

## **ANÁLISE DA DINÂMICA TEMPORAL DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA DO SEMIÁRIDO ATRAVÉS DE MODELAGEM HIDROLÓGICA E SENSORIAMENTO REMOTO**

**FREDERICO ABRAÃO COSTA LINS<sup>1</sup>; ABELARDO ANTÔNIO DE ASSUNÇÃO MONTENEGRO<sup>1</sup>; CAROLYNE WANESSA LINS DE ANDRADE FARIAS<sup>2</sup>; ALINE MARIA SOARES DAS CHAGAS<sup>1</sup>; RODRIGO DE QUEIROGA MIRANDA<sup>3</sup> E JOSICLÊDA DOMINICANO GALVÍNCIO<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Rua Dom Manuel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, 52171-900, Recife, Pernambuco, Brasil. E-mail: frederico\_acl@hotmail.com; montenegro.ufrpe@gmail.com; alinemschagas@gmail.com*

<sup>2</sup>*Departamento de Geociências, Universidade Federal da Paraíba, Campus I - Lot. Cidade Universitária, 58051-900, João Pessoa, Paraíba, Brasil. E-mail: carolynelins.ufpb@gmail.com*

<sup>3</sup>*Departamento de Geografia, Universidade Federal de Pernambuco, Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, Recife - PE, 50670-901, Recife, Pernambuco, Brasil. E-mail: rodrigo.qmiranda@gmail.com; josicleda@gmail.com*

### **1 RESUMO**

A evapotranspiração é uma das componentes mais relevantes do ciclo hidrológico, especialmente, em regiões semiáridas, onde há elevadas temperaturas e alta demanda hídrica pelas culturas, sendo sua análise essencial para o planejamento e gestão dos recursos hídricos. Objetivou-se calibrar e validar o modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) com informações de evapotranspiração real advindas de sensoriamento remoto, e investigar a sua dinâmica temporal em uma bacia hidrográfica experimental do Semiárido. O estudo foi desenvolvido na Bacia Experimental do Riacho Jatobá (13,5 km<sup>2</sup>). Dados de evapotranspiração (ET) foram obtidos do produto MOD16A2, do sensor MODIS. A simulação hidrológica foi realizada com o modelo hidrológico SWAT. Foram realizadas análises estatísticas descritivas e análise de tendência pelo teste de Mann-Kendall. Os valores de R<sup>2</sup> encontrados para a evapotranspiração, foram de 0,61 e 0,81 para a calibração e validação, respectivamente. As análises de tendência apontaram que há tendência de decréscimo da evapotranspiração real no período de 2006 a 2018. Da precipitação média anual na bacia (722,9 mm), 26% corresponde à precipitação efetiva e 74% retorna à atmosfera como evapotranspiração (534,7 mm). A utilização de dados alternativos para a calibração do modelo SWAT é de grande relevância, especialmente em bacias semiáridas.

**Palavras-chave:** MODIS, SWAT, balanço hídrico.

**LINS, F. A. C.; MONTENEGRO, A. A. de A.; FARIAS, C. W. L. de A.; CHAGAS, A. M. S. das; MIRANDA, R. de Q.; GALVÍNCIO, J. D.**

**ANALYSIS OF THE TEMPORAL DYNAMICS OF ACTUAL EVAPOTRANSPIRATION IN A SEMIARID RIVER BASIN USING HYDROLOGICAL MODELING AND REMOTE SENSING**

## 2 ABSTRACT

Evapotranspiration is one of the most relevant components of the hydrological cycle, especially, in semiarid regions, where there are high temperatures and great water demand for crops, and its analysis is essential for the planning and management of water resources. The objective was to calibrate and validate the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model with real evapotranspiration information from remote sensing, and to investigate its temporal dynamics in an experimental river basin of the Semiarid. The study was conducted in the Riacho Jatobá Experimental River Basin (13.5 km<sup>2</sup>). Evapotranspiration (ET) data were obtained from the product MOD16A2, from the MODIS sensor. The hydrological simulation was carried out with the SWAT hydrological model. Descriptive statistical analysis and trend analysis were performed using the Mann-Kendall test. The R<sup>2</sup> values found for evapotranspiration were 0.61 and 0.81 for calibration and validation, respectively. The trend analysis test showed that there is a trend of decrease for actual evapotranspiration for the 2006–2018 period. Of the average annual precipitation in the river basin (722.9 mm), 26% corresponds to the effective precipitation and 74% returns to the atmosphere as evapotranspiration (534.7 mm). The use of alternative data for calibrating the SWAT model is highly relevant, especially for semiarid watersheds.

**Keywords:** MODIS, SWAT, water balance.

## 3 INTRODUÇÃO

A evapotranspiração (ET) é um dos principais componentes do balanço hídrico, sendo definida como o conjunto dos processos de evaporação da água do solo e transpiração da vegetação, possuindo capacidade de transferir grandes volumes de água da superfície terrestre para a atmosfera (ALLEN *et al.*, 1998; ARAÚJO *et al.*, 2017). Salama *et al.* (2015) destacam que a estimativa da evapotranspiração real é essencial à gestão e planejamento dos recursos hídricos, sendo parte importante do gerenciamento da água na agricultura e nos estudos locais e regionais de balanço hídrico, particularmente, no Semiárido. Segundo Chun *et al.* (2018), a ET desempenha um papel importante no ciclo hidrológico das regiões áridas, uma vez que maior parte da precipitação é evaporada ou transpirada pelas plantas. Além disso, cenários de escassez hídrica são frequentes no Semiárido devido às mudanças na sua cobertura vegetal natural e à variabilidade

climática da região, comprometendo os usos básicos desse recurso, como o abastecimento humano e a agricultura (produção de alimentos) (FERREIRA *et al.*, 2020).

O Semiárido brasileiro apresenta limitada disponibilidade de recursos hídricos, em virtude do regime pluviométrico irregular, com chuvas mal distribuídas nas escalas temporal (tempo) e espacial (espaço geográfico), tornando o gerenciamento da água na agricultura de extrema importância, uma vez que a questão hídrica no Semiárido brasileiro tem forte influência no desenvolvimento social e agropecuário dessa região. Diversos estudos têm focado em estimativas confiáveis de ET no tempo e no espaço, considerando também cenários tanto de períodos secos como de períodos chuvosos (FILGUEIRAS *et al.*, 2020; ABIODUN *et al.*, 2018; VANINO *et al.*, 2018; MIRANDA *et al.*, 2017; TABARI *et al.*, 2013).

