

Balanço hídrico no Pantanal: uma abordagem por sensoriamento remoto

Adriana Aparecida Moreira ¹
Alice César Fassoni-Andrade ¹
Anderson Luis Ruhoff ¹
Rodrigo Cauduro Dias de Paiva¹

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS
Caixa Postal 15029
91501-970 - Porto Alegre – RS, Brasil
{moreiradriana00, alice.fassoni, andersonruhoff, rodrigocdpaiva}@gmail.com

Resumo. O Pantanal, localizado na bacia do Alto Paraguai, é a maior área de wetlands do mundo. A manutenção desse ecossistema depende do balanço hídrico uma vez que a precipitação é sazonal e altas perdas de água ocorrem devido as elevadas taxas de evaporação e evapotranspiração. Neste estudo, o balanço hídrico é investigado na bacia do Alto Paraguai utilizando dados de sensoriamento remoto. Para isso, dados dos satélites TRMM (precipitação), GRACE (variação do armazenamento da água), MOD16 e GLEAM (ambos evapotranspiração - ET) foram utilizados, além de dados de vazão da estação fluviométrica Porto Murtinho. Dados mensais de ET MOD16 e GLEAM são comparadas com a estimativa de ET do balanço hídrico, bem como as variáveis são avaliadas espacialmente na bacia considerando três regiões. A precipitação, ET e a variação do armazenamento da água foram estimadas com boa acurácia pelo balanço hídrico, o mesmo não foi possível para a vazão. A ET MOD16 e GLEAM foram capazes de observar a sazonalidade da ET no sistema Pantanal e nas diferentes regiões da bacia. O estudo também demonstrou que há um déficit de água na bacia de março/abril até setembro e um saldo positivo no resto do ano devido a precipitação. A análise espacial da bacia mostrou que no norte a precipitação, evapotranspiração e a variação do armazenamento da água é maior do que na região sul.

Palavras-chave: Evapotranspiração, GRACE, áreas úmidas

Abstract. The Pantanal, located in the Upper Paraguay basin, is the world's largest tropical wetland. The maintenance of this ecosystem depends on the water balance since the precipitation is seasonal and high losses of water occur due to the high rates of evaporation and evapotranspiration. In this study, we investigated the water balance in the Upper Paraguay basin using remote sensing data. For this, satellite data from the TRMM (rainfall), GRACE (water storage change), MOD16 and GLEAM (both evapotranspiration - ET) were used, as well as discharge data from the Porto Murtinho gauge station. Monthly ET MOD16 and GLEAM data are compared with the water balance's estimated ET, as well as the variables were evaluated spatially in the basin considering three regions. The precipitation, ET and the water storage change were estimated with good accuracy by the water balance, the same was not possible for the discharge. The ET MOD16 and GLEAM were able to observe the ET seasonality in the Pantanal system and in the different regions of the basin. The study also showed that there is a water deficit in the basin from March/April to September and a positive water balance in the rest of the year due to precipitation. The basin spatial analysis showed that in the north, the precipitation, evapotranspiration and the water storage variation is higher than in the south.

Keywords: Evapotranspiration, GRACE, wetlands.

1. Introdução

A bacia do Alto Paraguai abrange três países da América do Sul (Bolívia, Paraguai e Brasil) e possui uma das maiores áreas de *wetland* do mundo: o Pantanal (**Figura 1**). Essa região possui o relevo plano e declividade suave, fazendo com que a drenagem seja muito lenta e ocorra a formação de grandes áreas alagadas (Tucci et al., 1999). Hamilton et al. (1996) mostraram as áreas inundadas no Pantanal variam entre 110.00 e 110.000 km² (área total de 137.000 km²). Devido as grandes áreas inundadas e as altas temperaturas ao longo do ano, a evaporação potencial anual é maior que a precipitação anual nessa região (Bordas, 1996; Tucci et al., 1999). A inundação anual no pantanal afeta a hidrodinâmica do rio Paraguai, localizado a jusante (Paz et al., 2010), e influencia na biodiversidade da região (Hamilton, 2002).

As observações de sensoriamento remoto são uma alternativa promissora para obter estimativas espaço-temporais de variáveis hidrológicas, as quais podem ser utilizadas para o cálculo do balanço hídrico de grandes regiões, como o Pantanal. Atualmente existe uma série crescente de missões de sensoriamento remoto que fornecem um conjunto de dados de variáveis do ciclo hidrológico. Além disso, diversas bases de dados usam as observações de satélites combinados com dados observados e reanálise. Por exemplo, o TMPA (*TRMM Multi Satellite Precipitation Analysis*) (Huffman et al., 2007) fornece medidas de precipitação nos trópicos e sub trópicos, combinando estimativas de múltiplos satélites e medições pluviométricas, em resolução temporal 3 horas, diárias e mensais e resolução espacial de 0,25°.

Estimativas globais de evapotranspiração (ET) podem ser obtidas por meio do algoritmo MOD16 (Mu et al., 2007; Mu, Zhao, & Running, 2011), desenvolvido para calcular a ET com base na equação de Penman-Monteith, utilizando produtos de sensoriamento remoto do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) e dados meteorológicos de reanálise. Os dados de ET são gerados em resolução espacial de 500m a 0,05° em escala de tempo de 8 dias, mensal e anual. Por meio das estimativas do GLEAM (*Global Land Surface Evaporation: The Amsterdam Methodology*) (Miralles et al., 2011; Martens et al., 2017), também é possível obter dados de ET. O modelo GLEAM é um conjunto de algoritmos que visa estimar o fluxo evaporativo terrestre diário, em uma escala espacial de 0,25°, baseado na equação de Priestley e Taylor (Priestley and Taylor, 1972), e utilizando, principalmente, de observações de sensoriamento remoto.

