

Uso de dados altimétricos na estimativa da variação do volume armazenado em pequenos reservatórios

Rafael Henrique Bloedow Kayser¹
Otávio Augusto Passaia¹
Walter Collishonn¹

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul- UFRGS/IPH
Caixa Postal 15029, CEP 91501-970 - Porto Alegre/RS
rafael.kayser@ufrgs.br, otavio.passaia@ufrgs.br, waltercollischonn@gmail.com

Abstract. In some regions of Brazil, the existence of a large number of small reservoirs distributed in the same basin has a crucial importance for water supply. The two regions with the highest concentration of small reservoirs are the extreme South of Brazil, where there's an excessively high water demand due the rice crop irrigation, and the semi-arid Northeastern region, where water shortages require the construction of many reservoirs. For managing the use of these resources in the medium and long term, it's essential the availability of water level or volume data monitoring, as well as historical series of these values. However, the scarcity of in-situ gaging stations makes the use of remote sensing an alternative to obtain reservoir data records. Satellite radar/laser altimetry is a technique that can be used to estimate water levels of open water bodies. In small reservoirs, with a surface area around 100 hectares or smaller, the restrictions for the use of altimetric sensors increase due the spatial resolution of most these sensors used with hydrological applications. This work presents an approach to determine the storage volume variation in small reservoirs, combining satellite altimetry from the ICESat mission data, as well as image processing techniques. These techniques are related to the extraction of reservoir surface area from optical sensors, more precisely from Landsat images. The comparison with the water volume obtained from the hydrological modeling and water balance demonstrate a good relation with the simulate data and estimated from satellite.

Palavras-chave: altimetry, image processing, small reservoirs, water balance, altimetria, processamento de imagens, pequenos reservatórios, balanço hídrico.

1. Introdução

De acordo com o relatório “Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil – Informe 2012” (ANA, 2013), as regiões brasileiras onde se verifica maior estresse hídrico estão localizadas nas bacias da região semiárida, na bacia do rio Tietê na região sudeste, e no sul do país, em porções das bacias do rio Uruguai e Atlântico Sul, mais precisamente na região da campanha no estado do Rio Grande do Sul. Neste último caso, o conflito ocorre devido à alta demanda de água para irrigação, ainda que a disponibilidade de água seja bastante superior às outras regiões citadas neste relatório. A cultura de arroz irrigado necessita de uma lâmina permanente de água que resulta numa demanda que pode variar entre 8.500 a 10.500 m³/ha.safr (Forgiarini et al. 2008).

Boa parte desta demanda é atendida por um conjunto de pequenas reservações construídas na maior parte pela iniciativa dos próprios irrigantes, as quais são chamadas de açudes. Estas estruturas conseguem armazenar poucos hectômetros cúbicos, dependendo da demanda a ser atendida, sendo normalmente estabelecidos em regiões de cabeceira. Além disso, na maior parte são constituídas por estruturas simples sem capacidade de controle da vazão de saída.

Em bacias onde ocorrem conflitos pelo uso da água, a aplicação dos instrumentos de gestão torna-se ainda mais necessária, e aliado a isto também se faz necessário o aumento do conhecimento técnico da dinâmica hidrológica do local. São discutidas questões como o impacto da implementação de novos açudes na disponibilidade hídrica, a necessidade de aumento da disponibilidade para garantir o atendimento nos períodos mais secos, a geração de conflitos entre outros usos da água, como a diluição de efluentes, dentre outros aspectos.

Por outro lado, o registro de dados relacionados ao início da operação destes reservatórios, bem como da capacidade de armazenamento e também do histórico de níveis e volume de água armazenado é praticamente inexistente, dificultando a realização destes estudos. Para contornar a ausência de informações in situ, lança-se mão da utilização do sensoriamento remoto para a

extração do maior número de dados possível. A identificação das áreas superficiais destes corpos hídricos a partir de sensores ópticos como as imagens Landsat já vem sendo utilizado em alguns estudos na região (Collishonn et al. (2011), Kayser (2014)). No entanto, a utilização de sensores altimétricos para a extração de níveis ainda não é utilizada nestes casos, apenas em reservatórios de grande porte, onde a resolução espacial deixa de ser um limitante para a utilização da gama de sensores altimétricos disponíveis.

