

DETERMINAÇÃO DE CURVA “COTA X ÁREA” DO RESERVATÓRIO DA UHE TRÊS MARIAS COM O USO DE RADAR ALTIMÉTRICO E IMAGENS ORBITAIS

*Luiza Gontijo Álvares de Campos Abreu*¹; Philippe Maillard²*

Resumo – Cada vez mais os recursos hídricos são utilizados contra seus limites, com o aumento das populações e da para consumo, produção de alimentos, navegação e geração de energia, principalmente. Diferentes missões de satélites possuem instrumentos de medição da variação do nível dos oceanos e alguns desses instrumentos estão sendo usados em aplicações para águas continentais com resultados satisfatórios. Altimetros a bordo dos satélites Envisat e Saral (Altika) são usados constantemente para medir nível de água em corpos d'água continentais. Estudos recentes sobre altimetria combinada com imagens de satélite mostram o grande potencial dessas técnicas para estimar a variação temporal da água de rios, lagos, pantanais e reservatórios em resposta a variáveis climáticas e ambientais. O monitoramento consistente da variação do nível de reservatórios é crucial para o desenvolvimento de políticas e realização de ações relacionadas à distribuição e uso do recurso hídrico armazenado. Este estudo apresenta um método para combinar altimetria e imagens, ambos gerados por satélite, do lago do reservatório de Três Marias, localizado no Alto Rio São Francisco para estimar variação de nível e área e criar um modelo no qual um valor possa ser derivado do outro, nível pela área da superfície do lago ou vice-versa.

Palavras-Chave: sensoriamento remoto, altimetria radar, nível de água

INTRODUÇÃO

Os rios e lagos estão entre as maiores fontes de água para consumo humano e representam 0,26% do volume total de água doce do planeta (Shiklomanov 1998). O monitoramento dos recursos hídricos é uma questão crucial com o aumento da população e consequentemente da demanda por água. Monitorar a qualidade e garantir a quantidade de água disponível requerem sistemas confiáveis para assegurar que o recurso esteja disponível de maneira contínua nos rios e lagos.

O monitoramento sistemático da variação espacial e temporal do volume de água armazenado nos lagos dos reservatórios, de maneira regular e precisa, é essencial para entender os processos ambientais das áreas no entorno dos mesmos, desde a interferência das variações climáticas na disponibilidade hídrica até a gestão do recurso hídrico disponível pelos diferentes setores da sociedade (Crétaux e Birkett 2006).

O balanço hidrológico é um elemento essencial dos estudos relativos a água, seja para análise dos aspectos de qualidade ou quantidade. O conceito do balanço hidrológico de um lago é matematicamente simples: a variação do volume armazenado do lago é a diferença entre o fluxo de entrada e o fluxo de saída de água. Os lagos interagem com todos os componentes do sistema hidrológico: água atmosférica, superficial e sub superficial. O *input* e o *output* dessas componentes do sistema representam o balanço hidrológico do lago. Na prática esse balanço hidrológico do lago é algo mais complexo de se medir, uma vez que os fatores envolvidos são vários e a capacidade de medi-los é limitada. A mudança de volume do lago é crucial em seu balanço hidrológico, uma vez

¹ *Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências: luizagontijoaca@ufmg.br

² Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências: philippe@cart.igc.ufmg.br

que esse valor integra todos os fluxos de entrada e saída, representando o resultado final das interações presentes naquele ambiente (Winter 1995; Crétaux e Birkett 2006).

A altimetria por satélite radar é uma técnica que viabiliza a tomada de medidas de nível em oceanos, gelo, rios e lagos. Apesar de ter sido desenvolvida com o objetivo de monitorar os oceanos, a grande quantidade de dados em áreas continentais viabiliza os estudos em hidrologia, uma vez que o monitoramento sistemático da variação espacial e temporal da água, de maneira regular e precisa, é essencial para entender processos ambientais. Estudos recentes sobre altimetria por satélite combinados com imagens orbitais demonstraram o grande potencial dessas técnicas para estimar volume de água e a variação temporal da quantidade de água em resposta às mudanças do clima e outras variáveis ambientais no contexto de rios, lagos, áreas úmidas e reservatórios.

