

VALIDAÇÃO DA PARTIÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO A PARTIR DE MODELO DE DUAS FONTES – GEETSEB

Leonardo Laipelt¹, Anderson Ruhoff¹, Ayan Fleischmann², Bruno Comini de Andrade¹, Vanessa de Arruda Souza^{1,3}, Gustavo Pujol Veeck³ e Débora Regina Roberti³

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Leonardo Laipelt, leolaipelt@gmail.com; ²Instituto Mamirauá de Sustentabilidade; ³Universidade Federal de Santa Maria.

RESUMO

Os processos de evaporação (E) e de transpiração (T) são parâmetros chave para a caracterização das interações existentes entre a superfície e a atmosfera, representando também o comportamento da evapotranspiração (ET). Contudo, há pouca validação para o Brasil de modelos de sensoriamento remoto que estimem tais processos de forma desagregada. Este estudo pretende validar as estimativas de E, T e ET do modelo TSEB (*Two-Source Energy Balance*) sobre uma área experimental com vegetação natural de gramíneas do bioma Pampa, localizada no sul do Brasil. O modelo foi desenvolvido na plataforma Google Earth Engine (GEETSEB) e validado utilizando dados de torre de fluxo do tipo “*eddy covariance*”. O modelo GEETSEB obteve resultados satisfatórios de RMSE, obtendo 1,32, 0,86 e 1,32 mm dia⁻¹ para E, T, e ET, respectivamente. O GEETSEB demonstra ser uma boa alternativa para estimativas dos processos de E e T em alta resolução espacial, expandindo as possibilidades de aplicações hidrometeorológicas.

Palavras-chave — sensoriamento remoto, google earth engine, landsat.

ABSTRACT

Evaporation (E) and Transpiration (T) processes are key parameters to analyze existing surface-atmosphere interactions, as well as evapotranspiration (ET) patterns. However, there are a scarcity of validation studies for Brazil using remote sensing models that estimate E and T processes disaggregated. This study aims to validate E, T and ET estimates based on TSEB (Two-Source Energy Balance) model, at a southmost Brazilian site with grassland and natural vegetation of Pampa biome. The model was developed using Google Earth Engine platform (GEETSEB) and validated using flux tower data (eddy covariance). Results demonstrated reasonable errors (RMSE), with 1.32, 0.86 and 1.32 mm day⁻¹ for E, T and ET, respectively. GEETSEB is a good alternative to estimate E and T processes in high spatial resolution, expanding the possibilities for hydrometeorology applications.

Keywords — remote sensing, google earth engine, landsat.

1. INTRODUÇÃO

Estimativas dos fluxos energéticos são fundamentais para compreensão da relação existente entre a superfície e atmosfera. Essa interação ocorre pela influência do solo e da vegetação, em processos envolvendo a evaporação (E) de superfícies líquidas e do solo e de transpiração (T) da vegetação. Ambos os fluxos de água ocorrem de forma paralela, sendo usualmente referidos como evapotranspiração (ET). A compreensão desses fenômenos de forma independente é fundamental para uma série de aplicações, tais como modelagem da superfície, clima, entre outros [1–4]. Para a agricultura, obter a informação de E e T pode auxiliar na quantificação de água necessária para o crescimento da planta, melhorando o gerenciamento de água irrigada [4–6].

O uso de sensoriamento remoto para estimar ET proporciona um monitoramento espacial dos fluxos de água na agricultura [7], oferecendo vantagens para o gerenciamento de plantações [8,9]. Apesar disso, os modelos amplamente utilizados estimam ET sem a separação de E e T, como é o caso do SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*) [10,11], METRIC (*Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration*) [12] e SSEBop (*operational Simplified Surface Energy Balance*) [13]. Por outro lado, existem modelos já consolidados que estimam os processos de E e T de forma paralela, sendo o caso dos modelos TSEB (*Two-Source Energy Balance*) [14] e o ALEXI (*Atmospheric and Land Exchange Inverse*) [15].