O objetivo deste trabalho é avaliar a disponibilidade de dados altimétricos sobre os diversos pequenos reservatórios da bacia do rio Quaraí, mais precisamente os dados provenientes da missão ICESat, cuja resolução é pequena o suficiente para extrair dados de níveis de corpos hídricos semelhantes aos açudes de irrigação. Juntamente com os dados de altimetria, também é objetivo extrair dados de área superficial dos reservatórios a partir da classificação de imagens LANDSAT 5TM, para que uma vez tendo o mesmo par de informações em períodos similares, seja possível calcular a variação do volume do reservatório entre dois pares de valores conhecidos.

A região de estudo, correspondente à bacia do rio Quaraí, possui cerca de 14.800 km² e localiza-se na fronteira entre o sul do Brasil e a região nordeste do Uruguai. O rio Quaraí é tributário do rio Uruguai e faz parte da bacia do rio da Prata. Limita-se ao norte pela bacia do Rio Ibicuí, e ao sul pela bacia do Rio Arapey Grande, já em território uruguaio. Aproximadamente 6.700 km² (45 %) da bacia se encontra em território brasileiro, e 8.100 km² (55%) no extremo noroeste do Uruguai. A Figura 1.a apresenta um mapa de localização da bacia hidrográfica do Rio Quaraí e a Figura 1.b apresenta um detalhamento da região, indicando as centenas de pequenas reserwações presentes em toda a bacia.

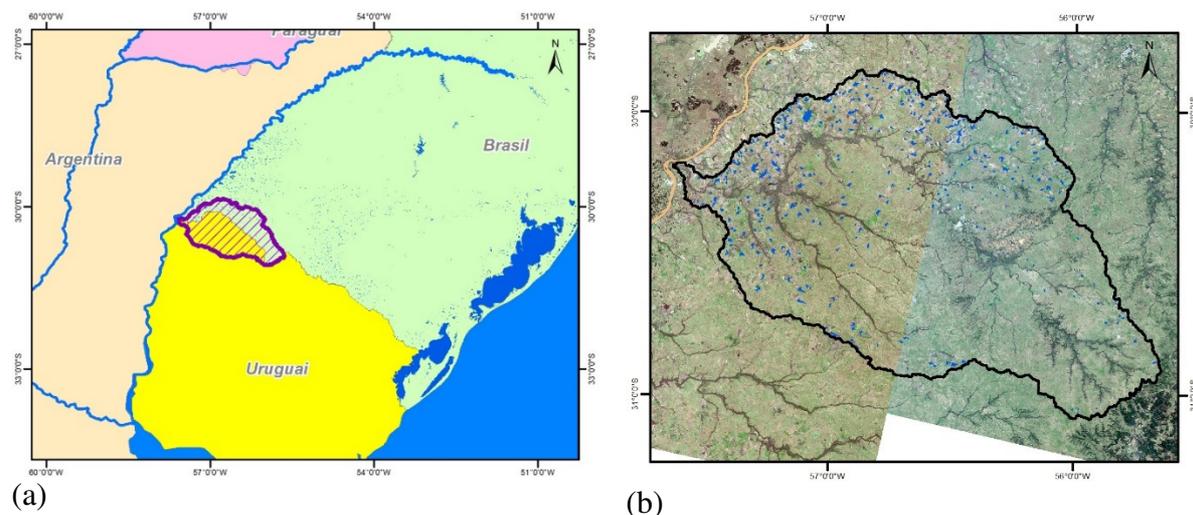


Figura 1 – Bacia hidrográfica do rio Quaraí: a) mapa de localização; b) detalhamento e distribuição dos reservatórios.