O objetivo deste trabalho é apresentar um método que combina a altimetria radar e imagens, ambos gerados por satélite, do reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) de Três Marias, localizado no Alto Rio São Francisco para estimar variação de nível e área e criar um modelo de curva “Cota x Área”, obtido totalmente através de sensoriamento remoto, no qual um valor possa ser derivado do outro (nível pela área da superfície do lago ou área pelo nível de água) e compará-lo aos dados medidos *in situ* pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG).

ÁREA DE ESTUDO

A região do Alto São Francisco, onde o reservatório de Três Marias está localizado, engloba desde a Serra da Canastra até o fim do Rio das Velhas, um dos mais importantes afluentes do Rio São Francisco, tendo área total de $\approx 100.000 \text{ km}^2$ e altitudes variando de 600 a 1600 m. A vegetação que ocorre na área caracteriza-se pela predominância das fitofisionomias de cerrado e fragmentos de floresta estacional semidecidual. O clima da região é classificado como tropical úmido de altitude, com precipitação anual entre 1100 a 2000 mm, concentrada principalmente nos meses de Outubro a Abril (MMA 2006).

O reservatório de Três Marias foi construído para regular o fluxo do Rio São Francisco, controlar enchentes, possibilitar a navegação entre as cidades de Pirapora e Juazeiro e promover a criação de projetos de irrigação, sendo o primeiro empreendimento hidráulico de grande porte com múltiplas finalidades no Brasil (Brito 2010; Cachapuz 2006). A construção da barragem do reservatório iniciou em 1957 e foi concluída em 1961, sendo um dos reservatórios mais antigos do Brasil e um dos maiores em termos de área inundada. O acesso à UHE de Três Marias, a partir de Belo Horizonte, é feito pela BR-040 no sentido Brasília e o trajeto possui aproximadamente 270 quilômetros.

DADOS

Nível d'água

Tradicionalmente o nível d'água de reservatórios é medido localmente em estações localizadas em pontos estratégicos como encontro com rios, pontes e/ou barragens (ANA, 2009). A CEMIG opera a estação do reservatório de Três Marias, nomeada UHE Três Marias Barramento, e nela são feitos dois tipos de monitoramento: limnimétrico e pluviométrico. O monitoramento limnimétrico refere-se aos dados do nível d'água do reservatório e o pluviométrico aos dados de precipitação.

Os dados referentes à estação UHE Três Marias Barramento, de 2000 a Junho de 2015, foram fornecidos pela CEMIG mediante pedido por carta protocolada na sede da empresa.

Medições de altimetria por radar foram utilizadas inicialmente para aplicações em topografia oceânica, entretanto desde o lançamento dos primeiros altímetros na década de 1970, pesquisadores veem estudando as possibilidades em usar os dados em águas continentais (Da Silva *et al.* 2012). Dos anos 2000 até o presente, a evolução da altimetria por satélite foi marcada pelo lançamento de múltiplas missões, dentre essas a missão *Environmental Satellite* (Envisat) e a missão SARAL, cujos dados são utilizados neste estudo.

O princípio da altimetria por radar é simples (Figura 1). Em linhas gerais, a altimetria por radar mede a distância entre o satélite e a superfície abaixo do mesmo através da emissão de ondas de radar, cujos ecos são refletidos pela superfície seja ela oceano, geleiras, gelo de mar, desertos, rios ou lagos. Essa distância, chamada de alcance (*range*), possui duas extremidades. Acima, é a posição do satélite que é conhecida de modo preciso através da órbita, referente ao elipsóide, com a contribuição de algum dispositivo de navegação a bordo do satélite como o *Orbit Determination Radiopositioning Integrated on Satellite* (DORIS) ou *Global Positioning System* (GPS), ou até mesmo ambos. Abaixo, a elevação absoluta da superfície (seja qual for a cobertura) é obtida da diferença entre a altitude da órbita e o alcance, com as correções para os efeitos atmosféricos de propagação e reflexão na superfície (Vignudelli *et al.* 2011).

