



ANÁLISE DO BALANÇO HÍDRICO NA AMÉRICA DO SUL POR SENSORIAMENTO REMOTO

Adriana Aparecida Moreria ^{1*} & Anderson Luis Ruhoff ²

Resumo – Analisou-se o fechamento do balanço hídrico por meio de dados de sensoriamento remoto em 28 bacias na América do Sul, para o período de 2003 a 2014. A precipitação foi determinada a partir de dados TRMM, MSWEP e PERSIANN. Dados de evapotranspiração foram obtidos do produto MOD16. As medições do GRACE foram utilizadas para a obtenção dos dados de variação do armazenamento de água terrestre. Dados de vazão provenientes de estações fluviométricas da ANA. Os resultados indicam que a variação do armazenamento de água calculado utilizando sensoriamento remoto demonstrou significativas correlações com dados GRACE. Os melhores resultados foram encontrados para bacias com maiores percentuais de área e com marcada sazonalidade da precipitação. Ainda foi observado que cerca de 70% das bacias apresentaram melhorias nos resultados com a utilização das estimativas de precipitação do MSWEP. Apesar do fechamento do balanço hídrico ainda ser um desafio, devido as incertezas dos componentes do ciclo hidrológico por sensoriamento remoto, esses demonstram cada vez maiores consistências e grande potencial para estudos hidrológicos.

Palavras-Chave – Sensoriamento Remoto, GRACE, Precipitação.

WATER BALANCE EVALUATION IN SOUTH AMERICA BY REMOTE SENSING

Abstract – The main goal of this research was to evaluate the water balance budget using remote sensing data in 28 basins in South America from 2003 to 2014. Precipitation was estimated from TRMM, MSWEP and PERSIANN datasets. Evapotranspiration data was obtained from MOD16 and GRACE estimations were used to obtain the terrestrial water storage change data. We also used measured discharged data from the Brazilian Water Agency (ANA). The results indicate that the water storage change computed from remote sensing products yielded significant correlations with the terrestrial water storage from GRACE. The best results were found over large basins and with seasonal precipitation regimes. It was also observed that about 70% of basins showed improvements with the use of MSWEP precipitation dataset. Despite the water balance budget still remain a challenge due to hydrological cycle components uncertainties estimations from remote sensing, our results indicate an increasing consistency and great potential to hydrological research.

Keywords – Remote Sensing, GRACE, Precipitation.

1. INTRODUÇÃO

A equação geral do balanço hídrico (Equação 1), baseia-se na contabilização da água do solo, resultante da aplicação do princípio de conservação de massa. A variação do armazenamento de água (ΔS) consiste na representação do balanço das quantidades de água que entraram no sistema por precipitação (P) e que saíram por evapotranspiração (ET) e escoamento (Q) (SENTELHAS *et al.*, 1999).

¹ Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, moreiradriana00@gmail.com.

² Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, anderson.ruhoff@ufrgs.br.

$$\Delta S = P - ET - Q \quad (1)$$

Convencionalmente, os componentes do balanço hídrico são estabelecidos por meio de medições *in situ*, podendo tornar-se um desafio quando se pretende analisar regiões do globo que possuem uma baixa densidade de estações de medição. Além disso, algumas das variáveis do balanço hídrico, como a evapotranspiração, possuem uma maior limitação para o seu estabelecimento, em uma escala espacial considerável para realização de estudos de balanço hídrico em grande escala (WANG *et al.*, 2014).

Medições de sensoriamento remoto têm apresentado grande potencial para o fornecimento de variáveis do ciclo hidrológico, em escalas regionais e globais (ARMANIOS e FISHER, 2014; SHEFFIELD *et al.*, 2009, WANG *et al.*, 2014). Dados de precipitação podem ser obtidos por meio de medições nas faixas espectrais do micro-ondas e do infravermelho, por exemplo, proporcionando estimativas com resolução temporal desde de horária a composições mensais (ARMANIOS e FISHER, 2014; SHEFFIELD *et al.*, 2009), enquanto que a evapotranspiração pode ser estimada por meio do balanço de energia, sendo que estas estimativas possuem uma variedade de escalas temporais e espaciais, desde locais a globais. Desde 2002 com o lançamento da missão GRACE, medições da variação do armazenamento total de água terrestre também têm sido disponibilizadas, sendo essas estimativas derivadas das medições de gravidade terrestre (SHEFFIELD *et al.*, 2009).