Contabilizações do armazenamento de água terrestre globais podem ser obtidas com dados de satélite desde 2002, com o lançamento da missão GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*) (Tapley et al., 2004; Swenson and Wahr, 2006; Landerer and Swenson, 2012). O GRACE tem como objetivo o mapeamento das variações do campo gravitacional terrestre. Há um potencial do uso dos dados GRACE em estudos hidrológicos pois as variações temporais

no campo gravitacional continental são principalmente atribuídas às mudanças no armazenamento terrestre de água (Sheffield *et al.*, 2009; Rodell *et al.*, 2011). Esses dados são disponibilizados por três centros de processamento: (i) o GFZ (GeoForschungsZentrum), em Potsdam na Alemanha, (ii) o CSR (Center of Space Research), da Universidade do Texas, em Austin - EUA e (iii) o JPL (Jet Propulsion Laboratory), da Agência Espacial Americana – NASA.

A partir da disponibilidade de dados de variação do armazenamento de água terrestre pelo GRACE (dSdt), é possível a realização de estudos de balanço hídrico com base em dados de sensoriamento remoto. Diversos estudos avaliaram o potencial do uso de dados de sensoriamento remoto para quantificar o balanço hídrico terrestre (Rodell *et al.*, 2004, 2011; Sheffield *et al.*, 2009; Senay *et al.*, 2011; Oliveira *et al.*, 2014; Penatti *et al.*, 2015; Maeda *et al.*, 2017; Swann and Koven, 2017; Zhang *et al.*, 2018). De uma forma geral, estes estudos sugerem que apesar do fechamento do balanço hídrico ainda ser um desafio, as estimativas obtidas oferecem informações valiosas sobre as variáveis do ciclo hidrológico.

Penatti *et al.* (2015) investigaram o potencial do uso de dados de sensoriamento remoto na quantificação do balanço hídrico mensal no Pantanal. Foram analisados os aspectos espaciais e temporais dos componentes do balanço hídrico e o seu fechamento usando dados de sensoriamento remoto. Os resultados demonstraram que apesar da baixa resolução espacial, as anomalias do GRACE tiveram correspondência com as grandes inundações e secas, além da relação consistente com os componentes do balanço hídrico, precipitação e ET, e com o verdor da vegetação, analisado por meio do EVI (*Enhanced vegetation index*). O fechamento do balanço hídrico foi avaliado por meio da vazão calculada como o resíduo do balanço hídrico ($Q = P - dSdt - ET$) e aquela medida *in situ*, sendo verificado grande superestimativa, atribuída, principalmente às subestimativas de ET MOD16. A avaliação de dados de sensoriamento remoto como alternativa para estimativa de variáveis hidrológicas ainda tem muitos desafios, como a estimativa em áreas com características marcantes, como as áreas de *wetlands*. Neste sentido, este estudo objetivou a avaliação dos componentes do balanço hídrico mensal entre 2003-2014 por meio de abordagem por sensoriamento remoto, na bacia do Alto Paraguai. O estudo avaliou estimativas mensais da ET MOD16 e GLEAM, e apresentou uma comparação de ET e precipitação nas regiões do Chaco, Pantanal e Planalto da bacia.

2. Metodologia

A bacia do Alto Paraguai possui três regiões distintas, a região do Chaco, localizada a oeste, caracterizada por baixa precipitação anual, e as regiões do Planalto e Pantanal (**Figura 1**). O Planalto possui terras altas (acima de 200 m) com chuva anual de 1400 mm e rápida drenagem para a região do Pantanal (Tucci *et al.*, 1999). Já o Pantanal, localizado no centro da bacia possui drenagem muito lenta devido à baixa declividade, o que contribui para a formação de grandes áreas de inundação. A região possui uma estação chuvosa marcada com valores máximos de novembro a março e distribuição espacial com maiores valores ao norte do que no sul. A inundação sazonal no Pantanal se deve ao transbordamento da calha do rio e em algumas áreas devido à chuva local. Segundo Hamilton *et al.* (1996), o pulso de inundação possui um atraso de 2 a 6 meses após o pico da chuva (janeiro) dependendo da região (2 meses no norte e 4 a 6 meses no sul). No entanto, considerando toda a área do Pantanal, o pico de inundação (maior área alagada) ocorre em março e abril, 2 e 3 meses após o pico da chuva em janeiro. Em períodos secos, a água armazenada na planície é reduzida por perdas de infiltração e, principalmente, evaporação devido as altas temperaturas ao longo do ano (Tucci *et al.*, 1999). Segundo Ponce (1996) o coeficiente de escoamento da bacia varia de 7 a 14%, de forma que, em um ano médio, o escoamento na saída da bacia equivale a essa percentagem da precipitação.