Com o avanço das tecnologias, a estimativa da ET advinda de produtos baseados em satélites, se tornou relevante

entre pesquisadores e agências governamentais, uma vez que a medição direta da ET no campo é onerosa e difícil (MIRANDA *et al.*, 2017). Adicionalmente, métodos indiretos de avaliação de variáveis, a partir de sensoriamento remoto e de modelagem hidrológica, são capazes de incrementar a confiabilidade dos balanços hídricos e de energia. De acordo com Ruhoff *et al.* (2013), o sensoriamento remoto é considerado uma ferramenta eficaz para estimar a evapotranspiração (ET), particularmente, em grandes escalas espaciais. Para pequenas escalas, faz-se necessário investigar a representatividade de tais estimativas, uma vez que os dados pontuais precisam ser extrapolados para grandes áreas, aumentando as incertezas, especialmente, em regiões semiáridas, onde há grande variabilidade espacial do uso do solo e, conseqüentemente, da ET (JOVANOVIĆ *et al.*, 2015).

As estimativas de evapotranspiração mediante o sensoriamento remoto têm sido aprimoradas cada vez mais a partir de diferentes sensores orbitais e para diferentes áreas do planeta, sendo difundida inclusive na região do Semiárido de Pernambuco. Lins *et al.* (2017) estimaram a evapotranspiração real utilizando imagens do Landsat 8 OLI/TIRS para uma cidade próxima a área de estudo do presente trabalho. Também em uma região próxima da atual área de estudo, Coelho *et al.* (2017) utilizaram dados de evapotranspiração estimados a partir do sensor MODIS, para realizar um balanço hídrico e estimar a recarga subterrânea em um vale aluvial.

Visto a crescente utilização de dados provenientes de sensoriamento remoto, muitos pesquisadores têm utilizado tais informações indiretas, especialmente, a evapotranspiração, como alternativa para a calibração e validação de modelos hidrológicos (CHUN *et al.*, 2018;

PARAJULI *et al.*, 2017; FRANCO; BOUNUMÁ, 2017; ABIODUN *et al.*, 2018; MIRANDA *et al.*, 2017), em bacias com limitada disponibilidade de medidas de campo, uma vez que os custos para o monitoramento em campo de variáveis hidrológicas podem ser altos.

Um dos principais modelos hidrológicos que tem sido amplamente utilizado para a gestão de bacias hidrográficas é o modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), entretanto, ainda há poucos trabalhos desenvolvidos para avaliar a evapotranspiração real em bacias do Semiárido, utilizando estimativas produzidas por esse modelo (CHUN *et al.*, 2018), que podem ser verificadas quanto à sua representatividade a partir de análises comparativas com produtos de sensoriamento remoto. Cabe destacar o estudo desenvolvido por Miranda (2017), na bacia do Rio Pontal, Semiárido de Pernambuco.

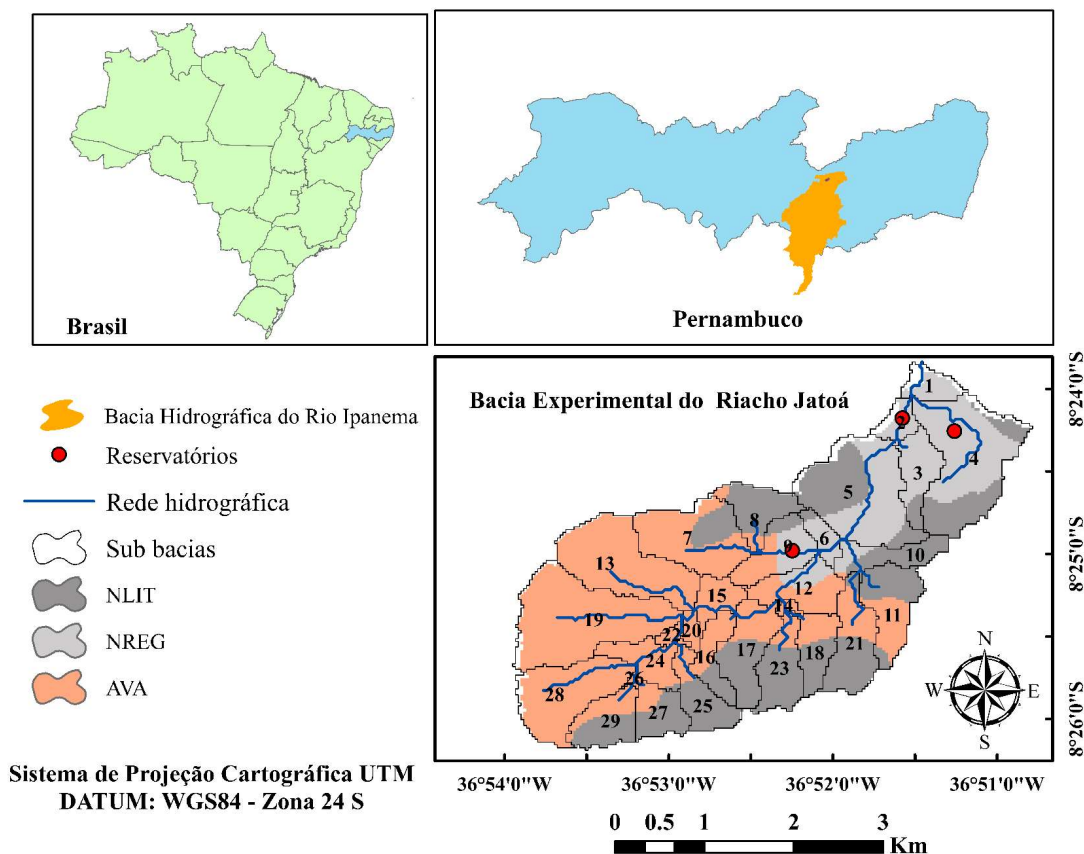
Dessa forma, o presente trabalho objetivou calibrar e validar o modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) com informações de evapotranspiração real advindas de sensoriamento remoto, e investigar a sua dinâmica temporal em uma bacia experimental do Semiárido.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Área de estudo

O estudo foi desenvolvido na Bacia Experimental do Riacho Jatobá (BERJ) que apresenta aproximadamente 13,5 km<sup>2</sup>, localizada no município de Pesqueira, PE, Brasil, entre as coordenadas 8° 34' 17" e 8° 18' 11" de latitude Sul 37° 1' 35" e 36° 47' 20" de longitude Oeste (Figura 1).

**Figura 1.** Localização da Bacia Experimental do Riacho Jatobá e apresentação dos solos predominantes e dos sítios de monitoramento, assim como, a numeração das sub-bacias.



NLIT – Neossolo Litólico, NREG – Neossolo Regolítico, AVA – Argissolo Vermelho-Amarelo.

Fonte: Autores.

O Riacho Jatobá é afluente do Rio Ipanema, tem comprimento de 6,5 km, perímetro de 16 km e coeficiente de compacidade de 1,27 (ARAÚJO, 2016), sendo um curso d'água de ordem 4. Suas nascentes se situam na Serra da Cruz, na cota topográfica de 830 m, com topo localizado 200 m acima do exutório da bacia, e que vêm sofrendo ações de desmatamento.

