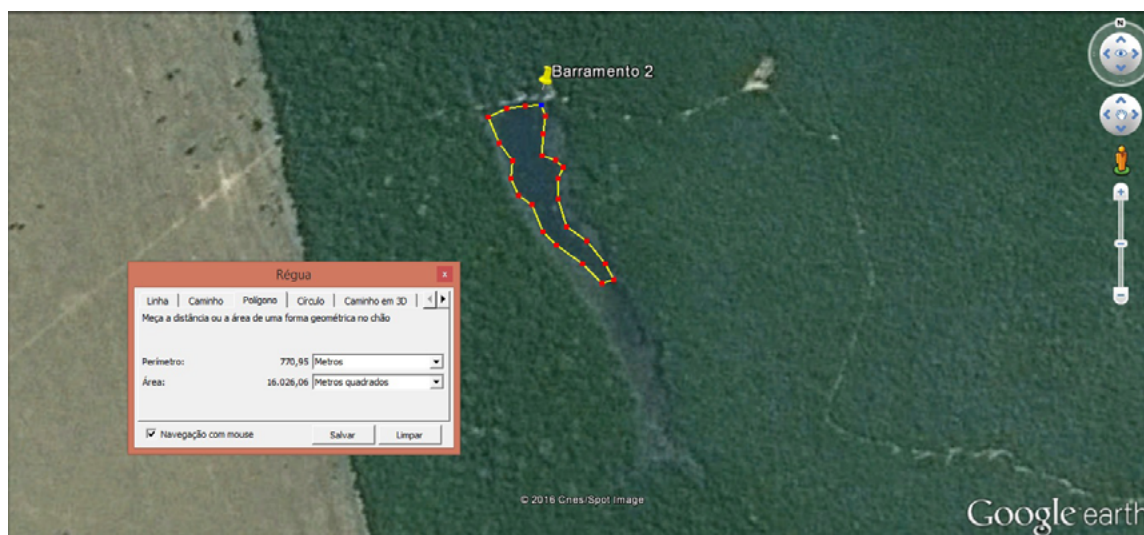


Figura 8. Área alagada pelo barramento 2 utilizando a ferramenta Google Earth Pro.



Figura 9. Área alagada pelo barramento 3 utilizando a ferramenta Google Earth Pro.

Percebe-se que a área alagada estimada por sensoriamento remoto é muito influenciada pela quantidade de água disponível no momento do mapeamento já que, costumeiramente, são realizados em época de estiagem. Isto pode ser comprovado pelas imagens das **Figuras 3, 7, 8 e 9**, onde se percebe a diferença de lâmina d'água visível nas imagens. Provavelmente devido a isto, a área alagada estimada pela ferramenta Google Earth Pro resultou em valores menores do que os medidos em campo.

Outro ponto que vale a pena salientar é de que a delimitação da área alagada no software depende de execução individual do técnico, onde se pode considerar o conhecimento, a experiência e a familiaridade com sensoriamento remoto, não obstante, esta é uma ferramenta de suma importância na democratização de análises geoespaciais.

4.2 Análise do Volume Acumulado e Altura do Barramento

Utilizando-se das áreas alagadas inferidas pelo Google Earth Pro se aplicou a metodologia de Campos (2015) e a metodologia de linearização da relação cota vs área alagada pela proporção “*um quarto, meio e três quartos*” para enfim se estimar o volume acumulado no barramento. Os resultados estão apresentados nas **Figuras 10, 11 e 12**.

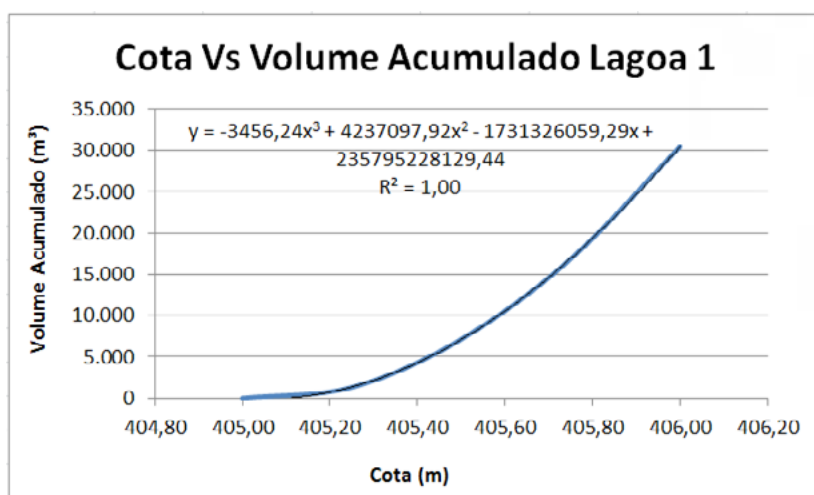


Figura 10. Curva da relação cota versus volume acumulado estimado do barramento 1.