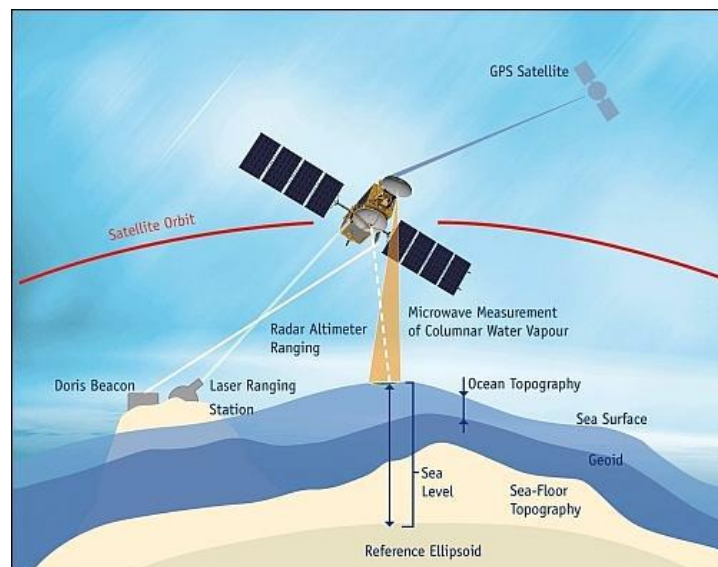


Figura 1 – Princípio da Altimetria por Radar

Os dados usados produzidos pelos sensores a bordo do Saral e Envisat foram obtidos através de plataformas online. Os arquivos com os dados produzidos pelo RA-2 do Envisat são obtidos através da base de dados do *Center for Topographic Studies of the Ocean and Hydrosphere* (CTOH), que permite a escolha de quais parâmetros, qual período e qual a área de interesse o usuário registrado no sistema quer obter. Os dados do Saral/AltiKa são obtidos através do banco de dados disponível no site AVISO+ (*Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data*).

Ambos os satélites compartilham a mesma órbita e ciclos de revisita para dois períodos de tempo diferentes, sendo o Envisat de Março de 2002 a Outubro de 2010 e o Saral de Março de 2013 até o presente. Como houve uma mudança de órbita no Envisat em 2010, não foram obtidos dados utilizáveis para a região do reservatório de Três Marias nos anos de 2011 e 2012, somente os dados da órbita original do Envisat foram usados no trabalho.

O Envisat foi lançado em 2002 com o objetivo de dar continuidade às observações feitas pela série de satélites ERS, além de aumentar a quantidade de variáveis ambientais monitoradas para melhorar a compreensão dos processos terrestres (Gardini *et al.* 1995). O projeto foi desenvolvido pelos países membros da ESA juntamente com a *Agence Spatiale Canadienne* (ASC), levando a bordo uma carga de 10 instrumentos dentre eles o altímetro RA-2, que produziu os dados usados nesse estudo. Gardini *et al.* (1995) descreve todos os instrumentos do Envisat, suas características e informações. A missão era prevista até 2007, havendo uma extensão até 2010 com mudança de órbita e uma posterior tentativa para 2013, porém em Abril de 2012 o contato com o Envisat foi perdido e a aquisição de dados foi finalizada.

O projeto Saral (AltiKa) é uma colaboração entre a agência espacial indiana, *Indian Space Research Organisation (ISRO)*, e o *Centre National d'Etudes Spatiales (CNES)* no qual o satélite lançado orbita a trajetória original do Envisat, garantindo a continuidade e consistência dos dados de altimetria coletados.

O satélite foi lançado em fevereiro de 2013 para substituir o Envisat levando quatro instrumentos a bordo, sendo um deles o altímetro-radiômetro AltiKa (Richard *et al.* 2008, Bronner *et al.* 2013). O AltiKa começou a ser desenvolvido em 2005 e faz parte de uma nova categoria de altímetros que possibilita que a carga responsável pela coleta de dados de altimetria (altímetro, sistema de localização e o radiômetro) caiba em satélites de tamanho reduzido, como o Saral.