2. Metodologia

2.1. Verificação da disponibilidade de dados altimétricos

As técnicas de altimetria por satélite foram originalmente desenvolvidas para mensurar a superfície topográfica dos oceanos, sendo utilizada também para obter informações relacionadas à hidrologia terrestre, como por exemplo na estimativa da variação do nível de lagos e reservatórios, de rios e de planícies de inundação. A acurácia de altímetros baseados na verificação do nível de água pode variar entre 5 a 80 cm, dependendo do dado altimétrico utilizado, o tamanho do corpo hídrico sendo monitorado, configurações do terreno e presença de vegetação.

Em janeiro de 2003, a NASA deu início à missão ICESat (*Ice, Cloud, and land Elevation Satellite*), com um sistema de altimetria para a medir a variação das camadas de gelo nas zonas polares até o ano de 2009. No entanto, também é possível registrar o nível das regiões continentais sem a presença de gelo, incluindo-se os corpos d'água. A obtenção de níveis de água em lagos mostrou uma acurácia de 10 cm quando comparado com dados observados (Bhang et al., 2007).

A principal característica do satélite ICESat em conjunto com o sensor GLAS é que ele pode realizar medições a um intervalo de 172 metros ao longo da órbita, e além disso possui um *footprint* de cerca de 70 metros, muito menor em relação a altímetros de radar, cujo *footprint* é em torno de 1 a 10 quilômetros. O *footprint* corresponde à superfície de influência do sensor, o que significa que o monitoramento de pequenos lagos e reservatórios deva ser feito apenas pelo satélite ICESat (Duan et al, 2013).

Existem algumas órbitas do satélite ICESat que cruzam a região de estudo, conforme se pode observar pela figura 2.a. No entanto, existem algumas fontes de erros em relação aos dados altimétricos que devem ser considerados na seleção dos pontos a serem utilizados. O desempenho do satélite é comprometido com a presença de terreno inclinado, e também sob condições favoráveis à dispersão atmosférica (Fricker et al, 2005). Os dados de elevação obtidos a partir de uma densa cobertura de nuvens fornecem estimativas errôneas, apresentando valores muito superiores a atual superfície de elevação. Estes dados podem ser identificados utilizando metodologias de detecção de *outliers* a partir da comparação com Modelos Digitais de Elevação. Aplicou-se um método de remoção de pontos com possíveis fontes de erros. Ocorre também que os pontos de interesse correspondem aqueles que registram o nível dos corpos d'água, o que não ocorre para a grande maioria dos dados. Na figura 2.b são apresentados os registros que efetivamente poderão ser aproveitados.

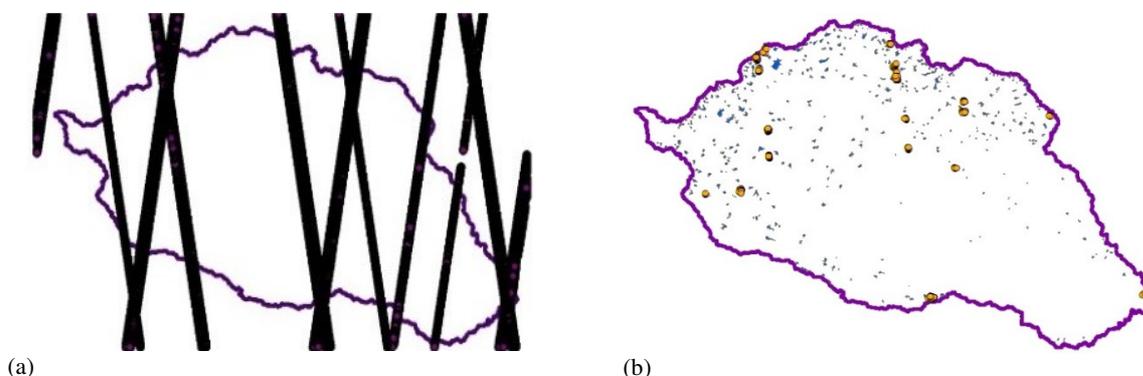


Figura 2 – Disponibilidade de dados ICESat na bacia do rio Quaraí: (a) relação das órbitas e dados brutos, (b) registro de níveis sobre os reservatórios da bacia.