Para a estimativa do balanço hídrico mensal na bacia do Alto Paraguai (Equação 1), foram utilizados dados de precipitação (P), evapotranspiração (ET) e da variação do armazenamento de água no solo ($\frac{dS}{dt}$) provenientes de satélites. Utilizou-se dados de vazão (Q) da estação fluviométrica de Porto Murtinho operada pela Agência Nacional de Águas (ANA) (Código: 67100000 e área de 576.000 km²).

$$\frac{dS}{dt} = P - ET - Q \quad (1)$$

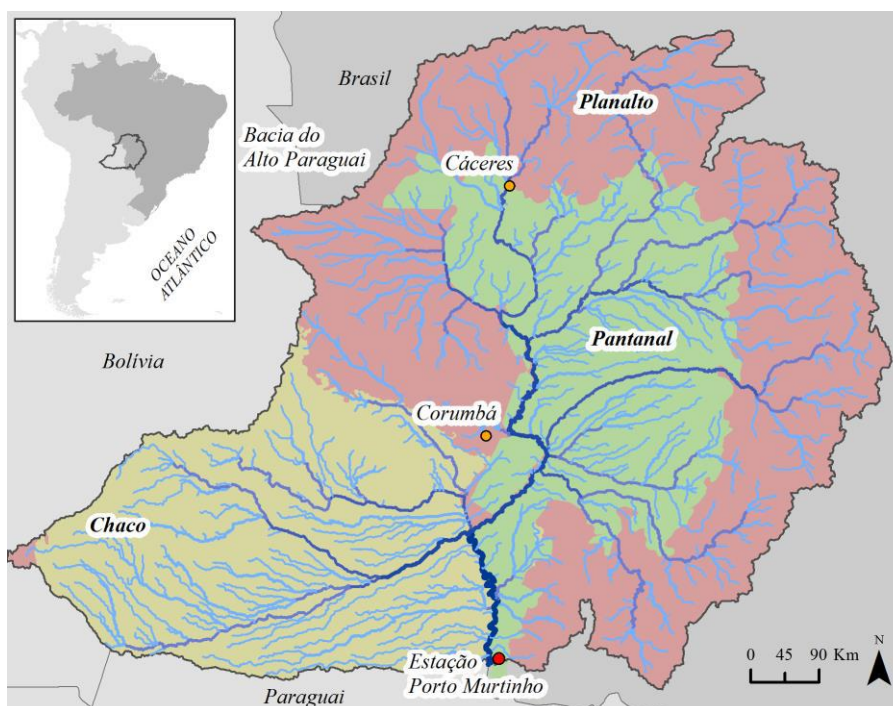


Figura 1. Localização da bacia do Alto Paraguai e do pantanal com a estação fluviométrica em Porto Murtinho (ANA) e as estações meteorológicas em Cáceres e Corumbá (INMET).

Para os dados de variação do armazenamento de água terrestre do GRACE, foi utilizada a média simples das três soluções GRACE (GFZ, CSR e JPL), assim como em (Sakumura, Bettadpur and Bruinsma, 2014). Foram utilizados dados mensais de precipitação do produto 3B43 do satélite TRMM versão 7 (disponível em <pmm.nasa.gov>), estimativas globais de ET MOD16, versão 5, de escala mensal e resolução espacial de 0,05° (disponível em <www.nts.gov>) e ET GLEAM, em escala diária, resolução espacial de 0,25, versão 3.2b (disponível em <www.gleam.eu>). Todos os dados utilizados foram convertidos, quando necessário, para mm.mês⁻¹, considerando o período de estudo de janeiro de 2003 a dezembro de 2014.

Foram calculadas as métricas: Coeficiente de correlação (r), coeficiente de determinação (R²), erro média absoluto (EMA) e erro médio quadrático (RMSE) para avaliar a precisão do balanço hídrico calculado com base em dados de sensoriamento.

3. Resultados

A **Figura 2** apresenta cada variável ao longo do tempo estimada pelo balanço hídrico e pelos dados de sensoriamento remoto e dados de vazão medidos. Os resultados são mostrados em relação a ET MOD16 e do GLEAM. Observa-se que todas as variáveis, exceto a vazão,

apresentaram boa concordância, com coeficiente de correlação (r) variando entre 0,75 a 0,90 (**Tabela 1**). Já para a vazão não foi observada correlação entre Q medido e obtido pelo balanço hídrico quando foi utilizada dados ET MOD16 ($r = 0,02$), no entanto, uma correlação de 0,21 foi verificada quando dados de ET GLEAM foram utilizados. Assim como relatado em Penatti *et al.* (2015) para a bacia do Paraguai e em outras bacias avaliadas na América do Norte (Sheffield *et al.*, 2009; Gao *et al.*, 2010) e no Cerrado brasileiro (Oliveira *et al.*, 2014), também foram encontradas vazões superestimadas quando obtidas por meio do balanço hídrico, demonstrando que ainda existe um desafio no fechamento do balanço hídrico pela abordagem de sensoriamento remoto.