O clima da região é BSsh (semiárido, muito quente, tipo Estepe), segundo a classificação de Köppen. A precipitação média anual da bacia é de aproximadamente 600 mm (com o período chuvoso entre os meses de abril a julho), a temperatura média é

de 23°C, e a evapotranspiração potencial é de aproximadamente 2000 mm/ano (MELO; MONTENEGRO, 2015; SILVA JUNIOR *et al.*, 2016).

Os principais tipos de solo encontrados na bacia são Argissolo Amarelo, com presença de impedimento rochoso; Neossolo Litólico e Neossolo Regolítico (ARAÚJO *et al.*, 2018). A BERJ apresenta-se como uma bacia tipicamente rural, com vegetação predominantemente de Caatinga hiperxerófila, exibindo sazonalidade ao longo do tempo em função da pluviometria e dos índices climáticos locais (SILVA JÚNIOR, 2016). Ao longo dos últimos anos, devido aos

diferentes usos do solo e ao manejo inadequado, a bacia vem sofrendo alterações na paisagem, as quais interferem nos processos hidrológicos e no balanço hídrico.

#### 4.2 Aquisição dos dados orbitais de Evapotranspiração (ET)

Dados de evapotranspiração (ET) e Índice de Área Foliar (IAF) foram obtidos respectivamente dos produtos MOD16A2 e MOD15A, do sensor MODIS, disponíveis em <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Ambos os produtos possuem resoluções: espacial de 500 m e temporal de 8 dias. O banco de dados espacial de cada produto utilizado nas análises consistiu em valores médios de ET e IAF dos pixels em cada sub-bacia e HRU (Unidade de Resposta Hidrológica), respectivamente. A extração desses valores foi realizada através de estatística zonal, e para garantir que mesmo as menores zonas retornariam valores válidos, os pixels de todos os produtos foram reamostrados para 10 m de resolução espacial, utilizando a interpolação *Nearest Neighbor*. Todos os produtos baixados foram processados utilizando a biblioteca GDAL (*Geospatial Data Abstraction Library*; <https://gdal.org/>).

Nesse estudo, as datas de início e fim das estações de crescimento de cada HRU foram determinadas a partir das observações do índice de área foliar da área de estudo a partir do produto MOD15A, do sensor MODIS. Essa abordagem é nova, e não havia sido realizada anteriormente no Brasil. Para tal, as séries temporais de IAF de cada HRU foram submetidas a um processo de decomposição, utilizando o método de médias móveis simples (BOUZADA, 2012). Em seguida, a componente sazonal foi binarizada,

onde 0 foi definido para os valores negativos, e 1 para os positivos. Com cada série binarizada ( $SB$ ) a data de início da estação de crescimento da vegetação ( $g_i$ ) foi escolhida quando  $SB_j = 1$  e  $SB_{j+1} = 0$ , onde  $j$  é referente à data da composição de 8 dias do IAF. A data de término da estação ( $g_t$ ) foi definida quando  $SB_j = 0$  e  $SB_{j+1} = 1$ . Todas as datas foram inseridas diretamente nos respectivos arquivos “.mgt” de cada HRU do modelo SWAT, que será descrito a seguir, utilizando programação em Python.

#### 4.3 Descrição do modelo SWAT

O *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), disponível gratuitamente em (<http://swat.tamu.edu/>), é um modelo semiconceitual, semidistribuído, de base física e contínuo no tempo (ARNOLD *et al.*, 2012). É um modelo frequentemente utilizado na simulação de diferentes processos físicos, como clima, hidrologia (escoamento superficial, percolação, interceptação, infiltração, fluxo subsuperficial, fluxo de base e evapotranspiração), e manejo do solo em escalas de tempo diárias, mensais e anuais (FONTES JÚNIOR *et al.*, 2019; BRESSIANI *et al.*, 2015).

O SWAT considera a equação do balanço hídrico (Equação 1) e estima o escoamento superficial usando o método da curva-número (CN), desenvolvido pelo *Soil Conservation Service*. Além disso, o modelo considera as chamadas Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs), que representam áreas homogêneas em relação ao tipo de solo, uso do solo e declividade, para o cálculo dos processos hidrológicos (NEITSCH *et al.*, 2005).

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (P - Q_S - ET - W_S - Q_{gw}) \quad (1)$$

Em que,  $SW_t$  e  $SW_0$  representam os armazenamentos de água no solo nos tempos final e inicial, respectivamente (mm),  $t$  é o tempo (dias),  $P$  é a precipitação (mm),  $Q_s$  é o escoamento superficial (mm),  $ET$  é a evapotranspiração (mm),  $W_s$  é a percolação (mm) e  $Q_{gw}$  é o escoamento de base (mm).

#### 4.4 Dados de entrada do SWAT

O modelo SWAT requer quatro tipos principais de dados de entrada, três tipos considerados dados espaciais, sendo eles o

MDE (Modelo de Elevação Digital), mapa do tipo de solo e mapa de uso do solo, e os dados tabulares ou temporais de variáveis meteorológicas.

Para o presente trabalho, o MDE foi obtido junto a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), assim como, o mapa do tipo de solo obtido a partir do Zoneamento Agroecológico de Pernambuco (ZAPE). As características físicas dos solos inseridas no modelo estão descritas na Tabela 1 e foram especificadas com base no estudo desenvolvido por Montenegro e Ragab (2010).

**Tabela 1.** Propriedades físico-hídricas dos solos da Bacia Experimental do Riacho Jatobá (BERJ), Pesqueira, PE.

Nº	Solo	Propriedades físico-hídricas do solo							
		Z (mm)	D <sub>s</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	CAD (mm/mm)	k <sub>sat</sub> (mm/hr)	Textura (%)			C.O (%)
						Argila	Silte	Areia	
1.	AVA	950	1,38	0,30	3,80	32	31	37	1,74
		1300	1,32	0,32	1,29	34	27	39	0,58
		2000	1,59	0,37	36,43	5,5	30,5	64	1,30
2.	NLIT	500	1,48	0,33	17,96	19	25	56	1,74
3.	NREG	170	1,56	0,34	18,00	11	8	81	1,74
		450	1,54	0,34	18,00	13	16	71	0,58
		850	1,56	0,33	0,05	13	11	76	0,05

AVA – Argissolo Vermelho-Amarelo, NLIT – Neossolo Litólico, NREG – Neossolo Regolítico, Z – profundidade (mm), D<sub>s</sub> – densidade do solo (g/cm<sup>3</sup>), CAD – capacidade de água disponível (mm/mm), k<sub>sat</sub> – condutividade hidráulica saturada do solo (mm/hr), C.O – carbono orgânico. **Fonte:** adaptado de Montenegro e Ragab (2010).