2.2. Determinação da área superficial dos reservatórios utilizando imagens LANDSAT

Para a obtenção de uma série histórica de áreas superficiais dos reservatórios, lançou-se mão da utilização de imagens de satélite LANDSAT 5 TM. O período de aquisição de imagens coincidiu com o período de disponibilidade de dados altimétricos, estabelecendo-se o período de 2003 a 2011 como limites para a seleção das imagens. A região de estudo contempla duas órbitas do satélite, incluindo uma zona de *overlapping*, onde há uma sobreposição entre as duas órbitas. Embora o satélite possua um período de passada em torno de 15 dias, devido à cobertura de nuvens boa parte do registro de imagens não foi incluído no estudo. Por outro lado, nesta região de sobreposição, foi possível obter um maior número de imagens em relação à região sem *overlapping*. A Figura 3 apresenta o número de amostras de área superficial em cada reservatório da bacia, observando-se que na região de sobreposição entre as duas órbitas o número de amostras pode chegar a 33, numa média em torno de 4 imagens ao ano. Fora desta

região, o número máximo de amostras cai para 20, o que daria uma média de 2,5 imagens ao ano.

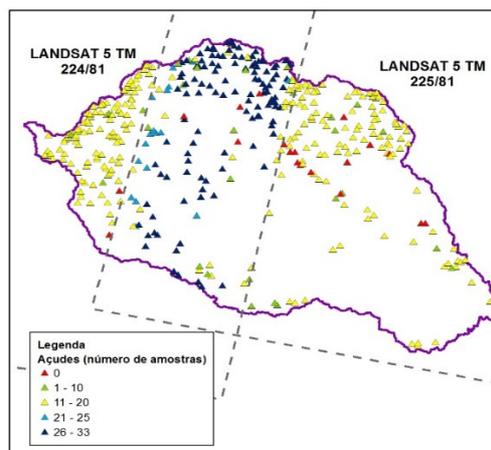


Figura 3 - Definição do número de amostras por reservatório, sendo indicada a sobreposição das duas órbitas das imagens de satélite.

McFeeters (1996) propôs um método de detecção de áreas de águas abertas em imagens ópticas chamado índice de Diferença Normalizada da Água (NDWI). O índice é uma composição entre duas imagens na banda do visível, correspondendo à banda verde e à banda do infravermelho próximo, conforme a seguinte relação:

$$NDWI = \frac{\rho_V - \rho_{IVP}}{\rho_V + \rho_{IVP}} \quad (1)$$

Onde ρ_V corresponde à banda verde e ρ_{IVP} corresponde à banda do infravermelho próximo. A seleção destes dois comprimentos de onda foi feita para maximizar a reflectância típica de corpos hídricos utilizando comprimentos de onda na luz verde, minimizar a baixa reflectância da água no comprimento de onda do infravermelho próximo pelos corpos hídricos, além de tirar proveito da alta reflectância do infravermelho próximo pela vegetação terrestre e também das camadas de solo.

Quando a equação 1 é aplicada em uma imagem de satélite multiespectral que contém uma imagem na banda verde e outra na banda do infravermelho próximo, as feições de água possuem valores positivos, ao passo que o solo e a vegetação terrestre possuem zero ou valores negativos, podendo ser facilmente configurado para eliminar estes valores. Esta técnica pode ser aplicada em sensores ópticos como a missão Landsat e também a missão MODIS.

2.3. Seleção das amostras de reservatórios

Devido à necessidade de disponibilização de dados de níveis e áreas superficiais dos reservatórios cuja observação dos satélites fora realizada em períodos próximos, não foi possível utilizar todos os dados altimétricos disponíveis, uma vez que para muitas datas não havia nenhuma imagem Landsat disponível. Foi adotado um critério de busca de imagens com até 30 dias de diferença em relação às observações do sensor ICESat. O resultado da busca é apresentado na Figura 4 e também na Tabela 1, no qual foram selecionados oito reservatórios com dois pares de observações para cada corpo hídrico. Açudes que continham somente um par de observação foram excluídos devido ao fato da necessidade de disponibilização de ao menos dois pares para a estimativa da variação do volume entre os dois períodos. A estimativa da variação do volume também é apresentada, considerando a hipótese de que os reservatórios possuem um formato piramidal, sendo calculado o volume do tronco formado pela área superficial inferior e superior.