Área da Superfície do Reservatório da UHE Três Marias

Conforme comunicação pessoal com técnicos da Diretoria de Geração e Transmissão da CEMIG, a curva de “cota X área” utilizada atualmente na operação do reservatório ainda é a gerada na época da sua construção. As cartas topográfica do vale do São Francisco, na escala 1:25000 e com curvas de nível de 5 em 5 m, datadas de 1952, foram usadas para a obtenção da área do espelho d’água pela CEMIG.

A área do espelho d’água é gerada pela CEMIG através do polinômio de quarto grau da curva “Área x Cota”, no qual a partir da cota (em metros) é possível calcular a área (em quilômetros quadrados) (Figura 2). Foram disponibilizados os parâmetros da curva original (Tabela 2) que compõem a Equação 1, que demonstra a obtenção do valor da área através da cota da superfície do reservatório.

$$Area_{cota} = a + b(cota) + c(cota)^2 + d(cota)^3 + e(cota)^4 \quad (1)$$

Tabela 2 – Coeficientes da Equação para a UHE de Três Marias

Coeficiente	Valor
A	12075000
B	-89344
C	248
D	-0,3
E	0,0001

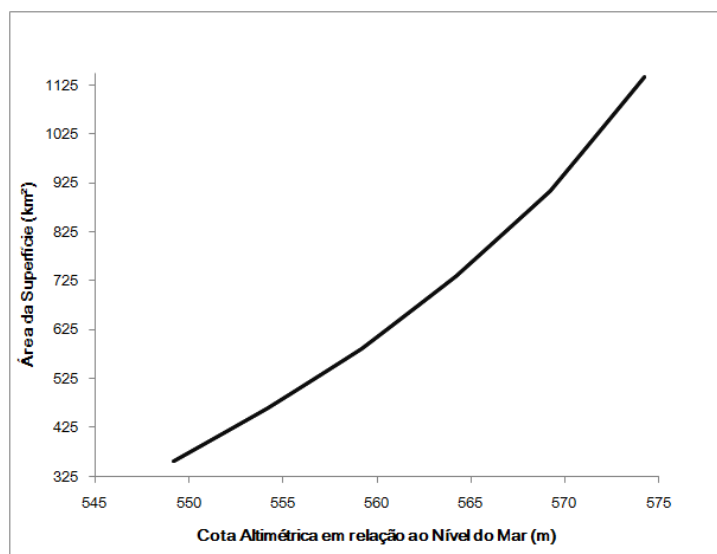


Figura 2 – Gráfico da curva “Área x Cota”

As imagens de satélite Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+ e Landsat 8 OLI usadas para obter as áreas do reservatório foram selecionadas do catálogo disponível do *United States Geological Survey (USGS)* através do site *EarthExplorer* que permite que parâmetros de localização, data e

quantidade de nuvens na cena sejam estipulados ao acessar o banco de dados das imagens do satélites selecionados. No caso, a cobertura máxima de nuvens estipulada foi de 20% e se mesmo assim houvesse cobertura de nuvens na área do espelho d'água a cena era descartada.

METODOLOGIA

Nível de Água

Os dados de altimetria por satélite necessitam uma série de procedimentos de correção e pré-processamento. Os parâmetros que são aplicados ao fazer esses procedimentos são fornecidos junto com os dados quando o pedido dos mesmos é realizado. A aplicação SWGTOOL foi desenvolvida para aplicar essas correções e realizar esse pré-processamento de forma automática (Maillard *et al.* 2015), podendo ser usado para extrair dados de altimetria para lagos ou rios, dependendo da necessidade do usuário.