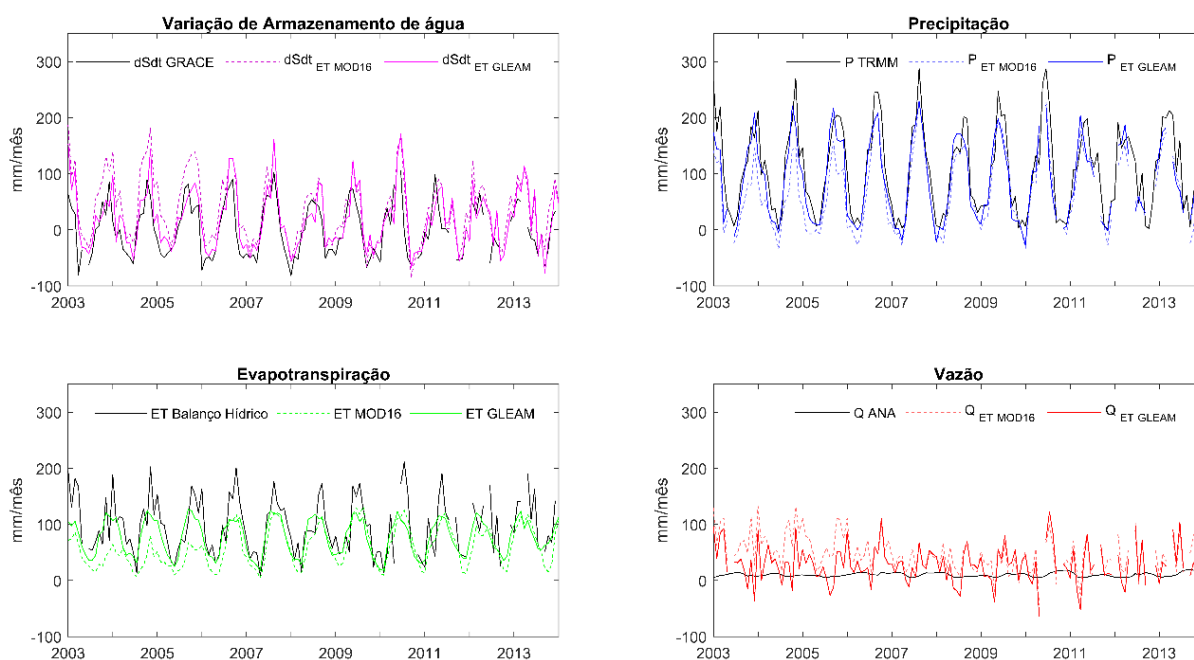


Figura 2. Dados observados e estimados pelo balanço hídrico considerando a ET pelo MOD16 e GLEAM.

Em relação as métricas analisadas (**Tabela 1**), foi verificado para a ET MOD16 e GLEAM uma similaridade nos resultados, com exceção do EMA onde a ET MOD16 apresentou +38,18 e a ET GLEAM 18,88 mm.mês^{-1} . Nota-se que a ET MOD16 apresentou valores em torno de 41 mm.mês^{-1} no período de 2003 a 2006, que são inferiores aqueles verificados pela ET GLEAM ($\sim 77 \text{ mm.mês}^{-1}$) e pela ET balanço hídrico ($\sim 98 \text{ mm.mês}^{-1}$, **Figura 2**). Considerando dados de ET observados no Pantanal, Oliveira *et al.* (2006) estudaram as variações sazonais dos fluxos turbulentos de energia no Pantanal Sul Mato-Grossense entre 2000 a 2002 e observaram totais diários de LE (fluxo de calor latente) superando 150 W.m^{-2} no período chuvoso e $\sim 50 \text{ W.m}^{-2}$ no período seco (ET $\sim 5,28 \text{ mm.dia}^{-1}$ na estação chuvosa e $1,76 \text{ mm.dia}^{-1}$ na estação seca). Sanches *et al.* (2011), que avaliaram o padrão sazonal de ET no nordeste do Pantanal, verificaram valores médios de ET em torno de 4 mm.dia^{-1} durante a estação chuvosa e $2,5 \text{ mm.dia}^{-1}$ durante a estação seca, com total anual, para 2007-2008, de 1208 mm. Os dados observados que foram relatados na literatura indicam que as estimativas de ET MOD16, entre 2003-2006 apresentaram valores atípicos para essa região.

Dessa forma, assim como em Penatti *et al.* (2015), que também observaram que a ET MOD16 apresentou valores inferiores àqueles esperados para o sistema Pantanal, neste estudo

foram desconsideradas as estimativas de ET MOD16 para o período de 2003-2006. Observa-se na **Tabela 2** que as métricas considerando o período de 2007 a 2014 melhoraram para as variáveis estimadas pelo balanço hídrico considerando ET MOD16 e praticamente se mantiveram utilizando a ET GLEAM. Resultados significativos foram observados para ambas abordagens de balanço hídrico, apresentando coeficientes de correlação e RMSE próximos, mas ligeiramente melhores quando se utilizou a ET MOD16 no cálculo do balanço hídrico, com exceção para a variável vazão que apresentou coeficiente de correlação de 0,28 na abordagem utilizando ET GLEAM.