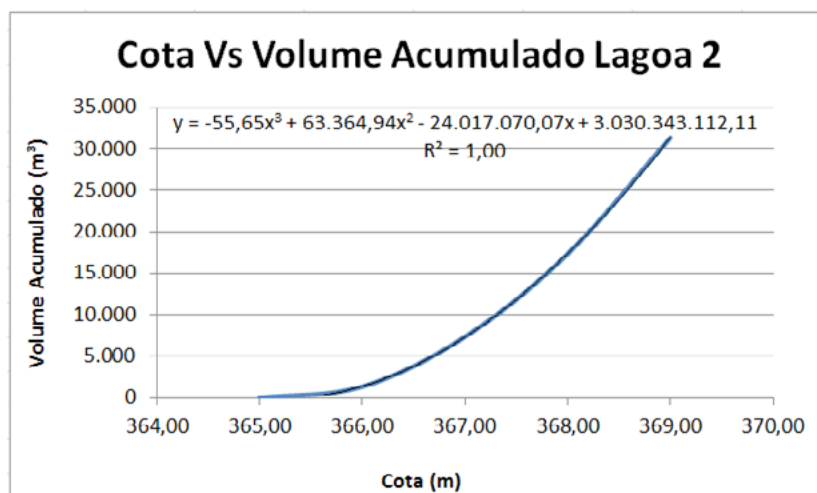


Figura 11. Curva da relação cota versus volume acumulado estimado do barramento 2.

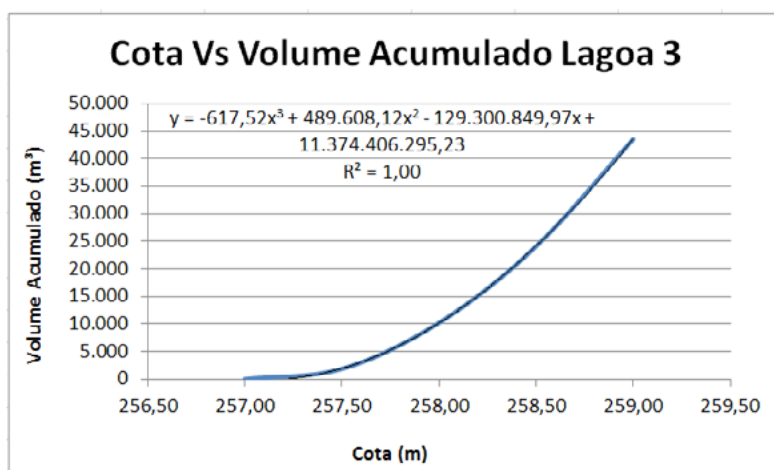


Figura 12. Curva da relação cota versus volume acumulado estimado do barramento 3.

Comparando o volume máximo acumulado estimado das **Figuras 10, 11 e 12** com o volume máximo acumulado mensurado em campo e apresentado nas **Figuras 4, 5 e 6** se verifica que para o barramento 1 o volume estimado é de 30.458,00 m³ e o valor mensurado em campo é de 114.669,21 m³. Para o barramento 2 o volume estimado é de 31.384,00 m³ e o valor mensurado em campo é de 40.215,08 m³ e já para o barramento 3 o volume estimado é de 43.535,00 m³ e o valor mensurado em campo é de 214.577,37 m³.

A **Tabela 2** apresenta os resultados dos volumes estimados e calculados com dados de campo e evidenciando o erro absoluto e relativo entre as metodologias estudadas.

Tabela 2. Resultado da comparação do volume acumulado estimado e calculado com dados de campo.

Barramento	Volume Estimado	Volume Calculado	Erro Absoluto	Erro Relativo (%)
1	30.458 m ³	114.669,21 m ³	-84.241,21 m ³	73,44
2	31.384 m ³	40.215,08 m ³	-8.831,08 m ³	21,96
3	43.535 m ³	214.577,37 m ³	-171.042,37 m ³	79,71

Quanto ao volume de água acumulada, o valor médio do erro relativo é de 58,37%, variando entre 21,96% e 79,71%. Este é um erro de cálculo que pode ser considerado grande e significativo, diminuindo a validade da técnica.

Também foi comparada a altura do barramento estimada pela metodologia Campos (2015) e calculada com dados medidos em campo. A **Tabela 3** apresenta os resultados.

Tabela 3. Resultado da comparação do altura do barramento estimada e calculada com dados de campo.