Poucos estudos foram realizados utilizando modelos de duas fontes no Brasil. Bosquilia et al. [16] avaliaram uma versão do modelo TSEB para a estimativa de ET no bioma do Cerrado e diferentes altitudes. Já o modelo ALEXI foi aplicado para o Brasil para identificação de secas no Brasil [17,18]. Apesar disso, há a necessidade de maiores estudos de aplicações de modelos duas fontes no Brasil, os quais possuem grande potencial no uso do gerenciamento de água na agricultura, algo de grande interesse de órgãos públicos e agricultores [19].

Dessa forma, o objetivo deste trabalho é validar as estimativas de E, T e ET obtidas utilizando o modelo de duas fontes TSEB em região do bioma Pampa, com informações de torre de fluxo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

A área de estudo (Figura 1) se situa em uma região de vegetação natural do bioma Pampa, onde está localizada a torre de fluxo de Santa Maria (SMA) (lat:-29,724300°; lon:-53,760000°). A região apresenta precipitação anual de aproximadamente 1800 mm ano⁻¹ e clima úmido subtropical (Cfa) de acordo com a classificação de Köppen [20]. A vegetação do bioma Pampa é relativamente distinta dos demais biomas brasileiros, apresentando campos naturais com variedade de espécies de gramíneas que se estendem pelos países vizinhos da Argentina e Uruguai.

As informações de *ET*, *E* e *T* da torre de fluxo foram obtidas entre Janeiro de 2015 e Dezembro de 2021. A técnica de covariância dos vórtices turbulentos (*eddy covariance*), foi utilizada para se obter as medidas dos fluxos de Calor Latente (*LE*) e Calor Sensível (*H*) a partir da torre de fluxo. Essas medidas foram utilizadas para validação das informações obtidas a partir do modelo GEETSEB. Vale ressaltar que métodos de partição de *ET* utilizando medidas de torres de fluxo, vem sendo testados e analisados pelo Laboratório de Micrometeorologia da UFSM (Universidade Federal de Santa Maria), estando essas informações em processo de finalização para publicação.

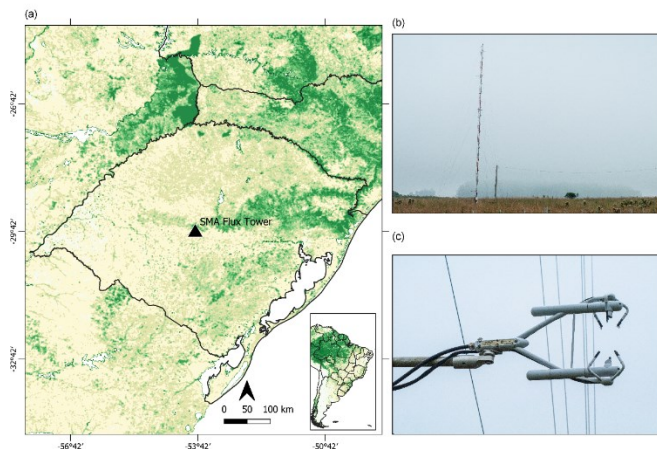


Figura 1. Localização da área de estudo e da torre de fluxo SMA (a). Em (b) está a estrutura da torre localizada no bioma Pampa, e em (c) o equipamento utilizado para monitoramento dos fluxos.

2.2. TSEB

O modelo TSEB foi apresentado em detalhes por Norman et al. [14] e validado por diferentes estudos [21–23]. Baseado no balanço energético (Equação 1) seu grande diferencial está nas estimativas dos fluxos de *H* (Equação 2) e de *LE* (Equação 3) a partir da separação entre solo (subscrito “s”) e vegetação (subscrito “c”).

$$Rn = H + LE + G \quad (1)$$

$$H = H_c + H_s \quad (2)$$

$$LE = LE_c + LE_s \quad (3)$$

Para determinar o saldo de radiação instantâneo (*Rn*) foi utilizado a Equação 4, enquanto para obter o *Rn* referente a parcela do solo (*Rn_s*) foi utilizado a Equação 5.

$$Rn = (1 - \alpha)RS_{down} + Rl_{down} - Rl_{up} - (1 - \epsilon_0)RS_{down} \quad (4)$$

em que α é o albedo da superfície, RS_{down} é a radiação incidente de ondas curtas, Rl_{down} é a radiação incidente de ondas longas e Rl_{up} radiação de saída de ondas longas.

$$Rn_s = Rn \exp(0,9 \ln(1 - fc)) \quad (5)$$

em que *fc* é a fração da cobertura vegetal.