A altitude da superfície é o resultado da diferença entre a altitude do satélite α com a amplitude ρ do pulso emitido, e suas correções considerando os fenômenos atmosféricos que retardam a propagação pulso sendo estes as variações da ionosfera (iono), pressão (troposfera sem umidade: dry) e umidade (troposfera úmida: wet); também são consideradas as variações de maré da superfície terrestre (set) e polar (pt) que geram movimentações crustais verticais. Para que a altitude final seja relativa ao datum do geóide e não ao elipsoide, é aplicada mais uma correção (fator GC na Equação 2).

$$H_w = \alpha - (\rho + \text{iono} + \text{dry} + \text{wet} + \text{set} + \text{pt}) + GC \quad (2)$$

Foram selecionados 12 pontos (Estações SWG) para que o SWGTOOL fizesse a extração do nível d'água do reservatório (Figura 3), essas coordenadas servem de referência para a aplicação além de um arquivo *shapefile* com os limites do reservatório. Como há somente um valor de medição *in situ* e 12 valores de medição por satélite, foi usada a média desses valores como valor final do nível SWG.

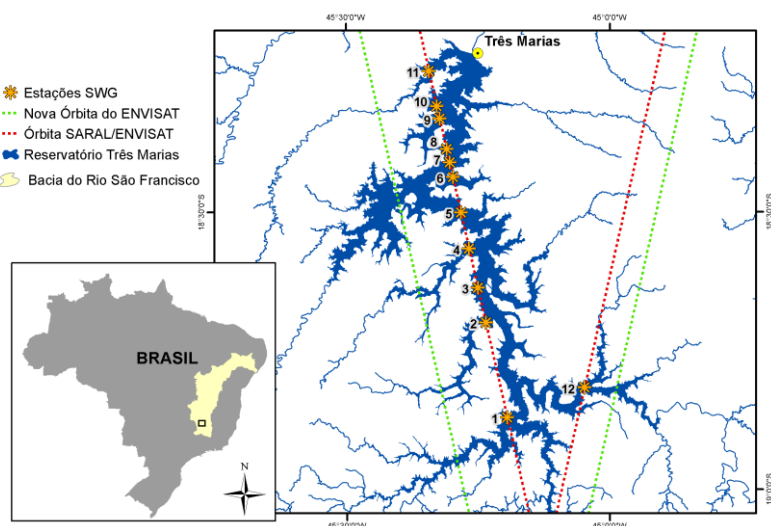


Figura 3 – Localização das Estações SWG selecionadas na órbita referente ao Envisat e Saral
Área do Reservatório

Depois de selecionadas as imagens de satélite, foram realizadas correções geométrica e atmosférica (Richter e Schlöpfer 2014) e de recorte da área de interesse.

O processo de classificação das imagens Landsat corrigidas Três Marias consistiu em utilizar a faixa espectral do infravermelho no comprimento de onda 1550-1750 nm para os sensores Landsat TM e ETM+ (banda 5) e 1570-1650 nm para o sensor Landsat OLI (banda 6), optou-se por essa faixa espectral devido a melhor resposta apresentada quando o objetivo é separar água das

demais feições na imagem (Ji *et al.* 2009; Maillard *et al.* 2012). Os valores de reflectância da banda fora adaptados para 0 a 255 e estabelecido um limiar para a classe de “água” e de “não-água”.

A classificação foi realizada aplicando a Equação 3, que gerou um raster binário com valores 0 e 1 para cada imagem, a partir disso foi gerado um *shapefile* e os polígonos correspondentes a feições “não-água” deletados restando somente os correspondentes à “água” que tiveram sua área calculada em quilômetros quadrados.

$$IF(input1 > 0 \text{ and } input1 \leq 25) \text{ then } 1 \text{ else } 0 \quad (3)$$

RESULTADOS

Uma vez estabelecidos todos os valores de nível de água SWG e de área do espelho d'água do reservatório (Tabela 3), foram calculadas a regressão linear e não linear (Equações 4 e 5) para as relações entre essas variáveis (Nível SWG x Área).