O mapa de uso do solo teve como fonte o Projeto Mapbiomas (Coleção 4.1 Caatinga), considerando o mapa referente ao ano de 2018. O detalhamento do projeto pode ser verificado em <http://mapbiomas.org> (VIANA, 2019). As diferentes classes de uso do solo existentes na BERJ, foram reclassificadas de acordo com as classes disponíveis no banco de dados do SWAT. As classes relacionadas foram água (WATR), área agrícola (AGRL), pastagem (PAST), Caatinga arbustiva (RNGB) e Caatinga arbórea (FRST), correspondendo a 0,05%, 0,95%, 26,48%,

71,96% e 0,56% da área da bacia, respectivamente.

Os dados pluviométricos foram coletados em três pluviômetros automáticos instalados na bacia, operados pelo Laboratório de Água e Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE). Os dados de precipitação foram submetidos à análise de consistência, segundo o Método da Dupla Massa (BERTONI; TUCCI, 2013), obtendo-se valores de coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) de 0,99, indicando assim, adequada consistência entre os dados utilizados (CHAGAS *et al.*, 2020). A série temporal de

dados deste estudo compreendeu o período de 2000 a 2019, operando em passo de tempo diário, em que os três primeiros anos (2000 a 2002) foram utilizados para o aquecimento do modelo SWAT, não sendo, portanto, considerados na análise hidrológica.

Foram inseridas ainda, informações relacionadas aos reservatórios existentes na

área de estudo. Três reservatórios foram inseridos na BERJ, os quais foram Nossa Senhora de Fátima, Fuba I e Fuba II. As informações sobre os reservatórios foram obtidas junto ao Laboratório de Água e Solo da UFRPE e são apresentadas na Tabela 2.

**Tabela 2.** Características dos reservatórios existentes na Bacia Experimental do Riacho Jatobá (BERJ), Pesqueira, PE.

Número	Reservatório	Início de operação	Capacidade máxima (m <sup>3</sup> )
1	Nossa Senhora de Fátima	2000	80,00 x 10 <sup>3</sup>
2	Fuba I (sub 9)	2000	24,84 x 10 <sup>3</sup>
3	Fuba II (sub 4)	2000	24,84 x 10 <sup>3</sup>

Fonte: Autores.

#### 4.5 Performance do modelo SWAT

A performance do modelo SWAT foi avaliada por meio de três indicadores estatísticos, o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS), percentual de tendência (PBIAS) e o coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>). Os indicadores são representados através das equações abaixo (Equações 2, 3 e 4):

$$NS = 1 - \frac{\sum_i (Q_{obs} - Q_{sim})_i^2}{\sum_i (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (2)$$

$$PBIAS = 100 \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})_i}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i})} \quad (3)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_i (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})(Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})]^2}{\sum_i (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2 \sum_i (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})^2} \quad (4)$$

Em que Q<sub>obs</sub> é o dado observado; Q<sub>sim</sub> é o dado simulado;  $\bar{Q}_{obs}$  é a média dos dados observados;  $\bar{Q}_{sim}$  é a média dos dados simulados.

A calibração e validação foi realizada a nível de sub-bacia, sendo a sub-bacia 19, a escolhida para tal, por ser uma das maiores sub-bacias, bem como, por apresentar uma

maior heterogeneidade, com diferentes usos da água e do solo, sendo essa sub-bacia, uma das mais representativas para toda BERJ.

#### 4.6 Estatísticas descritivas

Os resultados foram submetidos à avaliação estatística por medidas de tendência central (média) e dispersão (mínimo, máximo, desvio padrão - DP e coeficiente de variação - CV). A variabilidade temporal dos dados foi avaliada de acordo com os critérios de Warrick & Nielsen (1980), sendo de baixa variabilidade: CV < 12%; média variabilidade: 12 < CV < 60%; e alta variabilidade: CV > 60%.

#### 4.7 Análise de tendência – Mann-Kendall

A análise de tendência foi realizada por meio do teste não paramétrico de Mann (1945) e Kendall (1975) que por se tratar de um método não paramétrico, não requer distribuição normal dos dados (Equação 5). A análise é feita sob a hipótese nula (H<sub>0</sub>) de que os dados da série temporal não apresentam tendência, e a hipótese alternativa (H<sub>A</sub>), na qual os dados apresentam tendência na série

temporal. O teste de tendência aponta se há tendência positiva ou negativa de acordo com o teste S para um determinado nível de confiança.

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sinal}(x_j - x_k) \quad (5)$$

Em que,  $n$  é o número de dados;  $x_i$  e  $x_j$  são os valores de dados da série temporal ( $j > i$ ), respectivamente, e  $\text{sinal}(x_j - x_i)$  pode ser expresso por meio da Equação 6:

$$\text{sinal}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1; & x_j - x_i > 0 \\ 0; & x_j - x_i = 0 \\ -1; & x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (6)$$

Também foi utilizado o *Sen Slope* (Equação 7), que é um estimador para avaliar o declive da tendência. Essas análises vêm sendo muito utilizadas e são consideradas uma ferramenta eficiente de identificação de tendências em variáveis hidrológicas (PAULINO *et al.*, 2019).

$$\int \beta = \left( \frac{x_j - x_k}{j - k} \right), \text{ para } i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (7)$$

Em que,  $\beta$  é o estimador de declive de Sen. Quando os valores são positivos, a tendência é positiva e, quando os valores são negativos, a tendência é negativa; e,  $x_j$  e  $x_k$  são os valores dados nos tempos  $j$  e  $k$  ( $j > k$ ), respectivamente.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Análise estatística dos dados

A Tabela 3 apresenta a estatística descritiva para a evapotranspiração real acumulada de 8 dias, estimada pelo modelo SWAT e por sensoriamento remoto a partir do sensor MODIS, para sub-bacias representativas da BERJ. Das 29 sub-bacias delimitadas pelo modelo SWAT, foram selecionadas as sub-bacias 2, 5, 19 e 27, avaliando-se critérios como a área da sub-bacia (maiores e menores), distribuição espacial (sub-bacias da parte alta, média e baixa) e os diferentes usos do solo.

**Tabela 3.** Estatística descritiva dos dados de evapotranspiração advindos do sensor MODIS e do modelo SWAT

Sub-bacia	Área (km <sup>2</sup> )	Média	Mínimo	Máximo	DP	CV
Sub2-MODIS	0,16	9,89	1,53	36,92	6,75	0,68
Sub2-SWAT		10,43	0,00	37,67	8,05	0,77
Sub5-MODIS	1,20	12,99	1,93	51,43	8,86	0,68
Sub5-SWAT		10,07	0,00	36,95	7,75	0,77
Sub19-MODIS	1,31	13,78	1,01	40,73	8,79	0,64
Sub19-SWAT		11,42	0,00	36,74	8,47	0,74
Sub27-MODIS	0,30	13,40	0,99	44,73	8,26	0,62
Sub27-SWAT		10,07	0,00	33,68	7,77	0,77

DP – Desvio Padrão; CV- Coeficiente de Variação

Fonte: Autores.