O *H* do solo (*H_s*) é obtido através da Equação 6, enquanto o *H* da vegetação (*H_c*) é obtido utilizando a Equação 7:

$$H_s = \rho Cp \frac{T_s - T_{ac}}{r_s} \quad (6)$$

em que ρ é a densidade da água, *Cp* a capacidade calorífica da água.

$$H_c = \rho Cp \frac{T_c - T_{ac}}{r_a} \quad (7)$$

O fluxo de calor do solo (*G*) é estimado a partir da Equação 8, proposta por [14]:

$$G = 0,35 * (Rn - Rn_s) \quad (8)$$

Para estimar o *LE* da vegetação (*LE_c*) é utilizado a Equação 9. Nessa etapa, o αPT é a constante da equação de Priestley-Taylor, determinada inicialmente como $\alpha PT = 1,3$. Esse valor é utilizado na primeira estimativa de *LE_c*, e caso a condição de *LE* para o solo (*LE_s*), estimado a partir da Equação 10, seja de *LE_s* < 0 para o pixel, significa que o modelo não atingiu o equilíbrio energético, dando prosseguimento ao processo iterativo que irá recalcular parâmetros de resistência e temperatura do modelo, além de um novo valor para *LE_c* com o decréscimo de 0.1 do valor anterior de αPT . Caso a condição de *LE_s* > 0 seja obtida, o resultado obtido para essa e as demais variáveis do balanço energético é mantido, e o processo iterativo continua para situações que a condição não é verdadeira até que $\alpha PT = 0$.

$$LE_c = \alpha PT fc \frac{\Delta}{v + \gamma} Rn_c \quad (9)$$

$$LE_s = Rn_s - H_s - G \quad (10)$$

Para estimar *E* e *T*, primeiro foi obtido as frações evaporativas (*EF_s* e *EF_c*) para cada variável (Equação 11 e Equação 12), e posteriormente convertido para valores diários de *E* e *T*. Por fim, a *ET* foi estimada como somatório das duas variáveis.

$$EF_s = \frac{LE_s}{LE_s + H_s} \quad (11)$$

$$EF_c = \frac{LE_c}{LE_c + H_c} \quad (12)$$

3. RESULTADOS

Os resultados estatísticos obtidos podem ser observados na Tabela 1. A Evaporação apresentou a raiz do erro médio quadrático (RMSE) de aproximadamente 1,32 mm dia⁻¹, enquanto o viés médio do erro (MBE) e o erro médio absoluto (MAE) foram -0,49 mm dia⁻¹, 1,07 mm dia⁻¹, respectivamente. Já a *T* apresentou os resultados mais acurados em relação as três componentes, apresentando um RMSE de 0,86 mm dia⁻¹, além de uma subestimativa de -0,27 mm dia⁻¹. Por fim, o resultado do somatório das duas componentes (*E* e *T*) resultou em um RMSE de 1,36 mm dia⁻¹ e uma subestimativa de 0,61 mm dia⁻¹.

Tabela 1 – Resultados estatísticos da validação das três componentes (Evaporação, Transpiração e Evapotranspiração) extraídas do modelo TSEB em relação aos dados da torre de fluxo.

	Evaporação	Transpiração	Evapotranspiração
RMSE	1,32	0,86	1,36
MBE	-0,49	-0,27	-0,61
MAE	1,07	0,64	1,17
R ²	0,08	0,70	0,68

A variação anual das taxas de *T*, *E* e *ET* para o sítio experimental de SMA é apresentado na Figura 2.