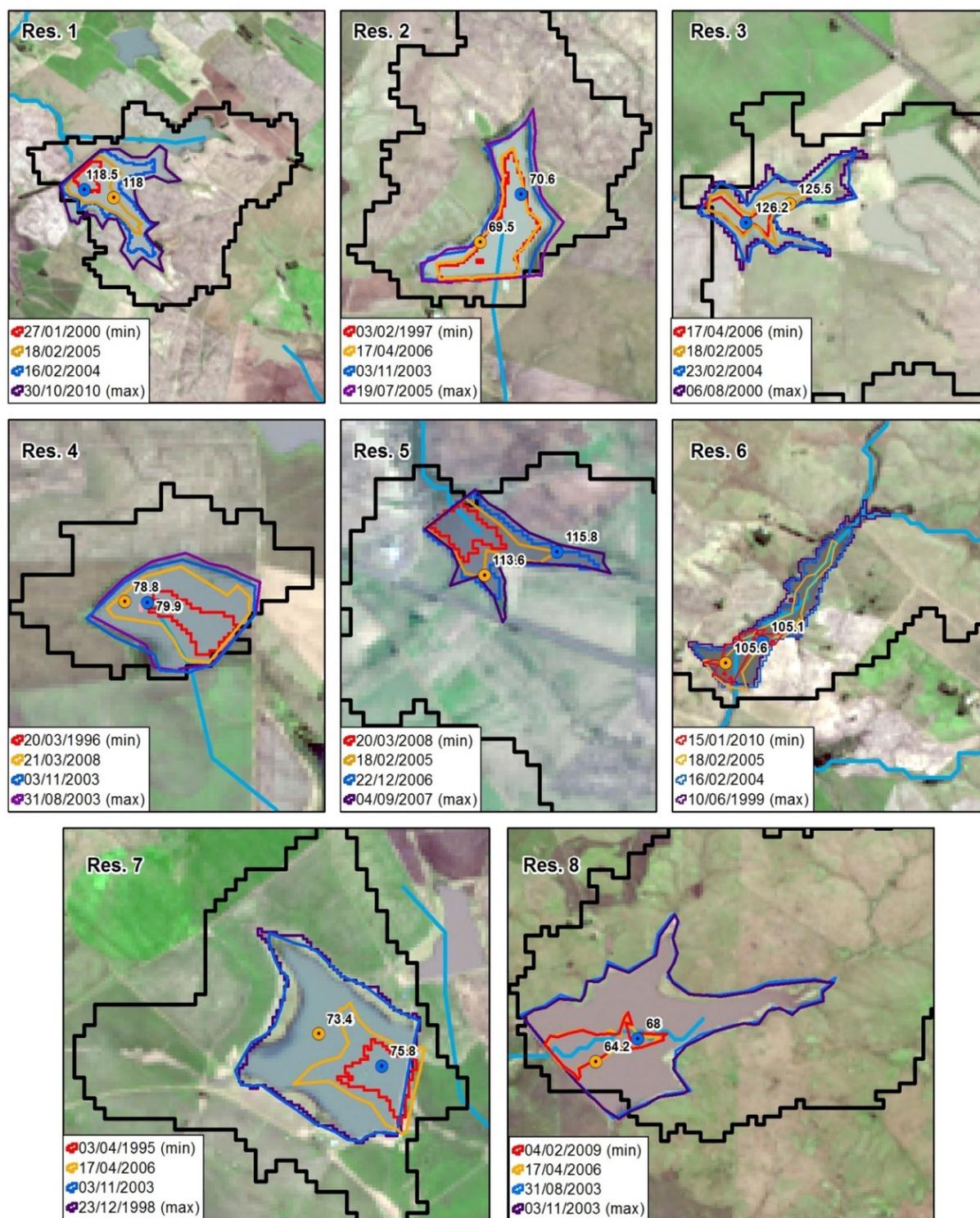


Figura 4 – Reservatórios selecionados e respectivas áreas superficiais mínima, máxima, dos períodos selecionados, além das estações virtuais com o registro dos níveis dos corpos hídricos.