Foram computadas para o período de 2003 a 2018, médias de ET variando entre 9,89 e 13,78 mm para os produtos acumulados MODIS de 8 dias, e entre 10,07 e 11,42 mm para a ET estimada pelo modelo SWAT. Os

valores máximos obtidos se mostraram superiores para a ET do MODIS em comparação com a ET do modelo SWAT, com exceção da sub-bacia 2, onde a ET calculada pelo modelo SWAT foi ligeiramente superior.

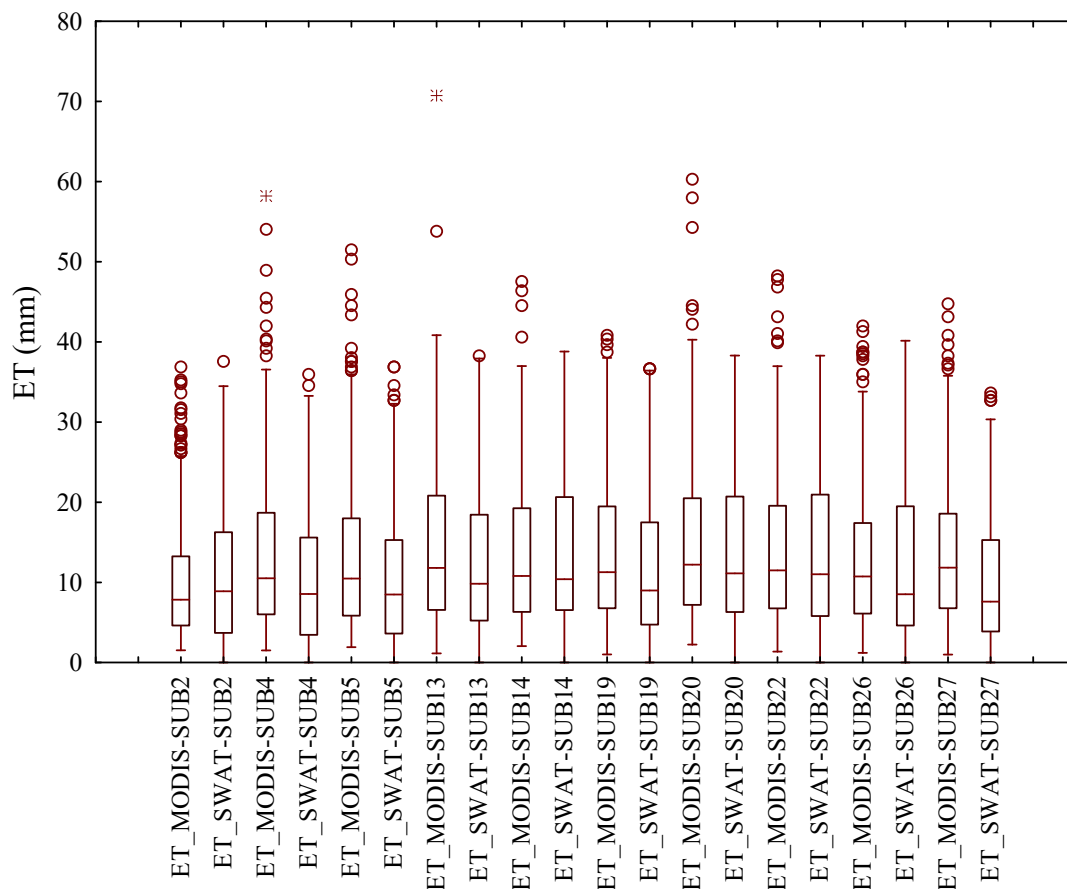


Os desvios padrão foram semelhantes para todos os dados, variando de 6,75 a 8,86 mm. De acordo com os critérios de Warrick e Nielsen (1980), todas as sub-bacias apresentaram uma alta variabilidade temporal de evapotranspiração.

Para uma melhor visualização do comportamento dos dados de ET, na Figura 2

estão apresentados os *box plots* para as ETs estimadas pelo modelo SWAT e pelo produto MODIS, para as sub-bacias 2, 4, 5, 13, 14, 19, 20, 22, 26 e 27. De uma forma geral, é possível observar um padrão semelhante na distribuição dos dados gerados pelo SWAT e os advindos do MODIS.

**Figura 2.** *Box plots* dos dados de evapotranspiração advindos do sensor MODIS e do modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT).



Fonte: Autores.

## 5.2 Análise da calibração do modelo SWAT

Os parâmetros utilizados na calibração do modelo SWAT com dados de evapotranspiração, bem como seus valores calibrados, são apresentados na Tabela 4. Tais

parâmetros são similares aos parâmetros obtidos em pesquisas realizadas em regiões semiáridas, como o estudo desenvolvido por Miranda (2017) na bacia hidrográfica do Rio Pontal, Pernambuco; Andrade *et al.* (2018), na bacia hidrográfica do Rio Mundaú,

Pernambuco; Magalhães *et al.* (2018) na mesma área do presente estudo, e Fontes Júnior e Montenegro (2019) na bacia do Riacho do Mimoso, também em Pernambuco.

Esses parâmetros são relacionados ao escoamento superficial, água subterrânea, e às culturas.

**Tabela 4.** Parâmetros utilizados para as calibrações com dados de evapotranspiração no modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT).

Parâmetro	Descrição	Inicial	Calibrado
CN2 (.mgt)	Curva-número de escoamento.	-	72,51
ALPHA_BF (.gw)	Fator alfa do fluxo de base (dias).	0,048	0,05
GWQMN (.gw)	Profundidade limite da água no aquífero raso para que ocorra o fluxo de retorno (mm).	0	700
GW_REVAP (.gw)	Coefficiente "revap" de água subterrânea.	0,02	0,2
EPCO (.hru)	Fator de compensação da absorção de água pelas plantas.	1,0	0,6
ESCO (.hru)	Fator de compensação da evaporação de água do solo.	0,95	0,6
CANMX (.hru)	Armazenamento máximo de água no dossel (mm).	0	10

Fonte: Autores.

O parâmetro Curva-Número é considerado um dos mais sensíveis e relevantes em processos de calibração (ARNOLD *et al.*, 2012). O CN varia em função do uso do solo, cobertura do solo e condições de umidade antecedente, sendo utilizado para estimar as perdas hidrológicas devido à infiltração, ao excesso pluviométrico (KAFFAS *et al.*, 2018; TANKSALI; SORAGANVI, 2020). No presente estudo, o CN calibrado consistiu em uma mudança relativa, ou seja, em porcentagem, o que preserva a sua heterogeneidade espacial. A mudança representou acréscimo de 6% nos valores originais do CN, resultando em um valor médio de 72,51.