$$Nível_{SWG} = 541,9646 + 0,030(Área) \quad (4)$$

$$Nível_{SWG} = -0,00002(Área)^2 + 0,642(Área) + 530,53 \quad (5)$$

Tabela 3 – Data das Imagens, Sensor e data da passagem do satélite de altimetria

Data das Imagens	Sensor	Data da Altimetria
13 de Outubro, 2002	L7ETM+	16 de Outubro
06 de Março, 2003	L7ETM+	05 de Março
06 de Julho, 2004	L5TM	07 de Julho
27 de Novembro, 2004	L5TM	24 de Novembro
29 de Junho, 2007	L5TM	28 de Junho
31 de Julho, 2007	L5TM	02 de Agosto
17 de Julho, 2008	L5TM	17 de Julho
18 de Agosto, 2008	L5TM	21 de Agosto
04 de Julho, 2009	L5TM	03 de Julho
21 de Junho, 2010	L5TM	18 de Junho
24 de Agosto, 2010	L5TM	27 de Agosto
15 de Julho, 2013	L8OLI	13 de Julho
08 de Fevereiro, 2014	L8OLI	07 de Fevereiro
12 de Março, 2014	L8OLI	14 de Março
03 de Agosto, 2014	L8OLI	01 de Agosto
04 de Setembro, 2014	L8OLI	03 de Setembro

A partir do gráfico da regressão linear notou-se uma tendência nos dados que poderia ser melhor ajustada usando um polinômio de segundo grau. Esse ajuste fez o coeficiente de determinação passar de $R^2=0,9811$ (linear) para $R^2=0,9988$ (polinomial). Apesar de ter apresentado coeficiente de determinação R^2 um pouco melhor do que o apresentado pela regressão linear, a regressão não linear apresentou valores piores quando comparados aos gerados pela regressão linear e aos dados *in situ*.

O modelo de regressão linear gerado a partir dos dados obteve resultados mais próximos aos dados *in situ* fornecidos pela CEMIG, sendo assim o escolhido para gerar a série completa. Para a obtenção dos valores de área foi usada a Equação 6, gerada a partir da Equação 4 que também foi usada para obter os valores de nível para o modelo.

Foram usadas no total 175 datas com dados obtidos por sensoriamento remoto, sendo imagens ou nível d'água por altimetria satélite. Destas datas, 73 correspondem a imagens Landsat e 102 a medidas de Nível_{SWG}. Do total de imagens, 57 não possuem informação sobre Nível_{SWG}; já do total de medidas de Nível_{SWG}, 86 não possuem imagens Landsat correspondentes.