Nessa perspectiva, o objetivo deste trabalho baseia-se na avaliação do balanço hídrico para áreas de drenagem no âmbito da América do Sul, utilizando dados de sensoriamento remoto para o período de 2003 a 2014.

2. METODOLOGIA

2.1. Área de estudo

A área de estudo deste trabalho consiste em 28 bacias hidrográficas delimitadas a partir de postos fluviométricos da ANA (Agência Nacional de Águas), dispostas em diferentes locais na América do Sul, com áreas variando aproximadamente entre 14 mil a 5 milhões de km² (Figura 1).

As maiores áreas estão concentradas na região de floresta amazônica, sendo esta a maior floresta tropical úmida do mundo com cerca de 7 milhões de km² e de significativa influência no clima local e global, devido aos fluxos de energia e água na atmosfera (COHEN *et al.*, 2007). Algumas áreas estão localizadas no cerrado, o segundo maior bioma da América do Sul, ocupando cerca de 22% do Brasil e de extrema importância nas questões relacionadas aos recursos hídricos, uma vez que neste bioma, encontra-se as nascentes das três maiores bacias hidrográficas da América do Sul (Amazônica/Tocantins, São Francisco e Prata) (OLIVEIRA *et al.*, 2014).

Outras áreas de drenagem estão localizadas no semiárido brasileiro e no sul do Brasil, regiões com diferentes regimes de precipitação, de vazão e de evapotranspiração.

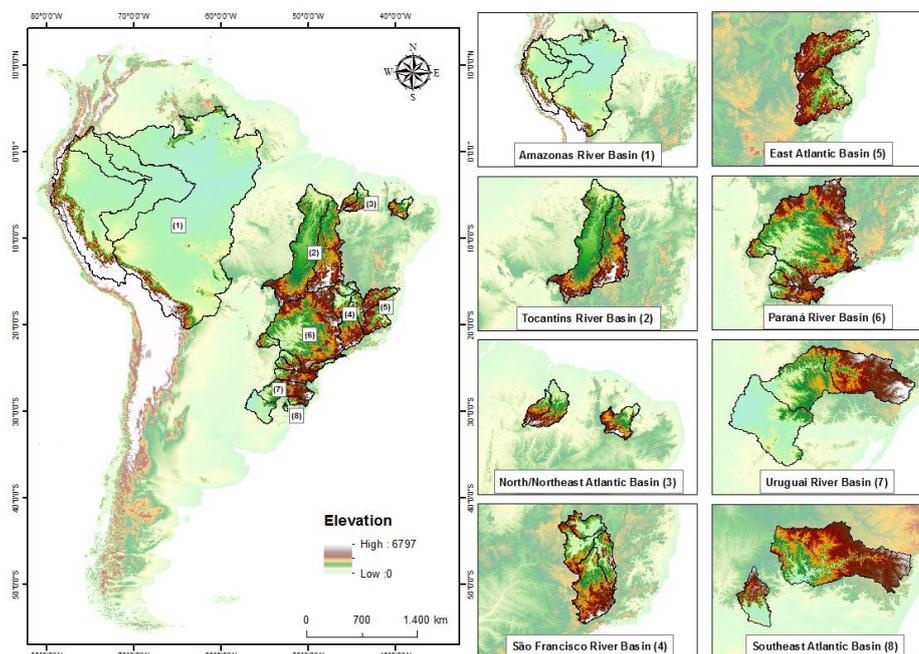


Figura 1 – Áreas de drenagem delimitadas por meio de postos fluviométricos da ANA (Agência Nacional de Águas).

Conjunto de dados

▪ dSdt – GRACE

A variação do armazenamento total de água terrestre foi obtida por meio de observações da missão GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*). A missão GRACE tem como objetivo observar as variações temporais do potencial gravitacional da Terra e conseqüentemente de sua massa. Por meio dessas observações é possível inferir a variação de armazenamento terrestre de água (TWS), uma vez que a maior parte da variação de massa em uma dada porção do território se deve à variação do armazenamento de água (PANDAY *et al.*, 2015).