O fator de compensação da evaporação de água do solo (ESCO) está relacionado com a profundidade necessária para atender aos requisitos de evaporação do solo. O parâmetro varia entre 0,01 e 1 e tem um valor padrão de 0,95. Uma diminuição do valor de ESCO

representa uma maior retirada de água dos níveis mais baixos da camada de solo para atender às demandas evaporativas (KAFFAS *et al.*, 2018), o que justifica um menor valor calibrado (0,60), uma vez que em regiões semiáridas a demanda evaporativa é maior.

O fator de compensação da absorção de água pelas plantas (EPCO) define a faixa de profundidade do solo usada para controlar a absorção de água pela planta, sendo considerado no intervalo entre 0,01 e 1. Quando o EPCO se aproxima de 1, as camadas mais profundas do solo contribuem para a absorção de água pela planta, e à medida que o EPCO se aproxima de 0, as demandas de absorção de água pela planta são atendidas pelas camadas superiores do solo (KAFFAS *et al.*, 2018; TANKSALI; SORAGANVI, 2020). A diminuição do EPCO padrão 1 para o valor calibrado de 0,6 pode estar relacionada à presença de solos rasos na região semiárida, onde as demandas de absorção não são

atendidas pelas camadas profundas, e sim pelas camadas superiores do solo. Miranda (2018) obteve EPCO calibrado de 0,24 para uma bacia hidrográfica da região semiárida de Pernambuco.

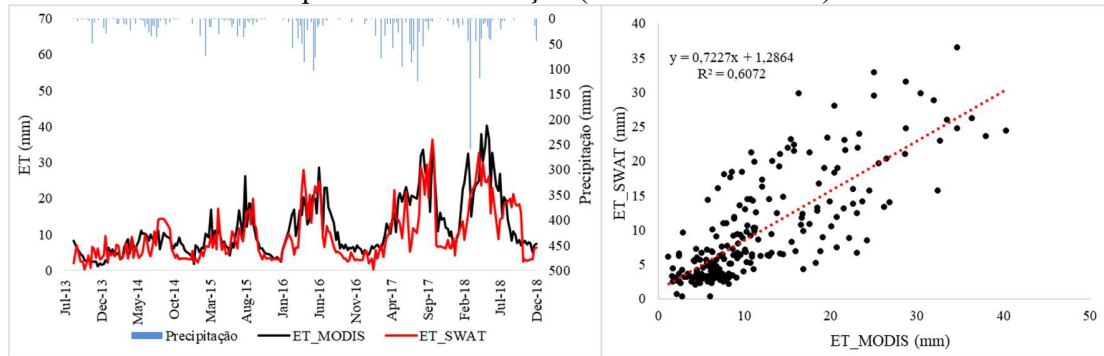
O parâmetro `GW_REVAP` é responsável por controlar o movimento da água do aquífero raso para as camadas superiores do solo, e quanto mais próximo de 0, representa que o movimento da água do aquífero para a zona não saturada fica restrito. Conforme o parâmetro se aproxima de 1, a taxa de evaporação aumenta, reduzindo assim o fluxo de base (KAFFAS *et al.*, 2018). No presente estudo, o `GW_REVAP` calibrado correspondeu ao valor de 0,2, indicando baixo movimento da água do lençol freático para as camadas superficiais do solo.

O `CANMX` representa a quantidade máxima de água que pode ficar retida dentro do dossel quando esse está completamente desenvolvido (mm). De acordo com Tobin & Bennett (2017), o `CANMX` representa um dos cinco parâmetros que impactam diretamente as evapotranspirações potencial e real, e os autores verificaram que esse parâmetro, juntamente com o `ESCO`, exibiu alta sensibilidade na calibração de uma bacia experimental em Oklahoma, EUA, a qual apresenta clima de transição entre úmido e semiárido, e precipitação média de 800 mm.

O valor de `CANMX` calibrado pelos autores variou entre 12,7 e 51,7 mm. Miranda (2017) encontrou valor calibrado de `CANMX` para uma bacia hidrográfica semiárida de 0,42 mm. O valor encontrado para o presente estudo consistiu em 10 mm.

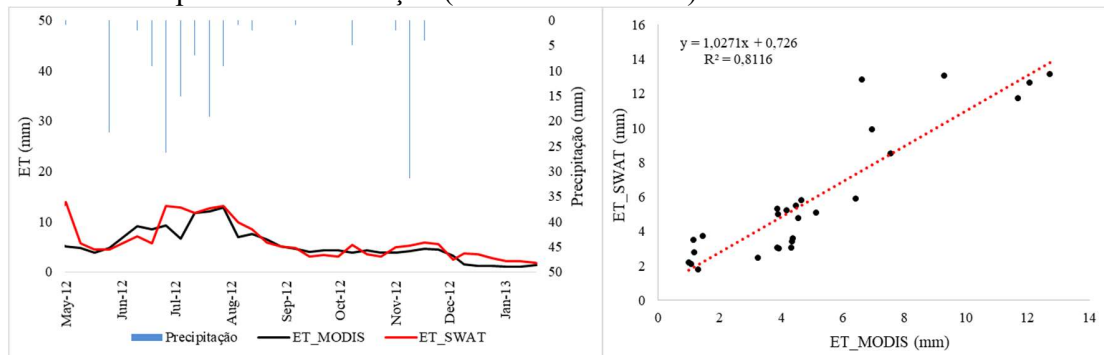
A Figura 3 apresenta os valores de ET simulados pelo modelo SWAT em comparação com os dados MODIS corrigidos no período de calibração (08/2013 a 12/2018). O período de validação (05/2012 a 02/2013) é apresentado na Figura 4. A comparação a nível de sub-bacia entre os dados de ET mensais simulados pelo modelo SWAT e os dados advindos do MODIS indicam boa concordância entre eles. Abiodun *et al.* (2018), realizando uma comparação entre os dados de evapotranspiração real do MODIS e os simulados pelo modelo SWAT, em uma bacia hidrográfica semiárida do Sul da Austrália, verificaram boa concordância entre os dados médios anuais, com uma diferença máxima menor que 13% e uma diferença média menor que 6%, no período de 2007 a 2013. No presente estudo, as diferenças médias entre os dados do modelo SWAT e do MODIS foram ainda menores, sendo menor que 0,02% no período de calibração, e menor que 0,01% no período de validação, para intervalos de tempo de 8 dias.

**Figura 3.** Precipitação e série temporal das evapotranspirações (ETs) acumuladas para 8 dias, simuladas pelo modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) e corrigidas do MODIS no período de calibração (08/2013 a 12/2018) na sub-bacia 19.



Fonte: Autores.

**Figura 4.** Precipitação e série temporal das evapotranspirações (ETs) acumuladas para 8 dias, simuladas pelo modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) e corrigidas do MODIS no período de validação (05/2012 a 02/2013) na sub-bacia 19.