Tabela 1 – Relação dos reservatórios selecionados e os respectivos dados disponíveis

Açude	Área de drenagem (km ²)	Área superficial máxima (ha)	Data de observação (IceSat)	Data de observação (Landsat)	Nível (m)	Área (ha)	Variação do volume (hm ³)
1	7,52	153,83	18/02/04	18/02/04	118,50	91,60	0,32
			19/02/05	16/02/05	118,03	45,29	
2	5,81	96,17	12/11/03	29/10/03	70,62	87,05	0,73
			22/03/06	12/04/06	69,52	47,65	
3	6,92	49,32	18/02/04	18/02/04	126,24	44,38	0,22
			19/02/05	16/02/05	125,46	13,65	
4	1,58	57,03	22/10/03	29/10/03	79,87	55,43	0,46
			23/02/08	19/03/08	78,82	33,59	
5	12,94	34,13	02/03/05	16/02/05	113,61	18,19	0,50
			08/11/06	08/11/06	115,79	27,91	
6	102,76	73,82	18/02/04	18/02/04	105,58	63,29	0,22
			19/02/05	16/02/05	105,10	30,47	
7	5,84	156,67	12/11/03	29/10/03	75,85	153,61	2,39
			22/03/06	12/04/06	73,35	47,64	
8	13,96	243,77	12/11/03	29/10/03	67,96	240,05	4,58
			22/03/06	12/04/06	64,18	33,71	

2.3. Descrição da modelagem hidrológica e do balanço hídrico nos açudes

Paralelamente à verificação da disponibilidade de dados de monitoramento dos níveis e da área superficial dos açudes, procedeu-se também à simulação hidrológica e balanço hídrico dos reservatórios. O balanço hídrico é representado a partir da aplicação da equação da continuidade ou conservação do volume para um reservatório, sendo simplificada no modelo proposto de acordo com a seguinte relação:

$$V_{s,r}(t + 1) = V_{s,r}(t) + V_{e,r}(t) + V_{p,r}(t) - V_{et,r}(t) - V_{i,r}(t) - V_{o,r}(t) \quad (1)$$

Onde $V_{s,r}(t)$ e $V_{s,r}(t + 1)$ representam o volume armazenado no passo de tempo atual e no passo de tempo posterior, respectivamente, $V_{e,r}(t)$ é o volume afluyente ao reservatório, $V_{et,r}(t)$ e $V_{p,r}(t)$ são respectivamente o volume correspondente à evaporação e a precipitação direta sobre o açude, e $V_{i,r}(t)$ é o volume de água utilizado para irrigação. Em cada passo de tempo são verificadas as condições de volume máximo ou volume mínimo, havendo extravasamento do volume armazenado no primeiro caso, e a ocorrência de falha de atendimento do segundo. Somente em caso de extravasamento, define-se um volume de saída, dado por $V_{o,r}(t)$.

As variáveis correspondentes ao volume afluyente e precipitação e evapotranspiração diretas foram obtidas a partir da aplicação do modelo hidrológico distribuído MGB-IPH (Collishonn, 2001). A descrição do processo de simulação hidrológica realizada na bacia pode ser encontrada em Kayser (2014), não sendo foco de discussão neste trabalho.

A variável correspondente ao volume utilizado para a irrigação é calculada de acordo com o volume armazenado no reservatório num período anterior ao início da safra. O período de safra da cultura do arroz corresponde a uma faixa de 90 a 100 dias entre os meses de dezembro a março, e a demanda de água para este período é estimada entre 10.000 e 14.000 m³/ha.safra. Assume-se que a área irrigada para uma determinada safra será igual ao equivalente de volume armazenado nos reservatórios ao final do mês de outubro, garantindo assim o fornecimento de água para todo o período da safra. Essa hipótese, de modo geral, corresponde ao procedimento adotado pelos irrigantes da região. Algumas variações deste procedimento, como a adoção de

um percentual de irrigação superior à disponibilidade de água e a prática de enchimento dos reservatórios no período de entressafra também são possíveis, embora não estejam considerados neste trabalho.