$$Área_{modelo} = \frac{Nível_{SWG}}{0,030} - 541,9646 \quad (6)$$

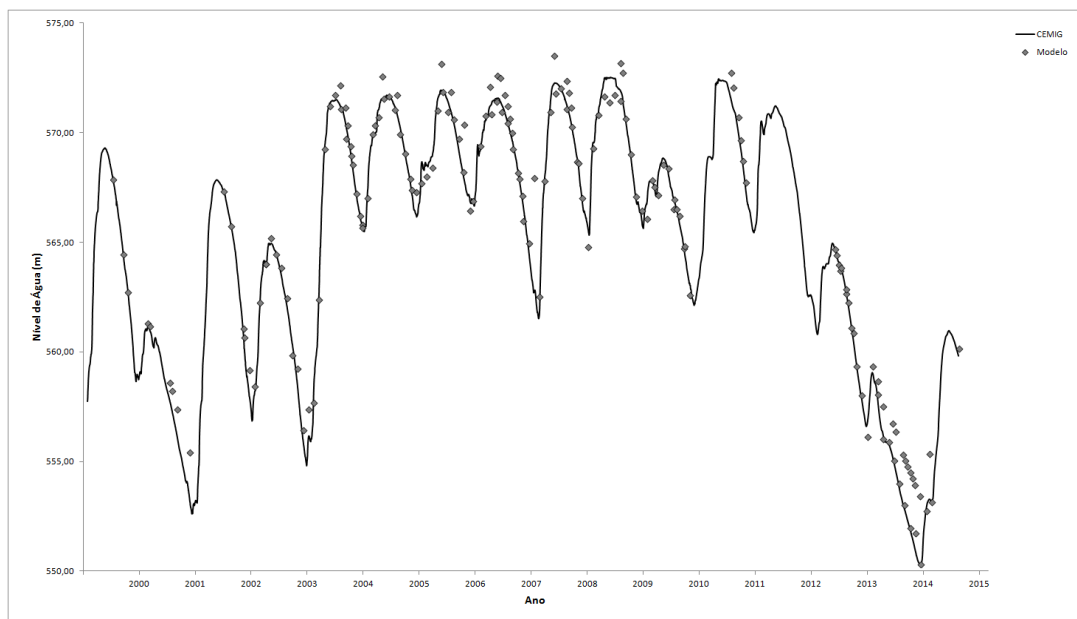


Figura 4 – Série temporal do nível do reservatório entre 2000 e 2015 de acordo com dados *in situ*. Os losangos mostram os níveis de água calculados a partir do modelo.

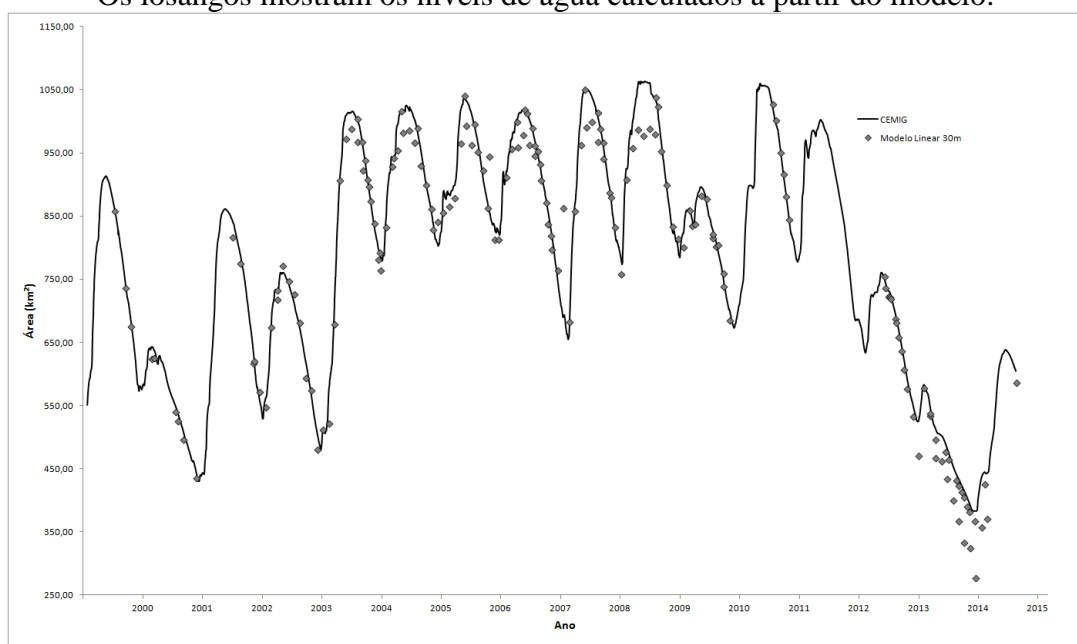


Figura 5 – Série temporal das áreas do reservatório entre 2000 e 2015 de acordo com dados *in situ*. Os losangos mostram as áreas calculadas a partir do modelo.

CONCLUSÃO

A partir dos resultados da aplicação da metodologia, foram estabelecidas relações entre as variáveis de nível, área e variação de volume. A partir das regressões feitas dos dados gerados por sensoriamento remoto e sua comparação com os dados da CEMIG foi possível estabelecer um modelo no qual pode-se inferir o valor do nível da água a partir do valor da área do espelho d'água obtido através da classificação de uma imagem Landsat ou então inferir a área do espelho d'água a partir do valor de nível obtido por altimetria.

Os resultados gerados podem ser usados para o monitoramento sazonal do reservatório de Três Marias auxiliando na compreensão dos diferentes processos que compõem o balanço hidrológico do lago.