Tabela 1. Métricas para cada variável do balanço hídrico (2003-2014, número de dados, n=133)

Balanço Hídrico com ET MOD16					Balanço Hídrico com ET GLEAM				
	r	R ²	EMA (mm/mês)	RMSE (mm/mês)		r	R ²	EMA (mm/mês)	RMSE (mm/mês)
P	0,90	0,81	-38,18	28,44	P	0,90	0,81	-18,88	30,17
ET	0,75	0,56	38,18	32,79	ET	0,75	0,57	18,88	32,40
Q	0,02	~ 0		32,76	Q	0,21	0,04		32,71
dS/dt	0,83	0,69		32,81	dS/dt	0,78	0,61		32,35

Tabela 2. Métricas para cada variável do balanço hídrico (2007-2014, n=86)

Balanço Hídrico com ET MOD16					Balanço Hídrico com ET GLEAM				
	r	R ²	EMA (mm/mês)	RMSE (mm/mês)		r	R ²	EMA (mm/mês)	RMSE (mm/mês)
P	0,93	0,87	-27,80	24,76	P	0,90	0,80	-18,07	30,34
ET	0,84	0,70	27,80	27,23	ET	0,75	0,56	-18,07	32,88
Q	0,21	0,04		27,70	Q	0,28	0,08		32,89
dS/dt	0,85	0,73		27,77	dS/dt	0,78	0,60		32,91

A **Figura 3** apresenta a variação sazonal de ET na bacia para o período de 2007 a 2014. Assim como em outros estudos que analisaram a ET medida por torres de fluxo (Oliveira *et al.*, 2006; Sanches *et al.*, 2011; Machado *et al.*, 2016) e por sensoriamento remoto (Penatti *et al.*, 2015), foi verificado que os modelos de ET (MOD16 e GLEAM) são capazes de observar a sazonalidade da ET no sistema pantanal. Foi observado maiores taxas durante os meses mais chuvosos (~100 mm.mês⁻¹ ET GLEAM e ~ 89mm.mês⁻¹ ET MOD16) - entre outubro a abril - e menores taxas durante a estação seca (~43 mm.mês⁻¹ ET GLEAM e ~ 36 mm.mês⁻¹ ET MOD16) – maio a setembro. Os valores médios anuais observados, considerando o ano hidrológico de setembro a agosto, foram maiores para o GLEAM do que o MOD16 (926 vs 813 mm.ano⁻¹), ambas subestimadas em relação a ET do balanço hídrico, com estimativa de 1.146 mm.ano⁻¹. A ET real obtida por dados de estações do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) em Cáceres e Corumbá (**Figura 1**) para o período de setembro de 2006 a agosto de 2013 foram 995,80 mm.ano⁻¹ e 992,85 mm.ano⁻¹, respectivamente. Apesar de serem medidas pontuais no norte e no centro do pantanal, esses valores mostram que as estimativas por sensoriamento remoto refletem a ET da bacia.

A ET GLEAM, MOD16 (linhas verdes) e do balanço hídrico (linha preta) apresentaram valores bem próximos entre setembro a dezembro (**Figura 3c**). A ET MOD16 apresentou valores inferiores aqueles estimados pelo balanço hídrico em todos os meses. De janeiro a junho, a ET do balanço hídrico apresentou valores muito maiores que aqueles mostrados pelos modelos de ET. O período entre janeiro e maio são os meses com maiores áreas alagadas no pantanal, com um máximo em março e abril (Hamilton *et al.*, 1996). Não foi encontrado estudos que avaliaram a acurácia dos algoritmos ET MOD16 e GLEAM em áreas de *wetlands*, mas a subestimativa no período úmido pode estar relacionada a limitação desses modelos.

A precipitação média anual na bacia foi $1.277 \text{ mm.ano}^{-1}$ (ano hidrológico), tendo boa concordância com os valores apresentados por Ponce (1995): $1.180 \text{ mm.ano}^{-1}$ e $1.380 \text{ mm.ano}^{-1}$. Esses valores também estão próximos dos valores obtidos em Cárcere e Corumbá (INMET): $1.254 \text{ mm.ano}^{-1}$ e $1.072 \text{ mm.ano}^{-1}$, respectivamente. Hamilton et. al (1998) observaram que a precipitação mensal excede ET potencial de novembro a março (média dos meses entre 1977 a 1981; Método de Thornthwaite) em uma sub-região do pantanal (rio Taquari). O mesmo comportamento foi observado para a ET e a precipitação em Cárcere e Corumbá (setembro/2006 a agosto/2014, INMET). Na **Figura 3c**, observa-se que a ET é inferior a precipitação (linha azul) de setembro a maio para as estimativas de ET MOD16 e GLEAM (linhas verdes). Essas diferenças em relação ao estudo de Hamilton podem estar relacionadas as diferenças dos períodos analisados (1977-1981 e 2007-2014) ou também à subestimativa de ET. Por outro lado, os autores também mostram que há um déficit de água na região a partir de março que está relacionada a perda de água por evaporação e evapotranspiração nos lagos da planície de inundação. De fato, foi observado que a variação do armazenamento da água baseado nas soluções GRACE (dS/dt) e calculada pela equação de balanço hídrico é negativa a partir de março/abril (**Figura 3ab**). Com início das chuvas em setembro, o armazenamento se torna positivo a partir de outubro.

