

## EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM BACIAS HIDROGRÁFICAS NO BRASIL - PADRÕES E FATORES LIMITANTES

Adriana Aparecida Moreira<sup>1</sup>, Anderson Luis Ruhoff<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS)  
adriana.moreira@ufrgs.br, anderson.ruhoff@ufrgs.br

### RESUMO

Este estudo buscou analisar os padrões e fatores limitantes do MOD16 e GLEAM ET em oito bacias hidrográficas brasileiras. Os resultados indicaram que em bacias com característicos períodos secos e chuvosos a ET apresenta o mesmo comportamento sazonal, seguindo a ocorrência da precipitação, além disso foi verificada que existe limitação de disponibilidade de água durante o período seco. Na Amazônia, MOD16 e GLEAM ET apresentaram divergências nos meses menos chuvosos, mas ambos modelos indicaram limitação por energia na maior parte do ano. Nas bacias ao sul do Brasil, a ET apresentou a tendência de seguir a variação da radiação, e nos meses de outono/inverno os resultados indicaram limitação por energia. Os modelos analisados apresentaram de forma geral resultados similares, no entanto, divergências entre eles foram observadas, demonstrando que ainda não há um acordo da representação dos padrões e fatores limitantes de ET pelos modelos estudados.

**Palavras-chave** — Budyko, Evapotranspiração, MOD16, GLEAM.

### ABSTRACT

*This study evaluated patterns and limiting factors of MOD16 and GLEAM ET in eight Brazilian basins. The results indicate that, generally, in basins with dry and wet seasons presented similar ET seasonal behavior, following the precipitation rates, in addition, it was verified limitation of water availability in dry seasons. In Amazon, MOD16 and GLEAM ET presented opposite behavior during dry months, however, both ET models indicated limitation by energy in most of part year. In South basins, the ET showed trend to follow the radiation behavior, in addition, in autumn/winter months the results indicated limitation by energy. The models presented, generally, similar results, however, divergences between them were observed, indicating that there is still no agreement on ET patterns and limiting factors by ET models evaluated.*

**Key words** — Budyko, Evapotranspiration, MOD16, GLEAM.

### 1. INTRODUÇÃO

Os padrões de Evapotranspiração (ET) e o entendimento dos padrões e condições limitantes ainda não são claramente conhecidos. Muitos esforços têm sido feitos com o intuito de entender a variabilidade, magnitude e padrões das forçantes climáticas e hidrológicas sobre a ET em múltiplas escalas. Estes esforços visam proporcionar melhor entendimento sobre uma variável chave dos ciclos hidrológico e do carbono, de grande importância para nos processos de mudanças climáticas, produtividade primária líquida e extremos climáticos.

Aliada a disponibilidade de dados de ET e uma gama de dados hidrológicos e climáticos baseados em sensoriamento remoto torna possível análises que visem o entendimento de como a ET se relaciona com essas variáveis.

Uma das formas de se realizar estes estudos é por meio da abordagem de Budyko, onde o equilíbrio hídrico anual pode ser expresso em função da disponibilidade de água e energia [1]–[3]. Nessa abordagem foi demonstrado que a razão entre a ET e precipitação média anual é principalmente controlada pela razão entre a ET potencial e a precipitação [2], propiciando análises do grau de limitação de energia e de água em bacias hidrográficas.

Neste sentido, este estudo buscou empregar a abordagem de Budyko para verificar as influências nos padrões de ET, além de analisar a relação com dados de precipitação, radiação e temperatura em oito regiões hidrográficas no Brasil.

### 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foi analisado os padrões de ET dos modelos MOD16 e GLEAM e as ligações hidrológicas e climáticas, utilizando a abordagem de Budyko [1]–[3], em oito de bacias hidrográficas, para o período de 2003 a 2014 (Figura 1).