3. Resultados

A Figura 5 apresenta um comparativo entre a variação do volume dos reservatórios estimada pelos dados de satélite e a calculada pelo modelo de balanço hídrico. Observa-se que em geral há uma tendência de superestimativa dos valores calculados pelo modelo em relação à estimativa por satélite. Reservatórios maiores tendem a possuir um menor percentual de diferença entre os valores, enquanto que para os reservatórios pequenos as incertezas decorrentes da extração dos níveis pelo sensor altimétrico quanto pelo próprio modelo hidrológico tendem a acentuar o percentual de diferença entre os valores.

Em seguida, a Figura 6 apresenta trechos das simulações dos volumes armazenados em quatro amostras do estudo. Testou-se três diferentes valores de demanda (8.000, 10.000 e 12.000 m³/ha.safra), a fim de verificar a sensibilidade do modelo para esta variável. Nos casos em que os pontos amostrados correspondem a um no período da safra, e outro no período de entressafra, é possível evidenciar claramente a diferença ocasionada pelas retiradas de água que ocorrem ciclicamente entre dezembro e março, como é o caso dos exemplos 6.a e 6.b. Em 6.c observa-se uma superestimativa das depleções do reservatório em relação aos pontos observados, muito provavelmente pelo fato de que na realidade este reservatório não esteja sendo utilizado para a irrigação. Finalmente, em 6.d apresenta-se um caso em que ambos os pontos estão situados em diferentes períodos de safra, sendo que em uma delas houve uma redução mais significativa do volume armazenado, sendo possível captar esta diferença, tanto pelas observações dos dados de satélite quanto pela simulação do balanço hídrico.

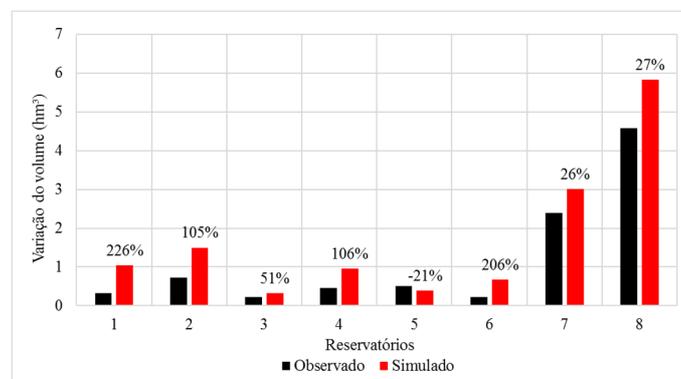
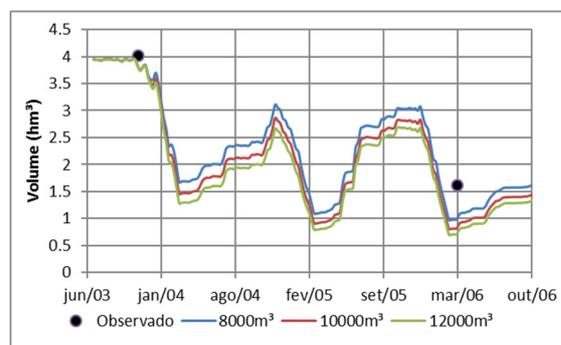
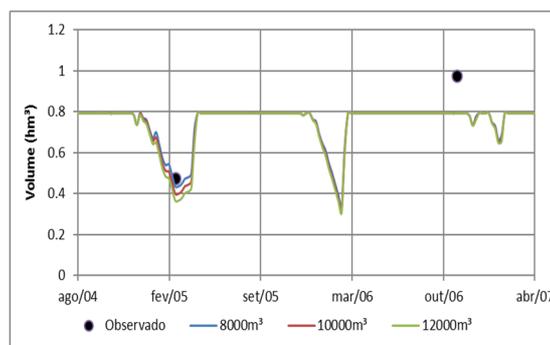