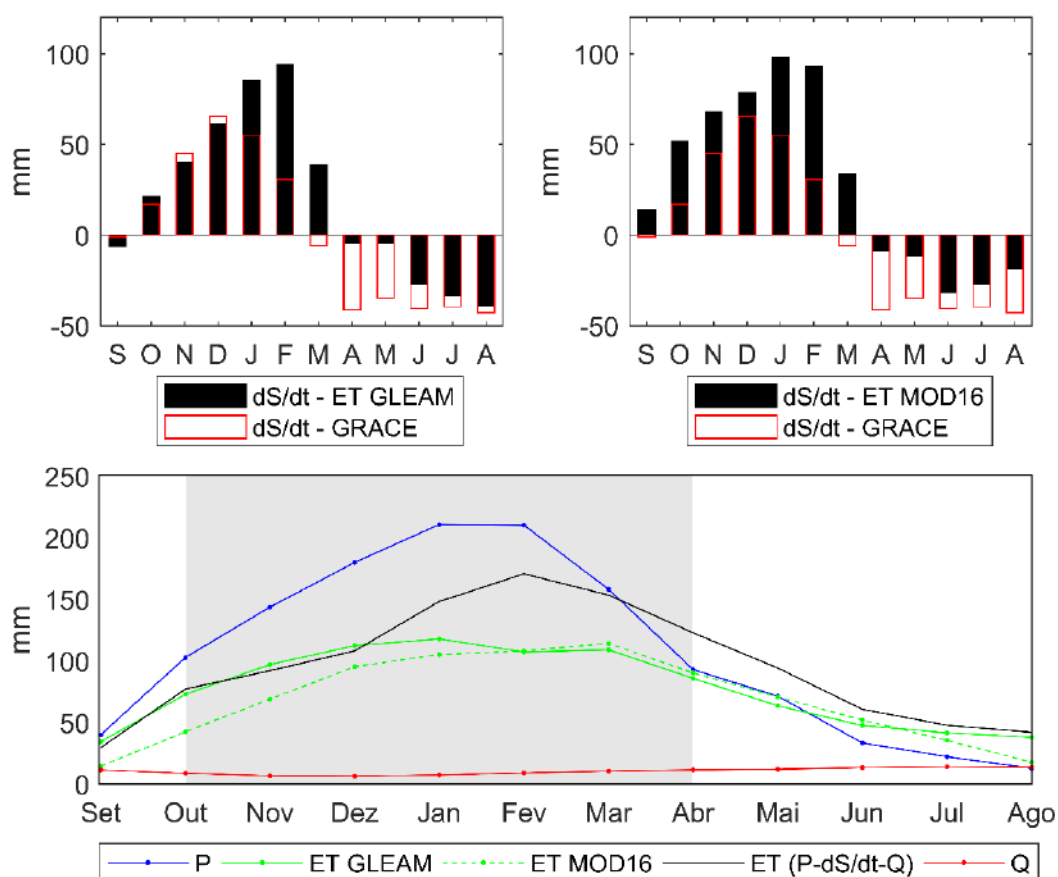


Figura 3. Variação anual do armazenamento da água calculada ($P-ET-Q$) e baseada nas soluções GRACE (dS/dt) para a bacia do Alto Paraguai a) utilizando ET GLEAM e b) utilizando ET MOD16. c) Variação sazonal da precipitação, ET (GLEAM, MOD16 e do balanço hídrico) e vazão. A área em cinza indica o período chuvoso.

A **Figura 4** mostra as variáveis do balanço hídrico em cada região da bacia do Alto Paraguai. Maior similaridade é observada entre o Pantanal e o Planalto, de forma que os valores

mensais das variáveis são menores na região do Chaco. A variação espacial das variáveis em cada região concorda com outros autores que mostraram maior precipitação ao norte e menor ao sul da bacia (Tucci et al, 1999; Hamilton et. al, 1998), com menor taxa anual de precipitação observada para a região do Chaco (964 mm), o que se é esperado para esta região, caracterizada por baixos índices pluviométricos e sistema de drenagem endorréico (Paz *et al.*, 2014; Penatti *et al.*, 2015). Para a ET foram observadas maiores taxas nas regiões do Planalto e Pantanal, o que pode estar relacionado aos maiores índices pluviométricos e também ao fato da área alagada que se forma no Pantanal em alguns meses no ano. Em relação à variação do armazenamento de água baseado nas soluções GRACE, nota-se comportamento similar entre as regiões do Pantanal e Planalto, com armazenamento positivo entre setembro a fevereiro (valores máximos de 78 e 80 mm). Devido às diferenças hidrológicas e geomorfológicas, a região do Chaco apresenta a menor variação de armazenamento de água (máximo de 31 mm e mínimo de -28 mm) em relação as outras regiões.