Com a utilização de dados gratuitos e disponíveis online, a metodologia desenvolvida para o reservatório de Três Marias pode ser aplicada em outros lagos e reservatórios dependendo somente da sua disponibilidade geográfica, uma vez que a altimetria por satélite não está limitada somente aos sensores Envisat e SARAL.

Apesar do foco inicial da altimetria por satélite não ter sido a hidrologia, a grande quantidade de dados gerados contribui para o avanço dos estudos nesta área. Os dados produzidos podem ser utilizados de modo complementar aos dados *in situ*, para a criação de séries temporais (como as geradas nesse estudo), perfis altimétricos e, também, para o nivelamento de estações de monitoramento.

O uso de dados de altimetria por satélite com referência global permite que comparações com outros lagos e reservatórios em outras partes do mundo seja feita de maneira mais fácil e também que uma base de dados possa ser criada e alimentada com estas informações para pesquisas futuras, dando acesso a dados de nível de água para o público geral.

REFERÊNCIAS

- ANA, Agência Nacional de Águas (2009). *Inventário das Estações Fluviométricas* (2 ed.), Agência Nacional de Águas - SGH. Brasília – DF. 196p.
- BRITO, S. L. (2010). *Caracterização limnológica e produtividade secundária das principais espécies de microcrustáceos em dois braços dos reservatórios de Três Marias e Furnas, Minas Gerais, Brasil*. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, 107p.
- BRONNER, E., GUILLOT, A., PICOT, N., & NOUBEL, J. (2013). SARAL/AltiKa products handbook. No. CNES: SALP-MU-M-OP-15984-CN.
- CACHAPUZ, P. B. B. *Usinas da CEMIG: a história da eletricidade em Minas e no Brasil*. Centro da Memória da Eletricidade no Brasil. Rio de Janeiro – RJ. 304p.
- CRÉTAUX, JF.; BIRKETT, C.(2006) Lake studies from satellite radar altimetry. *Comptes Rendus Geoscience*, 338(14), p. 1098-1112.
- GARDINI, B., GRAF, G., & RATIER, G. (1995). The instruments on ENVISAT. *Acta Astronautica*, 37, pp. 301-311.
- JI, L., ZHANG, L., WYLIE, B. (2009). Analysis of dynamic thresholds for the normalized difference water index. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 75(11), pp.1307-1317.
- MAILLARD, P., LUIS, C. H. P., PIVARI, M. O. (2012). *Remote sensing for mapping and monitoring wetlands and small lakes in Southeast Brazil*. INTECH Open Access Publisher.
- MAILLARD, P., BERCHER, N., CALMANT, S. (2015). New processing approaches on the retrieval of water levels in Envisat and SARAL radar altimetry over rivers: A case study of the São Francisco River, Brazil. *Remote Sensing of Environment*, 156, pp. 226-241.
- MMA, Ministério do Meio Ambiente (2006) *Caderno da Região Hidrográfica do São Francisco* / Secretaria de Recursos Hídricos. – Brasília - DF. 148 p.
- DA SILVA, J. S. *et al.*. (2010) Water levels in the Amazon basin derived from the ERS 2 and ENVISAT radar altimetry missions. *Remote Sensing of Environment*, 114(10), pp. 2160-2181.
- RICHARD, J. *et al.*.(2008). AltiKa instrument for space altimetry with improved performances and ocean sampling: Development status and first test results. In: *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2008. IGARSS 2008. IEEE International*. IEEE, 2008. pp. III-67-III-70.
- RICHTER, R. E SCHLÄPFER, D. (2014). *ATCOR-2/3 User Guide* (ver. 8.3.1). ReSe Applications Schläpfer. Suíça. 238p.
- SHIKLOMANOV, I. A. (1998) *World water resources: a new appraisal and assessment for the 21st century*. Paris, 37p.
- WINTER, T. (1995). *Hydrological processes and the water budget of lakes* In: LERMAN, A; IMBODEN, D.; GAT, J. Physics and chemistry of lakes. New York, pp. 37-62.
- VIGNUDELLI, S. *et al.*. (2011) (Ed.). *Coastal altimetry*. Springer Science & Business Media, 564p.