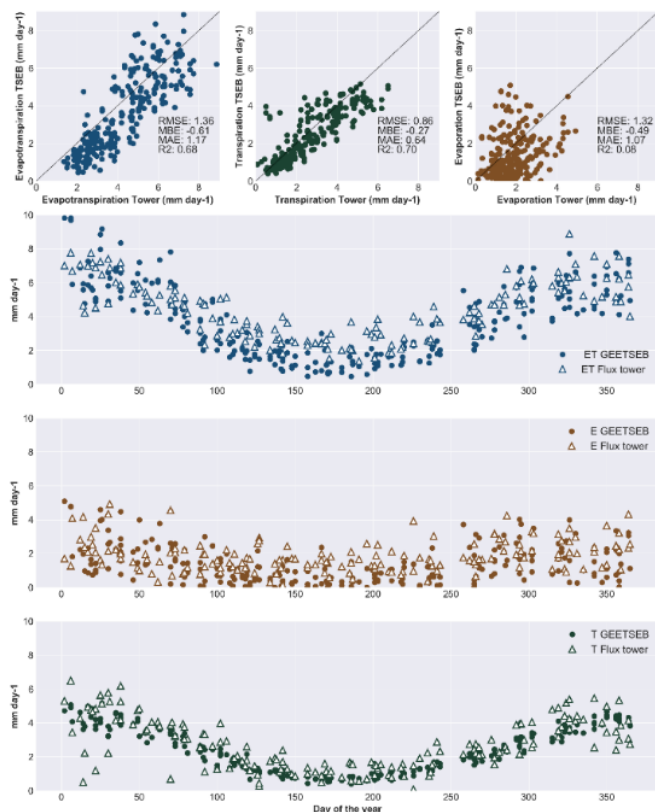


Figura 2. Comparação das estimativas de *E*, *T* e *ET* com dados medidos da torre de fluxo SMA. As séries temporais são apresentadas em função do dia do ano (DOY).

Os dados de *T* do GEETSEB apresentaram as maiores correlações com as medidas da torre de fluxo (0,70), enquanto as estimativas de *E* não apresentaram uma correlação significativa (0,08). Os valores *ET*, obtidos a partir do somatório dos dois processos *E* e *T*, apresentou em uma subestimativa quando comparado aos dados experimentais, sendo mais evidente no processo de *E*, porém, a correlação ainda foi razoável (0,68).

4. DISCUSSÃO

De forma geral, os resultados se demonstraram satisfatórios e condizentes com a literatura em relação a validação de modelos de *ET* utilizando dados de torres de fluxo no para a região do sul do Brasil [24,25]. Laipelt et al. [24] validou o modelo GESEBAL (*Google Earth Engine SEBAL*) para o mesmo local e com diferentes calibrações obteve resultados de RMSE entre 1,23 - 0,91 mm dia⁻¹, enquanto que, Kayser et al. [25] obteve para o mesmo modelo estimativas de RMSE próximas de 2 mm dia⁻¹.

Incertezas em relação aos dados de entrada utilizados pelo modelo TSEB foram analisadas em diferentes estudos [15,21,26]. Kustas et al. [26] apontam que as informações de temperatura da superfície e ar utilizados pelo modelo podem apresentar maiores incertezas. Nesse estudo, foi utilizado a temperatura do ar do produto global de reanálise ERA5-Land, com resolução espacial de 10 km, enquanto a *Ts* provém da coleção 2 dos produtos Landsat (30 m). Essa diferença de resoluções espaciais para a estimativa da diferença entre as temperaturas (*Ts* - *Ta*) pode impactar nos resultados de *H*, resultando em maiores incertezas nas estimativas de *E* e *T*. Além disso, outros parâmetros podem impactar na performance do modelo TSEB, como a estimativa da fração de cobertura vegetal, o *LAI* (*Leaf Area Index*) e a velocidade do vento [26].