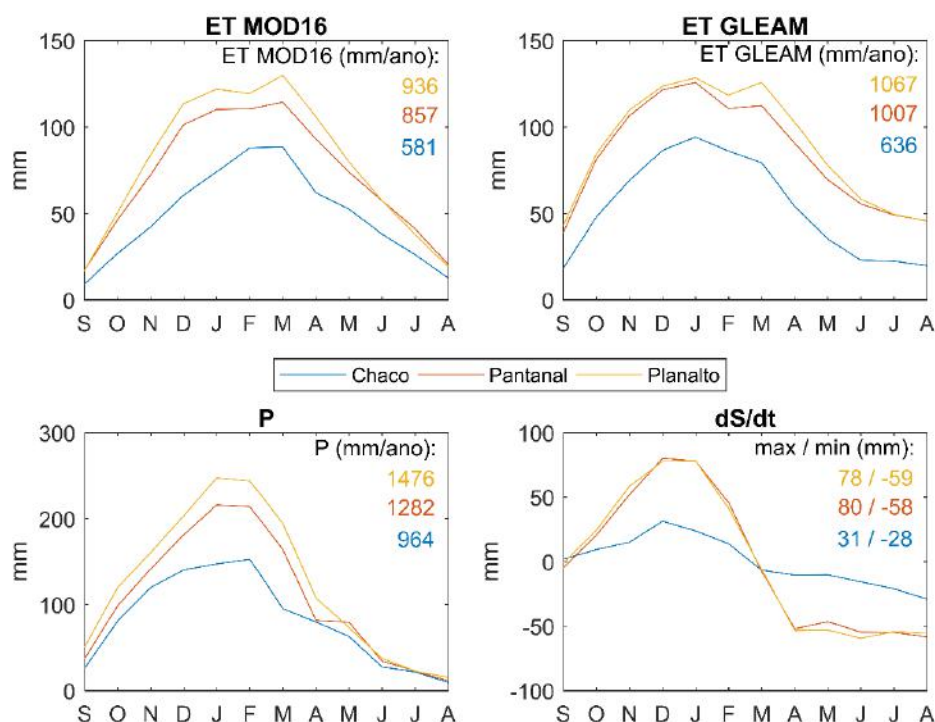


Figura 4. ET (MOD16 e GLEAM), precipitação e variação do armazenamento da água (dS/dt - GRACE) nas regiões do Chaco, pantanal e planalto na bacia do Alto Paraguai.

4. Conclusões

Este estudo visou analisar o balanço hídrico mensal por uma abordagem de sensoriamento remoto na bacia do Alto Paraguai entre 2003-2014. Todas as variáveis do balanço hídrico foram obtidas por meio do balanço hídrico e analisadas com os dados de sensoriamento remoto (precipitação, ET e dSdt) e medidos (Q). Foi observado que a ET MOD16 apresenta valores atípicos de 2003 a 2006 para a bacia do Alto Paraguai, de forma que investigações futuras precisam ser realizadas para compreender o motivo desse padrão. Os resultados para o período de 2007-2014 indicaram que a precipitação, a ET e a variação do armazenamento da água foram estimadas com boa acurácia (coeficientes de correlação, $r > 0,84$ - ET MOD16 e $r > 0,75$ - ET GLEAM), no entanto, as métricas indicam baixa correlação para a vazão ($r = 0,24$ - ET MOD16 e $r = 0,21$ - ET GLEAM). A comparação da ET MOD16 e a ET GLEAM na obtenção das

variáveis do balanço hídrico mostrou que todas as métricas (r , R^2 e RMSE), com exceção do EMA, apresentaram desempenho melhor para a ET MOD16 do que a ET GLEAM.

A comparação mensal das duas estimativas de ET também demonstrou que essas são capazes de observar a sazonalidade no sistema pantanal, com maiores taxas entre outubro e abril (período úmido) e menores entre maio e setembro (período seco). Ambos os modelos apresentaram subestimativas comparado com a ET do balanço hídrico, principalmente no período de máxima área alagada no pantanal (janeiro a maio). Estudos futuros são recomendados para verificar se existem limitações dos algoritmos MOD16 e GLEAM na estimativa de ET em áreas de *wetlands*. Em relação a variação do armazenamento de água, foi verificado que há um déficit de água na bacia a partir de março/abril relacionada a perda de água por evaporação e evapotranspiração, de forma que com início das chuvas em setembro, o armazenamento se torna positivo em outubro. Por último, foi mostrado as variáveis do balanço hídrico na região do Chaco, Pantanal e Planalto.

Os resultados encontrados indicam potencial dos dados de sensoriamento remoto em capturar o comportamento de fluxos de água (ET, precipitação e variação do armazenamento), nas diferentes regiões da bacia do Alto Paraguai. Apesar da resolução espacial grosseira do GRACE, foi possível verificar a dinâmica da variação do armazenamento de água nestas regiões.

5. Referências

- Bordas MP. 1996. The pantanal: an ecosystem in need of protection. **International journal of sediment research** 11(3): 34–39.
- Gao, H. *et al.* (2010) 'Estimating the water budget of major US river basins via remote sensing', **International Journal of Remote Sensing**, 31(14), pp. 3955–3978. doi: 10.1080/01431161.2010.483488.
- Hamilton, S. K., de Souza, O. C., & Coutinho, M. E. (1998). Dynamics of floodplain inundation in the alluvial fan of the Taquari River (Pantanal, Brazil). **Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen**, 26(3), 916-922.
- Hamilton SK, Sippel SJ, Melack JM. 1996. **Inundation patterns in the pantanal wetland of south America determined from passive microwave remote sensing**. *Archive für hydrobiologie* 137(1): 1–23.
- Hamilton SK. 2002. Hydrological controls of ecological structure and function in the pantanal wetland (Brazil). **IAHS special publication** 6, 133–158.
- Huffman, G. J. *et al.* (2007) 'The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales', **Journal of Hydrometeorology**, 8(1), pp. 38–55. doi: 10.1175/JHM560.1.
- Landerer, F. W. and Swenson, S. C. (2012) 'Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates', **Water Resources Research**, 48(4), pp. 1–11. doi: 10.1029/2011WR011453.
- Machado, N. G. *et al.* (2016) 'Sazonalidade do balanço de energia e evapotranspiração em área arbustiva alagável no pantanal mato-grossense', **Revista Brasileira de Meteorologia**, 31(1), pp. 82–91. doi: 10.1590/0102-778620140164.
- Maeda, E. *et al.* (2017) 'Evapotranspiration seasonality across the Amazon Basin Evapotranspiration seasonality across the Amazon Basin', **Earth System Dynamics**, (July), pp. 439–454. doi: 10.5194/esd-8-439-201710.5194/esd-8-439-2017-supplement.
- Martens, B. *et al.* (2017) 'GLEAM v3: Satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture', **Geoscientific Model Development**, 10(5), pp. 1903–1925. doi: 10.5194/gmd-10-1903-2017.
- Miralles, D. G. *et al.* (2011) 'Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations', **Hydrology and Earth System Sciences**, 15(2), pp. 453–469. doi: 10.5194/hess-15-453-2011.
- Mu, Q., Zhao, M. and Running, S. W. (2011) 'Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm', **Remote Sensing of Environment**. Elsevier Inc., 115(8), pp. 1781–1800. doi: 10.1016/j.rse.2011.02.019.