Barramento	Altura Estimada	Altura Calculada	Erro Absoluto	Erro Relativo (%)
1	2,0 m	5,5 m	-3,5 m	63,64
2	5,0 m	6,4 m	-1,4 m	21,87
3	3,0 m	5,6 m	-2,6 m	46,43

Para a altura do barramento, o valor médio do erro relativo é de 43,98%, variando entre 21,87% e 63,64%. Este erro também pode ser considerado significativo. Fazendo uma análise entre os percentuais de erro do volume acumulado com a altura do barramento, percebe-se que onde o erro relativo à altura do barramento é menor, o erro relativo ao volume acumulado também é menor. O grau de correlação entre essas características técnicas, calculada com a ferramenta “CORREL” do MS Excel 2010, é de 0,8671, mostrando que quanto melhor a aferição da altura do barramento melhor será a estimativa do volume acumulado.

Como o Google Earth apresenta a altimetria do terreno, é provável que na execução dos barramentos 1 e 3 houve escavação no terreno aprofundando o eixo do barramento e por conta disto, os valores reais da altura do barramento são maiores que o estimado pela sua altimetria.

Destarte, a metodologia “*um quarto, meio e três quartos*” se apresenta bastante limitada já que a grande variabilidade de execução dos barramentos não permite utilizar esta inferência de valores como base para análises das características técnicas.

5. Conclusões

O erro relativo médio entre as metodologias avaliadas para estimativa do volume de água acumulado foi de 58,37%, variando entre 21,96% e 79,71% e o erro relativo médio para estimativa da altura do barramento foi de 43,98%, variando entre 21,87% e 63,64%.

Para área alagada percebeu-se que a técnica do cálculo de polígonos do Google Earth Pro depende da quantidade de água armazenada no momento do imageamento pelo satélite. Para quantidades de água idênticas, o cálculo da área alagada torna-se preciso. No entanto, deve-se considerar que a experiência e conhecimentos do responsável pela realização do método podem influenciar na delimitação dos polígonos, porém em linhas gerais, não deve alterar significativamente o resultado final do volume considerado.

Técnicas de estimação de valores servem para otimizar a gestão de projetos, facilitando o planejamento de curto e médio prazo, o controle das atividades e cálculos de eficiência, produtividade e incertezas. Contudo, a metodologia explicitada se apresenta muito limitada sendo que os resultados foram divergentes em relação aos dados mensurados em campo, mesmo considerando a variabilidade na execução de obras hidráulicas.

Portanto, o método “*um quarto, meio e três quartos*” até pode servir como uma análise incipiente sobre as características técnicas em barramentos e indicativo da magnitude de valores de volumes acumulados pelo reservatório do barramento, mas de maneira alguma poderá substituir os dados mensurados *in loco* e não deve ser utilizado para planejamento, gerenciamento dos recursos hídricos e análises ambientais.

É notório o conhecimento sobre a quantidade de barragens construídas na bacia hidrográfica do Paraguai com influências diretas sobre o pantanal, de modo que o aperfeiçoamento desta metodologia ora abordada deve melhorar a tomada de decisão de Órgãos Gestores de Recursos Hídricos e também do proprietário da obra.

Por fim, vislumbra-se potencial na utilização destas ferramentas sociais para aferir características técnicas em barramentos com a condicionante do aprimoramento da resolução espacial das imagens disponíveis gratuitamente e prosperar a precisão da altimetria resultante do Modelo Digital de Elevação de maneira a detectar modificações antrópicas no ambiente.

6. Agradecimentos

Destaca-se um agradecimento especial à empresa Savana Assessoria e Projetos Florestais pelo apoio e disponibilização dos dados necessários a confecção deste artigo.

7. Referências

Brasil. **Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010**. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei nº 9.433 de 08 de janeiro de 1997 e do art. 4º da Lei 9.984 de 17 de julho de 2000. Diário Oficial da União, Brasília, 21 de set. 2010. Seção I. p. 1

Campos, M. M. **Estudo da Interferência de Aproveitamentos Hidrelétricos sobre o talvegue na região hidrográfica do Alto Paraguai**. 2015. 59 p. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Mato

Grosso - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Cuiabá. 2015.

Veiga, L. A. K.; **Topografia - Cálculo de Volumes**. Notas de Aula GA033 - Levantamentos Topográficos II. Engenharia de Cartografia e Agrimensura. Universidade Federal do Paraná, Curitiba: 2007. Disponível em <<http://www.cartografica.ufpr.br/home/wp-content/uploads/2012/11/Volume2006a.pdf>> Acessado em: 24 de junho de 2016.