5. CONCLUSÕES

Existem ainda poucas estimativas de *E* e *T* utilizando modelos de sensoriamento remoto baseado no balanço energético. Neste estudo, apresentamos o modelo GEETSEB, baseado no modelo TSEB e desenvolvido utilizando a plataforma GEE para estimar os fluxos de *E* e *T* de forma paralela e a estimativa final de *ET*. Os resultados foram comparados com dados de torre de fluxo, apresentando RMSE entre 0,86 - 1,32 mm dia⁻¹, estando de acordo com outros estudos na mesma área de estudo.

Próximos passos do desenvolvimento do modelo é analisar a sensibilidade dos dados de entrada, como também das parametrizações utilizadas pelo modelo, com o objetivo de replicar o estudo para diferentes regiões do Brasil.

8. REFERÊNCIAS

1. Yang, D.; Li, S.; Kang, S.; Du, T.; Guo, P.; Mao, X.; Tong, L.; Hao, X.; Ding, R.; Niu, J. Effect of drip irrigation on wheat evapotranspiration, soil evaporation and transpiration in Northwest China. *Agric. Water Manag.* **2020**, *232*, 106001.
2. Ding, R.; Kang, S.; Zhang, Y.; Hao, X.; Tong, L.; Du, T. Partitioning evapotranspiration into soil evaporation and transpiration using a modified dual crop coefficient model in irrigated maize field with ground-mulching. *Agric. Water Manag.* **2013**, *127*, 85–96.
3. Tolk, J.A.; Howell, T.A.; Steiner, J.L.; Krieg, D.R.; Schneider, A.D. Role of transpiration suppression by evaporation of intercepted water in improving irrigation efficiency. *Irrig. Sci.* **1995**, *16*, 89–95.
4. Montoro, A.; Mañas, F.; López-Urrea, R. Transpiration and evaporation of grapevine, two components related to irrigation strategy. *Agric. Water Manag.* **2016**, *177*, 193–200.
5. French, A.N.; Hunsaker, D.J.; Thorp, K.R. Remote sensing of evapotranspiration over cotton using the TSEB and METRIC energy balance models. *Remote Sens. Environ.* **2015**, *158*, 281–294.
6. Jensen, M.E. Beyond irrigation efficiency. *Irrig. Sci.* **2007**, *25*, 233–245.
7. Chen, Y.; Xia, J.; Liang, S.; Feng, J.; Fisher, J.B.; Li, X.; Li, X.; Liu, S.; Ma, Z.; Miyata, A.; et al. Comparison of satellite-based evapotranspiration models over terrestrial ecosystems in China. *Remote Sens. Environ.* **2014**, *140*, 279–293.
8. Jaafar, H.H.; Ahmad, F.A. Time series trends of Landsat-based ET using automated calibration in METRIC and SEBAL: The Bekaa Valley, Lebanon. *Remote Sens. Environ.* **2019**.
9. Bandara, K.M.P.. Monitoring irrigation performance in Sri Lanka with high-frequency satellite measurements during the dry season. *Agric. Water Manag.* **2003**, *58*, 159–170.
10. Bastiaanssen, W.G.M. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: a remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climates, SC-DLO: Wageningen, 1995.
11. Bastiaanssen, W.G.M.; Menenti, M.; Feddes, R.A.; Holtslag, A.A.M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation. *J. Hydrol.* **1998**, *212–213*, 198–212.
12. Allen, R.G.; Burnett, B.; Kramber, W.; Huntington, J.; Kjaersgaard, J.; Kilic, A.; Kelly, C.; Trezza, R. Automated Calibration of the METRIC-Landsat Evapotranspiration Process. *JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc.* **2013**, *49*, 563–576.
13. Senay, G.B.; Bohms, S.; Singh, R.K.; Gowda, P.H.; Velpuri, N.M.; Alemu, H.; Verdin, J.P. Operational Evapotranspiration Mapping Using Remote Sensing and Weather Datasets: A New Parameterization for the SSEB Approach. *JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc.* **2013**, *49*, 577–591.