▪ Precipitação (P)

- TRMM

O TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) foi lançado em 1997 pelas agências espaciais NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e JAXA (*National Space Development Agency of Japan*), com o objetivo de mensurar a precipitação em regiões tropicais e subtropicais do globo terrestre. Neste estudo foram utilizados dados de precipitação mensal, a partir do produto 3B43 Versão 7, com resolução espacial de 0,25° (HUFFMAN *et al.*, 2007).

- MSWEP

Os dados de precipitação do MSWEP (*Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation*) tem como premissa a utilização de um conjunto de dados de múltiplas fontes na estimativa da precipitação, onde são utilizados observações de sensoriamento remoto, medições *in situ*, além de dados de modelos de reanálise. As estimativas são disponibilizadas para o período de 1979 a 2015, para todo o globo terrestre em escala horária (3 horas) e em composições diárias, com resolução espacial de 0.25° (BECK *et al.*, 2017).

- PERSIANN

As estimativas do algoritmo PERSIANN (*Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Network*) também fornecem dados de precipitação tendo como fonte dados de sensoriamento remoto, a partir da combinação de informações nas faixas espectrais do infravermelho e do micro-ondas de diferentes satélites geoestacionários e baixa-órbita. Os dados estão disponíveis a partir de 1983, em resolução temporal diária e resolução espacial de $0,25^\circ$ (ASHOURI *et al.*, 2015).

▪ Evapotranspiração (ET)

A evapotranspiração foi obtida por meio do produto MOD16, que tem como base a equação de Penman-Monteith (MU *et al.*, 2011). Os dados estão disponíveis em resoluções espaciais de $0,05^\circ$ e 1 km, em escalas temporais de 8 dias, mensais e anuais. Neste estudo foram utilizados os dados mensais de evapotranspiração do MOD16, com resolução espacial de $0,05^\circ$.

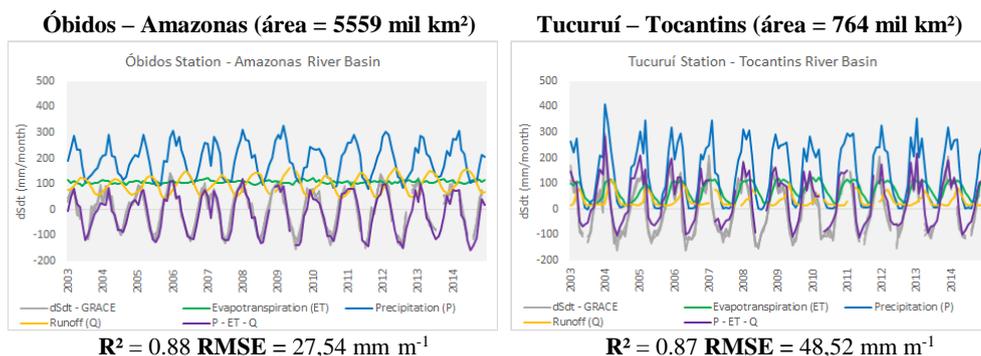
▪ Vazão (Q)

A vazão foi o único dado deste estudo que foi obtido por meio de medições *in situ*. Estes foram adquiridos junto ao sistema Hidroweb (Sistemas de informações hidrológicas) da ANA. O critério para aquisição destes dados se baseou na existência de registros com menor número de falhas para o período de 2003 a 2014. Os dados foram organizados com apoio do *software* livre Super Manejo de Dados (COELHO e FAN, 2016).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A variação do armazenamento de água calculado a partir da Equação 1 apresentou para a maior parte das bacias resultados consistente quando comparados aos dados GRACE. Foram encontrados coeficientes de correlação significativos, principalmente para as maiores bacias e localizados mais ao norte da América do Sul (com climas equatorial e tropical) enquanto que menores correlações foram encontradas em pequenas bacias, localizadas principalmente na região sul do Brasil (tipicamente em clima subtropical).