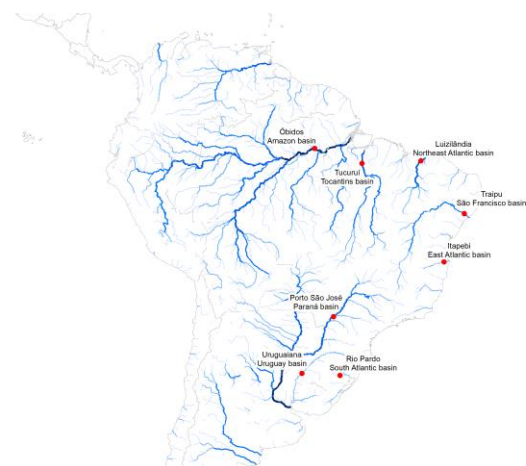
A curva de Budyko descreve o balanço hídrico pelo índice evaporativo e do índice de aridez, e proporciona investigações da influência das mudanças climáticas sobre o escoamento e evapotranspiração em termos médios anuais. Nesta análise a abordagem de Budyko foi modificada para níveis interanuais, considerando a precipitação efetiva (P-dS), utilizando dados de variação do armazenamento terrestre de água [4].

Os dados de variação do armazenamento terrestre de água foram obtidos por meio do *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE), utilizando a média mensal das três

soluções, GFZ (*GeoForschungsZentrum*), CSR (*Center of Space Research, University of Texas*) e JPL (*NASA Jet Propulsion Laboratory*). Considerando que os dados do GRACE são disponibilizados em intervalos mensais de anomalias de armazenamento terrestre de água, irregularmente espaçados,  $dS$  foi calculado como a diferença entre dois pontos GRACE, representando a variação média no armazenamento de água terrestre [5] (Equação 1):

$$\frac{dS}{dt} \approx \frac{TWS}{dt} \approx \frac{TWS_{t+1} - TWS_t}{\Delta t} \quad (1)$$

onde TWS é a variação de armazenamento terrestre de água no tempo  $t$ .



**Figura 1. Localização das estações fluviométricas (Agência Nacional de Águas – ANA) utilizadas na delimitação das bacias hidrográficas.**

Nesta análise foram utilizados dados de ET e potencial ET (PET) do *Global Land Evaporation Amsterdam Model* (GLEAM) [6] e *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MOD16) [7].

O modelo GLEAM que tem como finalidade a estimativa global de ET com base na equação de Priestley e Taylor, utilizando o máximo de observações derivadas de sensoriamento remoto [6]. Os dados GLEAM utilizados neste estudo estão em uma resolução espacial de  $0.25^\circ$ , em escala mensal e versão 3.2. Já o MOD16 [7] tem por objetivo a estimativa da ET por meio da utilização integrada de dados meteorológicos de reanálise e dados de sensoriamento remoto, com base na equação de Penman-Monteith. Os dados são gerados em uma grade regular de  $500 \times 500 \text{ m}^2$ , em escala global, em intervalos de 8 dias, mensal e anual.

Também foi verificada a influência da precipitação, temperatura e radiação nos padrões de ET.

Os dados de precipitação são provenientes do *Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation* (MSWEP) que combina vários conjuntos de dados de precipitação de alta qualidade (*in situ*, satélite, reanálise), com resolução espacial de  $0.1^\circ$ , versão 2.1 e em escala mensal [8]. Dados de fluxos de ondas curtas incidentes na superfície, para todas as

condições de céu foram obtidos por meio do *Clouds and the Earth's Radiant Energy System* (CERES), produto SYN1deg, versão 4A, resolução espacial de  $1^\circ$ . E por fim, foram utilizados dados de temperatura obtidos por meio dos produtos MOD11C3, resolução espacial de  $0.05^\circ$  e versão 6.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta os padrões sazonais de ET (MOD16 e GLEAM) e de radiação, precipitação e temperatura nas bacias analisadas (Amazônia, Tocantins, Atlântico Nordeste, São Francisco, Atlântico Leste, Paraná Uruguai e Atlântico Sul).

Os dois modelos apresentam para a bacia amazônica (estação de Óbidos, área de  $4.670.000 \text{ km}^2$ ) valores em torno de 1412 e 1302 mm/ano para ET GLEAM e MOD16, respectivamente.