Figura 5 – Variação do volume observado e calculado pelo balanço hídrico



(a)



(b)

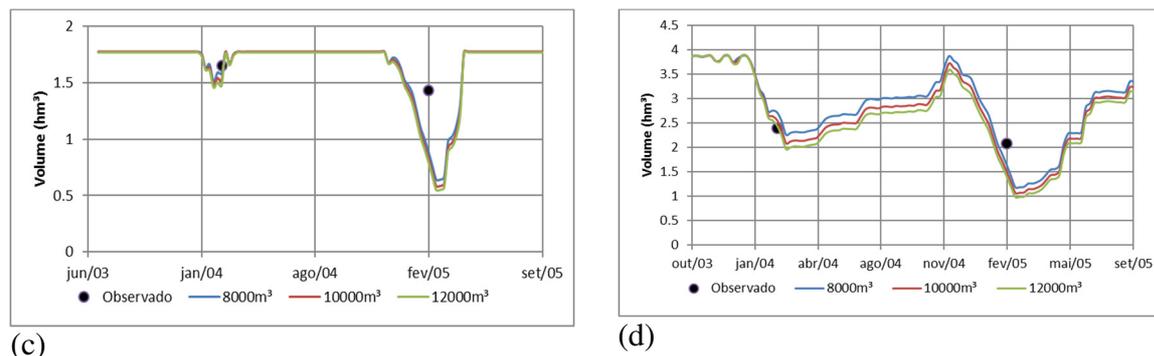


Figura 6 – Séries simuladas de volume armazenado nos reservatórios em comparação com os pontos observados para 4 amostras: a) açude 7; b) açude 5; c) açude 6; d) açude 1.

4. Conclusões

O trabalho mostrou que é possível monitorar o volume de pequenos reservatórios utilizando dados altimétricos em conjunto com imagens Landsat a partir da extração das áreas superficiais dos corpos hídricos. Futuramente, com o lançamento da missão SWOT (*Surface Water and Ocean Topography*), planejado especialmente para a verificação do nível de águas continentais e oceânicas, será possível monitorar um número muito maior de corpos hídricos com uma frequência temporal muito maior. Esse tipo de informação seria muito útil no planejamento da irrigação, auxiliando também na gestão de recursos hídricos.

5. Referências bibliográficas

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL). **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil - Informe 2013**. Brasília, 2013.
- BAUP, F.; FRAPPART, F. Combining high-resolution satellite images and altimetry to estimate the volume of small lakes. **Hydrol. Earth Syst. Sci**, 2014.
- BHANG, K. J.; SCHWARTZ, F. W.; & BRAUN, A. Verification of the vertical error in C-Band SRTM DEM using ICESat and Landsat-7. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, p. 36-44, 2007.
- COLLISCHONN, B. et al. Modelagem Hidrológica de Uma Bacia com Uso Intensivo de Água: Caso do Rio Quaraí-RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 16, n. 4, p. 119-133, 2011.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Simulação hidrológica de grandes bacias. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n.2, 2001.
- DUAN, Z.; BASTIAANSEN, W. Estimating water volume variations in lakes and reservoirs from four operational satellite altimetry databases and satellite imagery data. **Remote Sensing of Environment**, v. 134, p. 403-416, 2013.
- FORGIARINI, F. R.; SILVEIRA, G. L. D.; CRUZ, J. C. Modelagem da Cobrança pelo uso da Água Bruta na Bacia do Rio Santa Maria/RS: Estratégia Metodológica e Adaptação à Bacia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, p. 65-77, 2008.
- FRICKER, H. A.; BORSA, A.; MINSTER, B. Assessment of ICESat performance at the Salar de Uyuni. **Geophys Res Lett**, 2005.
- KAYSER, R. H. B. **Metodologia de balanço hídrico e critérios de outorga em bacias hidrográficas com uso intenso de reservatórios de pequeno porte: estudo de caso na bacia do rio Quaraí**. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental - UFRGS (Dissertação de Mestrado), 2014.
- MCFEETERS, S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, 1996.