A Figura 2 apresenta alguns dos resultados encontrados. Para a estação de Óbidos observa-se um melhor ajuste no fechamento do balanço hídrico com um R^2 superior a 0,88 e um RMSE de $27,54 \text{ mm m}^{-1}$. Outros resultados com coeficientes de correlação entre $dSdt$ (GRACE) e $P - ET - Q$ também considerados significativos foram encontrados para áreas localizadas nas bacias do rio Amazonas, São Francisco, Atlântico Nordeste e Tocantins. Para estações das bacias do Atlântico Sudeste, Uruguai e na maioria das bacias do rio Paraná foram encontrados os maiores valores de RMSE e com menores coeficientes de correlação. Como exemplo, as estações de Registro (SP) e Uruguiana (RS) apresentam essa situação, com R^2 0,10 e 0,15, respectivamente, e RMSE acima de 60 mm m^{-1} .



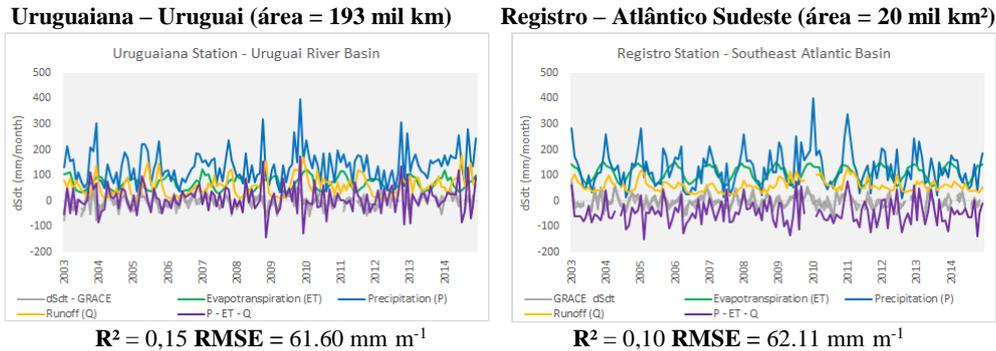


Figura 2 – Variação temporal da estimativa do balanço hídrico a partir de dados de sensoriamento remoto. Legenda: dSdt (GRACE), Precipitação (MSWEP), Evapotranspiração (MOD16) e Vazão (ANA). Resultados de R^2 e RMSE correspondente a relação dSdt (GRACE) vs $P - ET - Q$.

Observou-se que a variação dos resultados do fechamento do balanço hídrico podem estar relacionados ao tamanho da áreas das bacias e também a sazonalidade das variáveis do ciclo hidrológico. A resolução espacial dos *pixels* dos dados de sensoriamento remoto de escala global, pode limitar consideravelmente aplicações em pequenas bacias hidrográficas. Neste sentido, Landerer e Swenson (2012) afirmam que a qualidade das análises realizadas utilizando dados GRACE estão relacionada a área, sendo que o aumento do tamanho da área analisada, geralmente ocorre uma redução considerável dos erros e/ou incertezas. Analisando o coeficiente de correlação R^2 e o RMSE em função das áreas das bacias, foi observado que, principalmente em relação ao erro, este decresce em conformidade com o aumento das áreas das bacias (Figura 3).

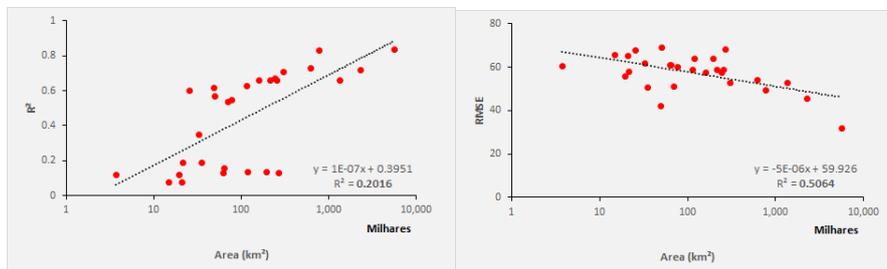


Figura 3 – Relação entre coeficiente de determinação (R^2) e RMSE em função da área das bacias. Resultados obtidos a partir de dados de precipitação (TRMM), considerando dSdt (GRACE) vs $P - ET - Q$.

Na Figura 4 são apresentadas as relações entre índices de sazonalidade (Shuttleworth, 2012) e os resultados obtidos a partir de dSdt (GRACE) vs $P - ET - Q$. Observam-se, de uma maneira geral, melhores resultados em localidades com maior sazonalidade climática (maiores valores de SI).