Fonte: Autores.

Neste estudo, os valores de NS encontrados para a evapotranspiração (0,53 e 0,68, para calibração e validação, respectivamente) são equiparáveis àqueles encontrados por Miranda (2018), para a bacia hidrográfica do Rio Pontal, quando esse calibrou e validou a ET utilizando o modelo SWAT (0,61 e 0,63). Parajuli *et al.* (2017) encontraram valores de NS de até 0,80 na calibração e de 0,75 na validação do modelo SWAT utilizando apenas dados de evapotranspiração.

Os valores de  $R^2$  encontrados para a evapotranspiração foram de 0,61 e 0,81, para a calibração e validação, respectivamente.

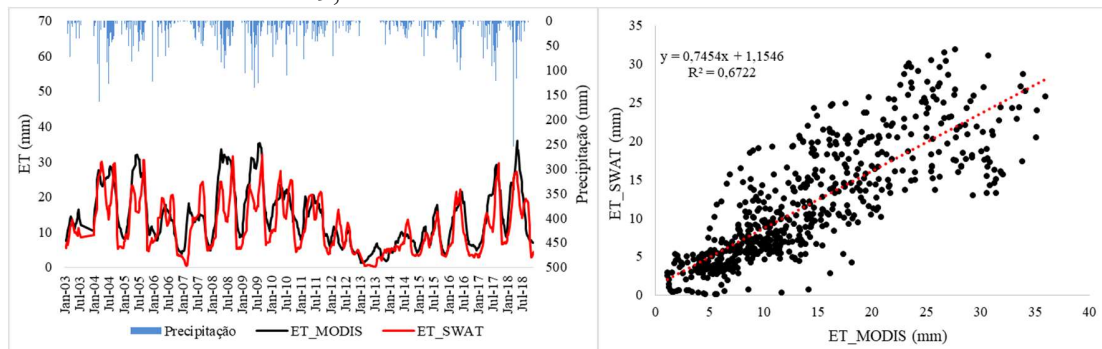
Parajuli *et al.* (2017) encontraram valores de  $R^2$  de até 0,82 na calibração e de 0,78 na validação do modelo SWAT utilizando apenas dados de evapotranspiração. Franco e Bonumá (2017), ao realizarem uma calibração multi-variável do modelo SWAT, com evapotranspiração proveniente de sensoriamento remoto, verificaram valores de  $R^2$  de 0,51 para a calibração, e de 0,80 para a validação. Entretanto, segundo os autores, o desempenho da simulação da evapotranspiração foi insatisfatório devido aos altos valores de PBIAS encontrados (entre 37,6 e 43,1 para a calibração; e entre 33,0 e 41,4 para a validação). Por outro lado, no

presente estudo, para a BERJ foram verificados valores de PBIAS de 16,7% para a calibração e de -17,2% para a validação com os dados de evapotranspiração, sugerindo que o modelo SWAT é capaz de simular satisfatoriamente a evapotranspiração real para a bacia experimental do Riacho Jatobá. No período de calibração, o PBIAS resultante indicou que o modelo SWAT subestimou os dados advindos do MODIS, enquanto no período de validação, os dados foram superestimados pelo modelo. Parajuli *et al.* (2017), avaliando o uso de dados de evapotranspiração advindos do sensor

MODIS no modelo SWAT em uma bacia hidrográfica do Mississippi, EUA, verificaram que o modelo superestimou a ET quando comparado com os dados do MODIS.

A Figura 5 apresenta o gráfico com a série temporal de 2003 a 2018 das ETs geradas pelos modelos SWAT e MODIS, na qual foram utilizadas médias móveis de cinco períodos de 8 dias. Tal análise mostrou um melhor ajuste, apesar da suavização da série, o que ocorreria em uma série mensal ou anual. Foi observado uma intensificação da sazonalidade bem como uma diminuição dos resíduos e dos efeitos dos valores extremos.

**Figura 5.** Precipitação e série temporal das evapotranspirações (ETs) simuladas pelo modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) e corrigidas do MODIS no período de 2003 a 2019 na sub-bacia 19, considerando média móvel.



Fonte: Autores.

Foi verificado que para a série suavizada, os parâmetros de performance  $R^2$ , NS e PBIAS melhoraram consideravelmente, apresentando valores de 0,68, 0,59 e 17,1, respectivamente, para toda série temporal avaliada. Para os períodos de calibração (08/2013 a 12/2018) e validação (05/2012 a 02/2013) os valores dos parâmetros de performance também melhoraram consideravelmente, obtendo-se  $NS=0,73$ ,  $R^2=0,78$  e  $PBIAS=16,5$  para o período de calibração e  $NS=0,80$ ,  $R^2=0,91$  e  $PBIAS=-14,7$  para o período de validação. Ao calibrar o modelo SWAT com evapotranspiração mensal, estimada a partir