Os modelos de ET apresentam uma fraca sazonalidade e comportamento oposto durante os meses menos chuvosos. O MOD16 apresentou menores taxas durante o período de menor precipitação, confirmando os achados em estudos baseados em *Eddy covariance* (EC) em áreas de floresta tropical, na bacia Amazônica [9], que relacionam a diminuição da taxa de ET durante esse período com a maior disponibilidade de radiação, associada a capacidade da vegetação de extrair água do solo, devido ao extenso sistema radicular da vegetação florestal. Já em relação ao GLEAM que apresentou comportamento oposto, em estudo anterior [10] foi analisada a dinâmica temporal da perda de interceptação de modelos ET na bacia Amazônica e observado que a ET GLEAM tende a acompanhar a ocorrência de chuvas, como foi verificado neste estudo, na estação de Óbidos.

Para as estações das bacias do Tocantins, São Francisco, Paraná, Atlântico Nordeste e Leste, os modelos de ET apresentaram comportamento sazonal bem definido. Nas bacias do Tocantins e Atlântico Nordeste verifica-se durante o período seco, menores taxas de ET e maiores valores de radiação e temperatura. Enquanto que nas bacias do São Francisco, Paraná e Atlântico Leste, menores temperaturas, valores de radiação e precipitação estão associadas a menores taxas de ET. O comportamento sazonal da ET nas bacias localizadas predominantemente no Cerrado corrobora com resultados de EC [9] demonstrando um comportamento sazonal, com maiores valores de ET na estação chuvosa e menores na estação seca - quando a fotossíntese declina devido à forte sazonalidade do índice de área foliar – onde os padrões ET são provavelmente controlados pela disponibilidade de umidade do solo.

As bacias localizadas mais ao sul do Brasil apresentam predominantemente clima subtropical úmido e precipitação bem distribuída ao longo do ano, sem períodos secos e chuvosos bem definidos. Nestas bacias a ET, tanto do GLEAM quanto do MOD16 acompanha o ciclo sazonal da temperatura e radiação, com menores valores nos meses de inverno e maiores nos meses de verão.

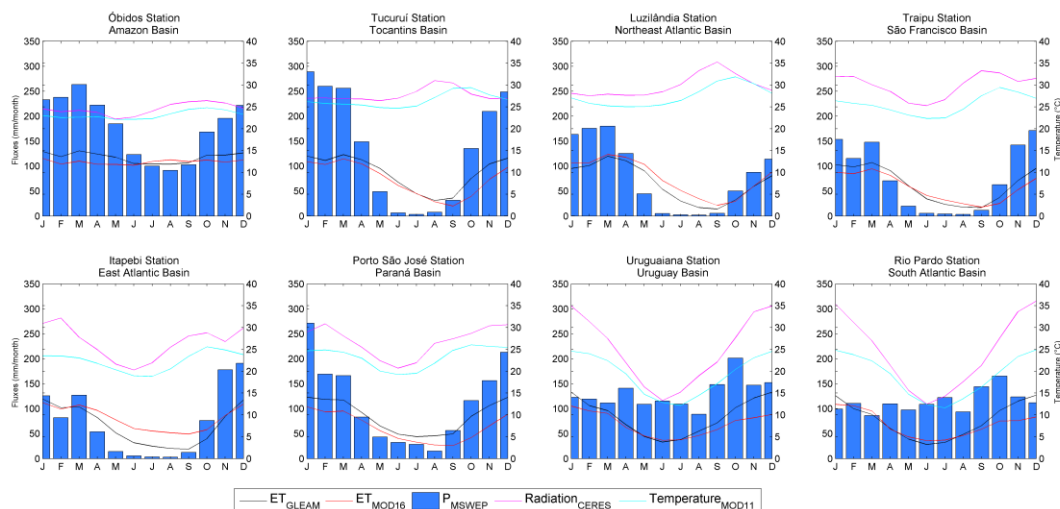


Figura 2. Variação Sazonal de ET (MOD16 e GLEAM), precipitação, radiação e temperatura em diferentes bacias hidrográficas brasileiras.

A Figura 3 apresenta os resultados do emprego da análise de Budyko em termos interanuais, para períodos secos e chuvosos nas bacias que apresentam período com taxas de precipitação <100 mm/mês e em primavera/verão e

outono/inverno, onde não há uma sazonalidade da precipitação bem definida (Amazonas, Uruguai e Atlântico Sul).