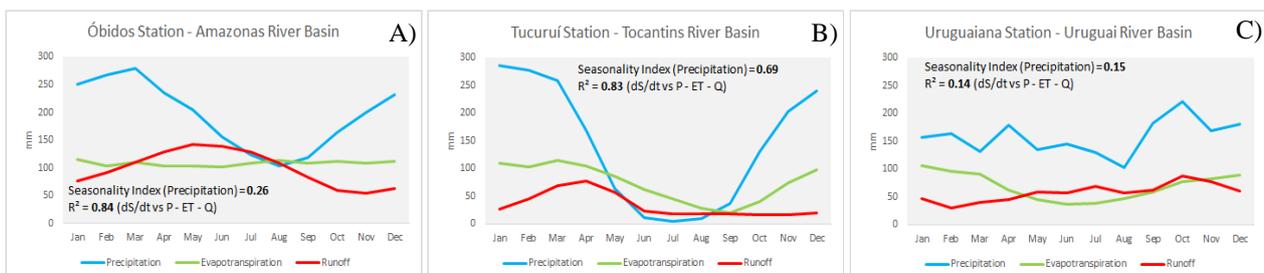


Figura 4 – Relação entre índices de sazonalidade e balanço hídrico médio mensal em diferentes condições climáticas: (A) Estação de Óbidos (AM), (B) Estação de Tucuruí (PA) e (C) Estação de Uruguai (RS), a partir da utilização de dados de precipitação (TRMM), Evapotranspiração (MOD16), Vazão (ANA).

O fechamento do balanço hídrico foi testado para três bases de dados de precipitação, incluindo dados TRMM, MSWEP e PERSIANN. A Figura 5 apresenta gráficos de dispersão dos resultados entre os termos da equação de balanço hídrico considerando as diferentes bases de precipitação.