- Oliveira, M. B. *et al.* (2006) 'Fluxos Turbulentos de energia sobre o Pantanal Sul Mato-Grossense', **Revista Brasileira de Meteorologia**, 21(3b), pp. 371-377
- Oliveira, P. T. S. *et al.* (2014) 'Trends in water balance components across the Brazilian Cerrado', **Water Resources Research**, pp. 7100–7114. doi: 10.1002/2013WR015202
- Paz, A. R. *et al.* (2014) 'The influence of vertical water balance on modelling Pantanal (Brazil) spatio-temporal inundation dynamics', **Hydrological Processes**, 28(10), pp. 3539–3553. doi: 10.1002/hyp.9897.
- Paz A.R., Bravo J.M., Allasia D, Collischonn W., Tucci C.E.M. 2010. Largescale hydrodynamic modelling of a complex river network and floodplains. **Journal of hydrologic engineering** 15(2): 152–165. doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000162.
- Penatti, N. C. *et al.* (2015) 'Satellite-based hydrological dynamics of the world's largest continuous wetland', **Remote Sensing of Environment**. Elsevier Inc., 170, pp. 1–13. doi: 10.1016/j.rse.2015.08.031.
- Ponce, V. M. (1995). Hydrologic and environmental impact of the Paraná–Paraguay waterway on the Pantanal of Mato Grosso. Brazil A Reference Study: San Diego State University, San Diego (Section 3). Disponível em http://ponce.sdsu.edu/report_section3.html.
- Priestley, C. H. B. and Taylor, R. J. (1972) 'On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters', **Monthly Weather Review**. doi: 10.1175/1520-0493.
- Rodell, M. *et al.* (2004) 'Basin scale estimates of evapotranspiration using GRACE and other observations', **Geophysical Research Letters**, 31(20), pp. 10–13. doi: 10.1029/2004GL020873.
- Rodell, M. *et al.* (2011) 'Estimating evapotranspiration using an observation based terrestrial water budget', **Hydrological Processes**, 25(26), pp. 4082–4092. doi: 10.1002/hyp.8369.
- Sakumura, C., Bettadpur, S. and Bruinsma, S. (2014) 'Ensemble prediction and intercomparison analysis of GRACE time-variable gravity field models', **Geophysical Research Letters**, 41(5), pp. 1389–1397. doi: 10.1002/2013GL058632.
- Sanches, L. *et al.* (2011) 'Seasonal patterns of evapotranspiration for a *vochysia divergens* forest in the brazilian pantanal', **Wetlands**, 31(6), pp. 1215–1225. doi: 10.1007/s13157-011-0233-0.
- Senay, G. B. *et al.* (2011) 'Estimating basin scale evapotranspiration (ET) by water balance and remote sensing methods', **Hydrological Processes**, 25(26), pp. 4037–4049. doi: 10.1002/hyp.8379.
- Sheffield, J. *et al.* (2009) 'Closing the terrestrial water budget from satellite remote sensing', **Geophysical Research Letters**, 36(7), pp. 1–5. doi: 10.1029/2009GL037338.
- Swann, A. L. S. and Koven, C. D. (2017) 'A Direct Estimate of the Seasonal Cycle of Evapotranspiration over the Amazon Basin', **Journal of Hydrometeorology**, 18(8), pp. 2173–2185. doi: 10.1175/JHM-D-17-0004.1.
- Swenson, S. and Wahr, J. (2006) 'Post-processing removal of correlated errors in GRACE data', **Geophysical Research Letters**, 33(8), pp. 1–4. doi: 10.1029/2005GL025285.
- Tapley, B. D. *et al.* (2004) 'The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results', **Geophysical Research Letters**, 31(9), pp. 1–4. doi: 10.1029/2004GL019920.
- Tucci CEM, Genz F, Clarke RT. 1999. Hydrology of the upper Paraguay basin. In **Management of Latin American River Basins: Amazon, Plata and São Francisco**, Biswas K, Cordeiro N, Braga B, Tortajada C (eds). United Nations University Press: Tokyo.
- Zhang, Y. *et al.* (2018) 'A Climate Data Record (CDR) for the global terrestrial water budget: 1984-2010', **Hydrology and Earth System Sciences**, 22(1), pp. 241–263. doi: 10.5194/hess-22-241-2018.