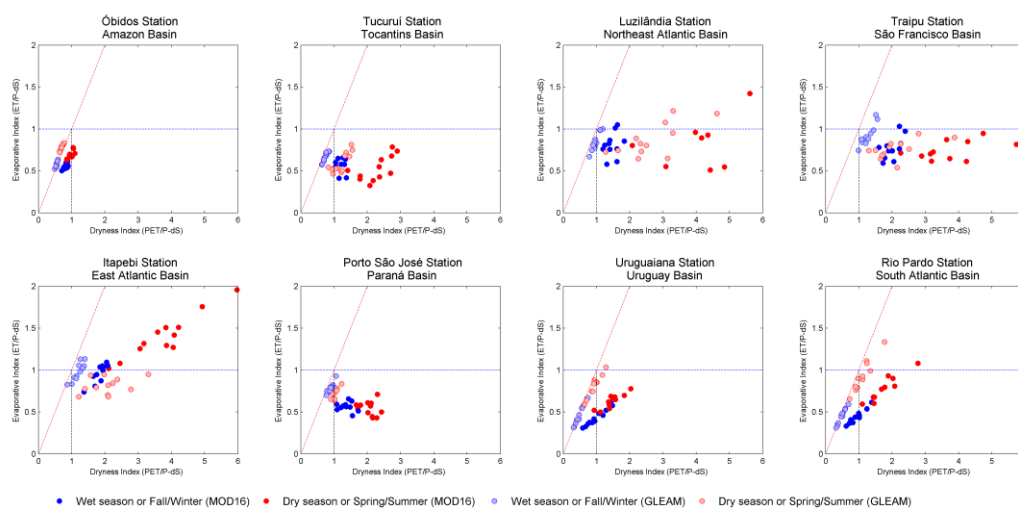


Figura 3. Abordagem de Budyko para MOD16 e GLEAM ET e precipitação MSWEP, para períodos interanuais de 2003 a 2014. Linhas em vermelho indicam o limiar de limitação por energia e linhas em azul indicam o limiar de limite por água.

Os valores de índice de aridez ( $PET/P - dS$ ) < 1 são indicativos de bacias úmidas e limitadas pela disponibilidade de energia, enquanto que  $PET/P - dS > 1$  corresponde a bacias áridas e limitadas quanto a disponibilidade de água [4]. Já o índice evaporativo ( $ET/P - dS$ ), descreve o particionamento em ET e escoamento [3].

De uma forma geral, os valores de índice evaporativo são geralmente menores para o MOD16, enquanto que para o índice de aridez são geralmente maiores, esses resultados corroboram com trabalho anterior onde foi empregada a abordagem de Budyko em 837 bacias globalmente distribuídas, verificando que o MOD16 tende a subestimar a

razão entre ET e PET, refletindo menores estimativas de evaporação [10]. Além disso, ambos modelos apresentam valores de ET que superam a precipitação (Atlântico Nordeste, Leste, Sul e São Francisco).

Analisando os resultados para cada bacia, verifica-se para a estação de Óbidos, bacia do Amazonas, que para os modelos MOD16 e GLEAM os valores de índice de aridez indicam uma condição de bacia úmida e com limitação de energia, durante a maior parte do ano, corroborando com outros estudos que observaram que a ET em sub bacias na Amazônia apresentam limitação de disponibilidade de energia [4], apesar disso, é possível verificar uma fraca

sazonalidade de ET em ambos modelos, sendo que o GLEAM tende a seguir a precipitação enquanto o MOD16 é mais afetado pela variação da radiação [10].

Nas bacias do Tocantins e Paraná, os resultados demonstram que existe uma limitação de disponibilidade de água para o MOD16, e para GLEAM ET apenas na estação seca. Estas bacias estão principalmente localizadas em áreas de Cerrado, onde a característica decídua da vegetação relaciona-se diretamente com a diminuição das taxas de ET neste período.