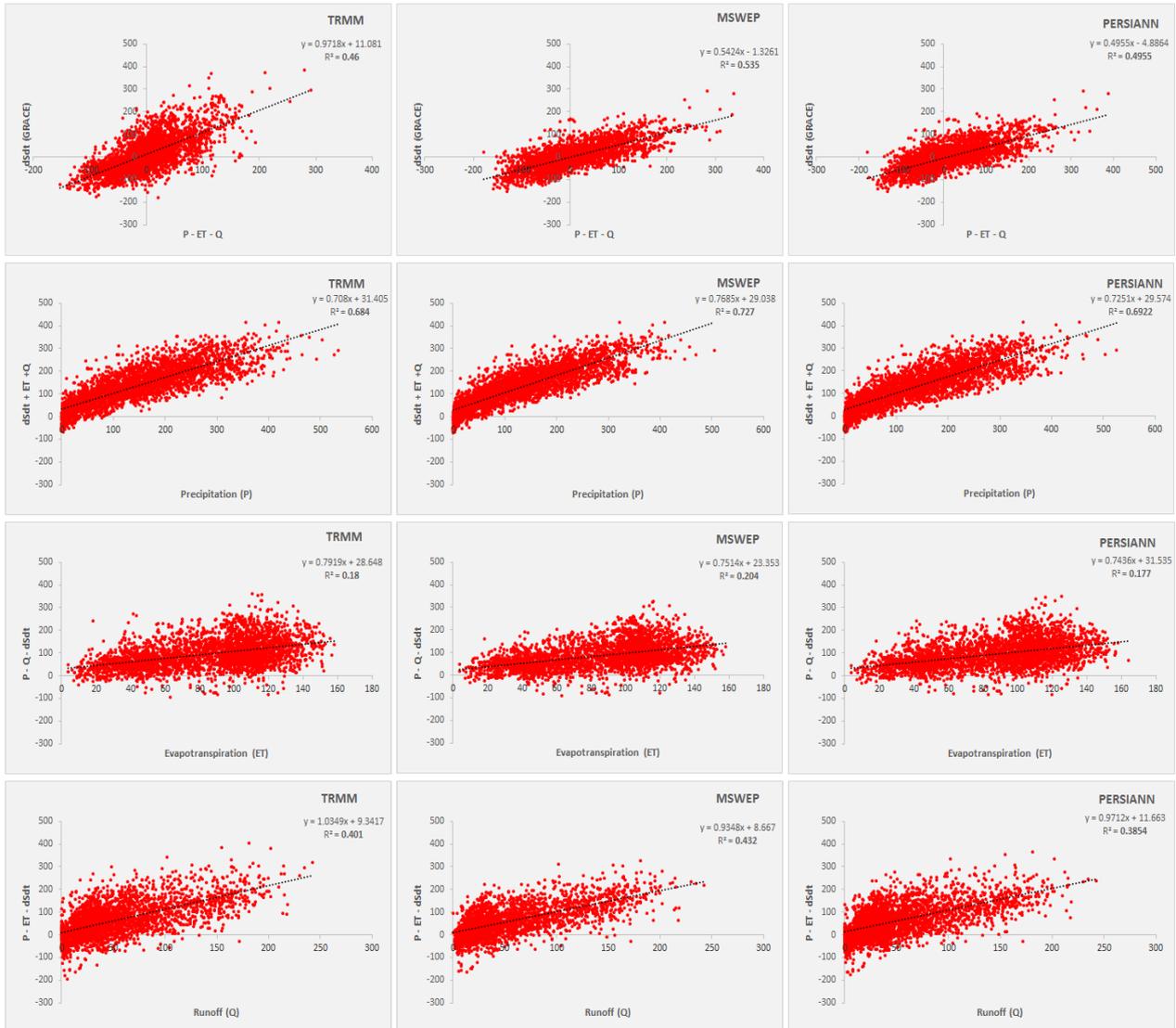


Figura 5 – Relação entre os termos da equação de balanço hídrico comparativamente com uso de dados de precipitação do TRMM, MSWEP e PERSIANN.

Verifica-se que os melhores resultados encontrados para o fechamento do balanço hídrico foram aqueles com a utilização de dados de precipitação do MSWEP. Esses melhores resultados podem estar atrelados ao conjunto de entrada do MSWEP que utiliza de dados de reanálise, medições de satélite e de mensuração *in situ* para calibração (BECK *et al.*, 2017). Cerca de 70% das bacias deste estudo apresentaram melhorias nos resultados com a utilização de dados MSWEP, sendo observados maiores valores de coeficientes de correlação (R^2 e r) e menores erros (RMSE).

Lv *et al.* (2017) também avaliaram o fechamento do balanço hídrico com dados de sensoriamento remoto e encontraram consistentes resultados com a utilização de dados de precipitação MSWEP. Além disso, observa-se que a precipitação foi a componente hidrológica que apresentou as melhores correlações, com R^2 acima de 0,68 nas três bases de dados, sugerindo que a precipitação pode influenciar no armazenamento terrestre de água. A vazão também apresentou

resultados consistentes, enquanto que a evapotranspiração foi a componente que apresentou maiores incertezas no fechamento do balanço hídrico. Alguns estudos indicam a limitação dos dados do MOD16 em estimar de forma consistente a evapotranspiração (PANDAY *et al.* 2015; RUHOFF *et al.*, 2013). Nesse contexto, sugere-se a análise de outras bases de dados de evapotranspiração na estimativa de balanço hídrico por sensoriamento remoto para superar possíveis limitações atreladas a essa componente do ciclo hidrológico.

CONCLUSÕES

A maioria das bacias em análise apresentou coeficientes de correlação significativos entre a variação do armazenamento de água (GRACE) e a mesma componente estimada através de $P - ET - Q$.

Os melhores resultados foram observados para bacias com maiores áreas e com sazonalidade de precipitação bem definida. Além disso, a utilização de dados de precipitação MSWEP demonstrou que, para grande maioria das bacias, os resultados do fechamento do balanço hídrico foram melhores quando comparados às outras bases de precipitação.

O fechamento do balanço hídrico com base em dados de sensoriamento remoto ainda apresenta-se desafiador devido as incertezas relacionadas as estimativas das variáveis do ciclo hidrológico. No entanto, este estudo demonstra o grande potencial dos dados de sensoriamento remoto na estimativa de variáveis do ciclo hidrológico como uma alternativa promissora para a realização de estimativas de balanço hídrico, possibilitando entender a dinâmica dessas variáveis em relação ao sistema climático terrestre.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Ao professor Dr. Rodrigo Paiva e ao Engenheiro de Computação Dairan Severo Corrêa pelo apoio nas rotinas de programação.