14. Norman, J.M.; Kustas, W.P.; Humes, K.S. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. *Agric. For. Meteorol.* **1995**, *77*, 263–293.
15. Anderson, M.C.; Norman, J.M.; Diak, G.R.; Kustas, W.P.; Mecikalski, J.R. A two-source time-integrated model for estimating surface fluxes using thermal infrared remote sensing. *Remote Sens. Environ.* **1997**, *60*, 195–216.
16. Bosquilia, R.W.D.; Neale, C.M.U.; Duarte, S.N.; Longhi, S.J.; Ferraz, S.F. de B.; Muller-Karger, F.E.; McCarthy, M.J. Evaluation of evapotranspiration variations as a function of relief and terrain exposure through multivariate statistical analysis. *Ecophysiol. Hydrobiol.* **2019**, *19*, 307–315.
17. Anderson, M.C.; Zolin, C.A.; Sentelhas, P.C.; Hain, C.R.; Semmens, K.; Tugrul Yilmaz, M.; Gao, F.; Otkin, J.A.; Tetrault, R. The Evaporative Stress Index as an indicator of agricultural drought in Brazil: An assessment based on crop yield impacts. *Remote Sens. Environ.* **2016**, *174*, 82–99.
18. Anderson, M.C.; Zolin, C.A.; Hain, C.R.; Semmens, K.; Tugrul Yilmaz, M.; Gao, F. Comparison of satellite-derived LAI and precipitation anomalies over Brazil with a thermal infrared-based Evaporative Stress Index for 2003–2013. *J. Hydrol.* **2015**, *526*, 287–302.
19. Rattis, L.; Brando, P.M.; Macedo, M.N.; Spera, S.A.; Castanho, A.D.A.; Marques, E.Q.; Costa, N.Q.; Silverio, D. V.; Coe, M.T. Climatic limit for agriculture in Brazil. *Nat. Clim. Chang.* **2021**, *11*, 1098–1104.
20. Alvares, C.A.; Stape José Luiz and Sentelhas, Paulo Cesar and de Moraes Gonçalves, J.L.; Sparovek, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorol. Zeitschrift* **2013**, *22*, 711–728.
21. Timmermans, W.J.; Kustas, W.P.; Anderson, M.C.; French, A.N. An intercomparison of the Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) and the Two-Source Energy Balance (TSEB) modeling schemes. *Remote Sens. Environ.* **2007**, *108*, 369–384.
22. Yang, Y.; Long, D.; Guan, H.; Liang, W.; Simmons, C.; Batelaan, O. Comparison of three dual-source remote sensing evapotranspiration models during the MUSOEXE-12 campaign: Revisit of model physics. *Water Resour. Res.* **2015**, *51*, 3145–3165.
23. Khand, K.; Bhattarai, N.; Taghvaeian, S.; Wagle, P.; Gowda, P.H.; Alderman, P.D. Modeling Evapotranspiration of Winter Wheat using Contextual- and Pixel-based Surface Energy Balance Models. *Trans. ASABE* **2020**, *0*, 0.
24. Laipelt, L.; Henrique Bloedow Kayser, R.; Santos Fleischmann, A.; Ruhoff, A.; Bastiaanssen, W.; Erickson, T.A.; Melton, F. Long-term monitoring of evapotranspiration using the SEBAL algorithm and Google Earth Engine cloud computing. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* **2021**, *178*, 81–96.
25. Kayser, R.; Ruhoff, A.; Laipelt, L.; Kich, E.; Roberti, D.; Souza, V.; Ruberti, G.; Collischonn, W.; Neale, C. Assessing SEBAL automated calibration and meteorological reanalysis uncertainties to estimate evapotranspiration in subtropical humid climates. Under Review. *Agric. For. Meteorol.* **2021**.
26. Kustas, W.P.; Alfieri, J.G.; Anderson, M.C.; Colaizzi, P.D.; Prueger, J.H.; Evett, S.R.; Neale, C.M.U.; French, A.N.; Hipps, L.E.; Chávez, J.L.; et al. Evaluating the two-source energy balance model using local thermal and surface flux observations in a strongly advective irrigated agricultural area. *Adv. Water Resour.* **2012**, *50*, 120–133.