Nas bacias do Atlântico Nordeste, Leste e São Francisco são verificados altos valores de índice de aridez (MOD16 e GLEAM), indicando a ocorrência de clima árido e limitação por disponibilidade de água, corroborando com as taxas de precipitação. Além disso, nestas bacias são verificados valores de índice evaporativo acima da linha de limitação por água, indicando que podem haver fontes adicionais de água, além da precipitação, ou ainda, estar relacionado as incertezas das estimativas de precipitação, ET e variação do armazenamento de água.

As bacias mais ao sul do Brasil, onde a precipitação é bem distribuída ao longo do ano, sem apresentar período característico seco, os resultados indicam limitação de energia no período de outono/inverno, corroborando com a variação da radiação.

#### 4. CONCLUSÕES

Neste estudo os padrões de ET demonstraram comportamento sazonal similar nas bacias do Tocantins, São Francisco, Paraná e Atlântico Nordeste e Leste, seguindo a sazonalidade da precipitação, enquanto que nas bacias mais ao sul do Brasil (Uruguaiana e Rio Pardo), a ET tende a seguir a variação da radiação. Na bacia Amazônica, MOD16 e GLEAM ET apresentaram diferentes padrões, com comportamento oposto durante os meses de menos chuvosos.

Na abordagem de Budyko os resultados demonstraram que para bacias em regiões de clima mais seco, a ET é limitada pela disponibilidade de água, principalmente no período seco, enquanto que mais ao sul do Brasil foi verificado limitação por energia nos meses de outono/inverno. Em relação a bacia amazônica, os resultados indicam um grau de limitação por energia, durante a maior parte do ano.

Esses resultados demonstram que ainda é um desafio o entendimento dos padrões e limitações de ET, uma vez que de forma geral os modelos concordem em termos de sazonalidade e limitações pela disponibilidade de água e energia nas bacias analisadas existem divergências entre eles, demonstrando a importância de se considerar a aplicação de diferentes modelos de ET em estudos hidro climatológicos.

#### 5. REFERÊNCIAS

- [1] M. I. Budyko, "The Heat Balance of the Earth's Surface," *Sov. Geogr.*, vol. 2, no. 4, pp. 3–13, 1961.
- [2] C. G. Jung and S. J. Kim, "Assessment of the water cycle impact by the Budyko curve on watershed hydrology using SWAT and CO<sub>2</sub> concentrations derived from Terra MODIS GPP," *Ecol. Eng.*, vol. 118, no. May, pp. 179–190, 2018.
- [3] E. Maeda, E. E. Maeda, X. Ma, F. H. Wagner, H. Kim, and T. Oki, "Evapotranspiration seasonality across the Amazon Basin Evapotranspiration seasonality across the Amazon Basin," *Earth Syst. Dyn.*, no. July, pp. 439–454, 2017.
- [4] I. F. Creed *et al.*, "Changing forest water yields in response to climate warming: Results from long-term experimental watershed sites across North America," *Glob. Chang. Biol.*, vol. 20, no. 10, pp. 3191–3208, 2014.
- [5] M. Rodell, E. B. McWilliams, J. S. Famiglietti, H. K. Beaudoin, and J. Nigro, "Estimating evapotranspiration using an observation based terrestrial water budget," *Hydrol. Process.*, vol. 25, no. 26, pp. 4082–4092, 2011.
- [6] D. G. Miralles, T. R. H. Holmes, R. A. M. De Jeu, J. H. Gash, A. G. C. A. Meesters, and A. J. Dolman, "Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations," *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 15, no. 2, pp. 453–469, 2011.
- [7] Q. Mu, M. Zhao, and S. W. Running, "Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm," *Remote Sens. Environ.*, vol. 115, no. 8, pp. 1781–1800, 2011.
- [8] H. Beck *et al.*, "MSWEP: 3-hourly 0.25° global gridded precipitation (1979-2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data," *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 21, no. 1, pp. 589–615, 2017.
- [9] H. R. Da Rocha *et al.*, "Patterns of water and heat flux across a biome gradient from tropical forest to savanna in Brazil," *J. Geophys. Res. Biogeosciences*, vol. 114, no. 1, pp. 1–8, 2009.
- [10] D. G. Miralles *et al.*, "The WACMOS-ET project - Part 2: Evaluation of global terrestrial evaporation data sets," *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 20, no. 2, pp. 823–842, 2016.