REFERÊNCIAS

ARMANIOS, D. E.; FISHER, J. B. (2014). Measuring water availability with limited ground data: assessing the feasibility of an entirely remote- sensing- based hydrologic budget of the Rufiji Basin, Tanzania, using TRMM, GRACE, MODIS, SRB, and AIRS. *Hydrological Processes*, v. 28, n. 3, p. 853-867.

ASHOURI, H.; HSU, K. L.; SOROOSHIAN, S.; BRAITHWAITE, D. K.; KNAPP, K. R.; CECIL, L. D.; PRAT, O. P. (2015). PERSIANN-CDR: Daily precipitation climate data record from multisatellite observations for hydrological and climate studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 96, n. 1, p. 69-83.

BECK, H. E.; VAN DIJK, A. I.; LEVIZZANI, V.; SCHELLEKENS, J.; MIRALLES, D. G.; MARTENS, B.; DE ROO, A. (2017). MSWEP: 3-hourly 0.25 global gridded precipitation (1979-2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 21, n. 1, p. 589.

COELHO, V. R.; FAN, F. M. (2016). Manual do programa Manejo de Dados. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS.

COHEN, J. C. P.; BELTRÃO, J. D. C.; GANDU, A. W.; SILVA, R. R. D. (2007). Influência do desmatamento sobre o ciclo hidrológico na Amazônia. *Ciência e Cultura*, v. 59, n. 3, p. 36-39.

HUFFMAN, G. J.; BOLVIN, D. T.; NELKIN, E. J.; WOLFF, D. B.; ADLER, R. F.; GU, G.; STOCKER, E. F. (2007). The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *Journal of Hydrometeorology*, v. 8, n. 1, p. 38-55.

LANDERER, F. W.; SWENSON, S. C. (2012). Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates. *Water Resources Research*, v. 48, n. 4.

LV, M.; MA, Z.; YUAN, X.; LV, M.; LI, M.; ZHENG, Z. (2017). Water budget closure based on GRACE measurements and reconstructed evapotranspiration using GLDAS and water use data for two large densely-populated mid-latitude basins. *Journal of Hydrology*, v. 547, p. 585-599.

MU, Q.; ZHAO, M.; RUNNING, S. W. (2011). Brief introduction to MODIS evapotranspiration data set (MOD16). Disponível em <www.nts.gov/umt.edu> Acesso em 10 de Maio de 2017.

OLIVEIRA, P. T. S.; NEARING, M. A.; MORAN, M. S.; GOODRICH, D. C.; WENDLAND, E.; GUPTA, H. V. (2014). Trends in water balance components across the Brazilian Cerrado. *Water Resources Research*, v. 50, n. 9, p. 7100-7114.

PANDAY, P. K.; COE, M. T.; MACEDO, M. N.; LEFEBVRE, P.; DE ALMEIDA CASTANHO, A. D. (2015). Deforestation offsets water balance changes due to climate variability in the Xingu River in eastern Amazonia. *Journal of Hydrology*, v. 523, p. 822-829.

RUHOFF, A. L.; PAZ, A. R.; ARAGAO, L. E. O. C.; MU, Q.; MALHI, Y.; COLLISCHONN, W.; RUNNING, S. W. (2013). Assessment of the MODIS global evapotranspiration algorithm using eddy covariance measurements and hydrological modelling in the Rio Grande basin. *Hydrological Sciences Journal*, v. 58, n. 8, p. 1658-1676.

SENTELHAS, P. C.; PEREIRA, A. R.; MARIN, R.; ANGELOCCI, L. R.; ALFONSI, R. R.; CARAMORI, P. H.; SWART, S. (1999). Balanço hídrico climatológico no Brasil. [CD ROM]. Esalq/USP–Piracicaba.

SHEFFIELD, J.; FERGUSON, C. R.; TROY, T. J.; WOOD, E. F.; MCCABE, M. F. (2009). Closing the terrestrial water budget from satellite remote sensing. *Geophysical Research Letters*, v. 36, n. 7.

SHUTTLEWORTH, W. J. (2012). *Terrestrial hydrometeorology*. John Wiley, West Sussex, U. K.

WANG, H.; GUAN, H.; GUTIÉRREZ-JURADO, H. A.; SIMMONS, C. T. (2014). Examination of water budget using satellite products over Australia. *Journal of Hydrology*, v. 511, p. 546-554.