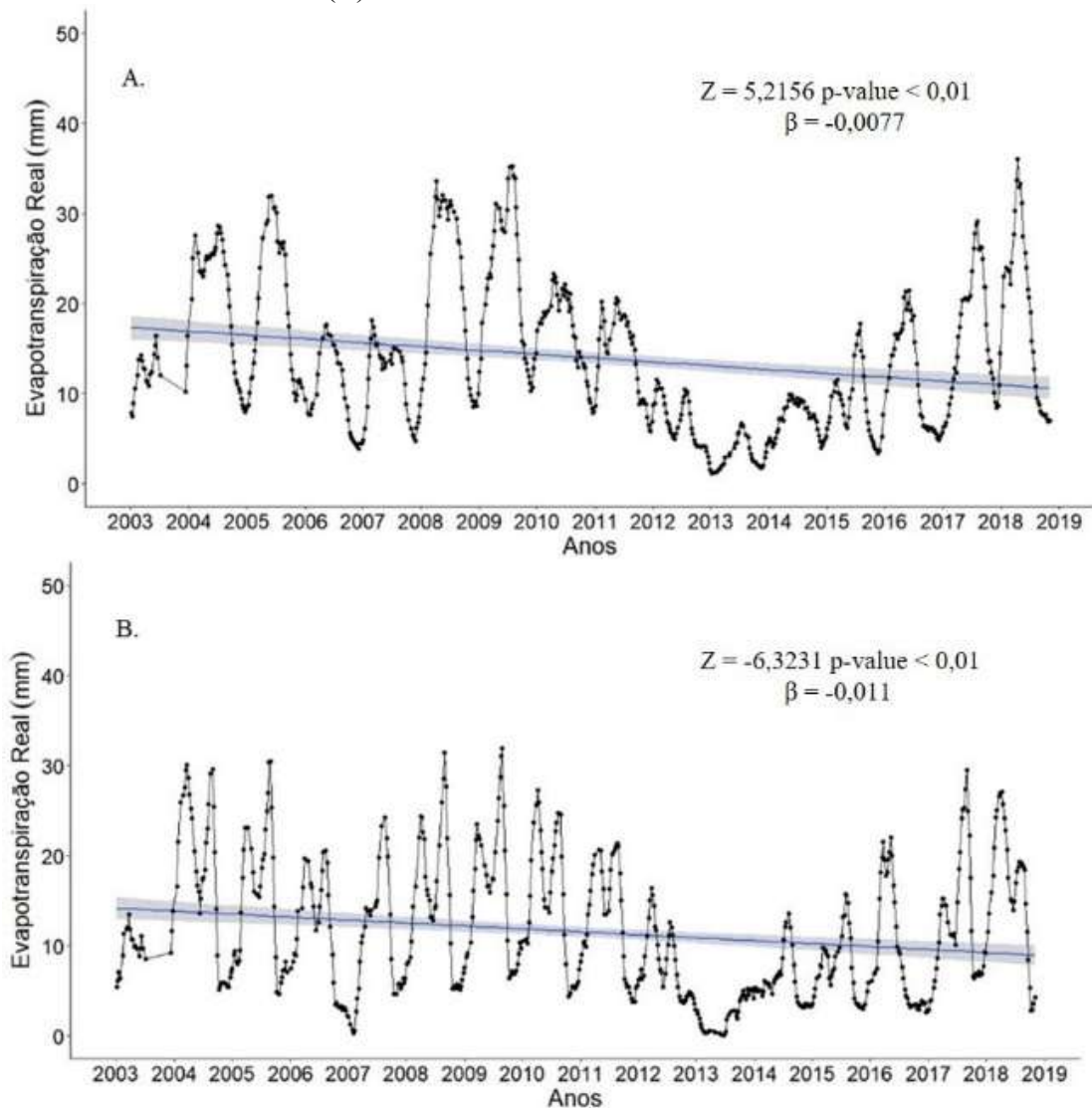
do MODIS, Siresena *et al.* (2020) encontraram valores de  $R^2$ , NS e PBIAS de até 0,86, 0,80 e -7,8, respectivamente, a nível de sub-bacia, o que remete a um bom desempenho do modelo quando trabalhado em maior passo de tempo.

### 5.3 Análise de tendência

A Figura 6 apresenta as análises de tendência de oito dias acumulados para a evapotranspiração real simulada pelo SWAT para a sub-bacia 19 (Figura 6A) e a evapotranspiração real observada pelo sensor MODIS para a sub-bacia 19 (Figura 6B) no

período de janeiro de 2003 a dezembro de 2018 na bacia do Jatobá.

**Figura 6.** Tendência da evapotranspiração simulada pelo modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) para a sub-bacia 19 (A), e tendência da evapotranspiração observada pelo sensor MODIS (B).



**Fonte:** Autores.

As análises de tendência pelo teste de Mann-Kendall para a evapotranspiração, apresentaram resultado significativo para a evapotranspiração acumulada em oito dias ( $P > 0,05$ ), apontando que há tendência para a evapotranspiração na sub-bacia 19. A

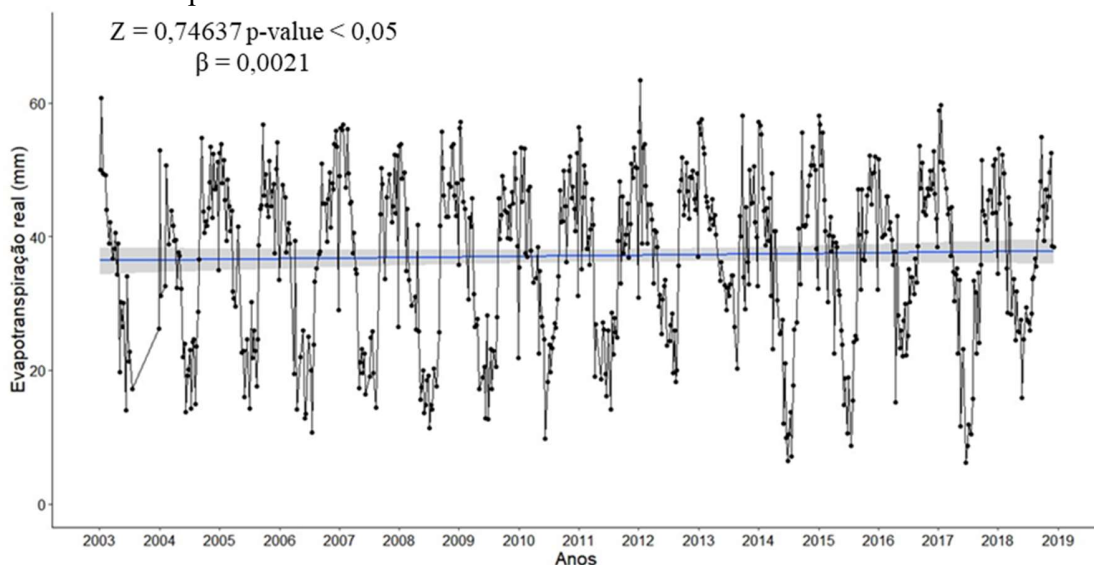
evapotranspiração real simulada pelo modelo SWAT apresentou resultado semelhante à evapotranspiração observada pelo sensor MODIS, os sinais negativos de  $Z$  refletem uma tendência descendente (PINHEIRO et al., 2013; XU et al., 2018) de  $-0,008$  mm/ 8 dias e

0,011 mm/8 dias, respectivamente. Cabral Júnior *et al.* (2019), Xu *et al.* (2018) e Costa *et al.* (2020) mostraram em seus trabalhos que a tendência negativa da evapotranspiração pode ser explicada pelo aumento da umidade causado por eventos extremos de precipitação

e com o aumento de chuvas consecutivas de 5 dias.

A Figura 7 apresenta a análise de tendência para as médias móveis de cinco períodos de 8 dias de evapotranspiração no período de 2003 a 2018 na bacia do Jatobá.

**Figura 7.** Tendência para as médias móveis de cinco períodos de 8 dias da evapotranspiração na Bacia Experimental do Riacho Jatobá.



**Fonte:** Autores.

A análise de tendência pelo método não paramétrico Mann-Kendall não apresentou tendência significativa ( $p > 0,05$ ) para as médias móveis de cinco períodos de 8 dias da evapotranspiração. Entretanto, diferentemente do resultado apresentado para a tendência acumulada em oito dias (Figura 6), a tendência para a média móvel apresentou sinal positivo para Z, indicando uma tendência crescente (XU *et al.*, 2018). Rocha Júnior *et al.* (2021) e Costa *et al.* (2020) ao analisarem a tendência da evapotranspiração no Nordeste brasileiro, observaram que tendências positivas de ET, podem estar associadas ao aumento da temperatura local e intensificação do processo de desertificação.

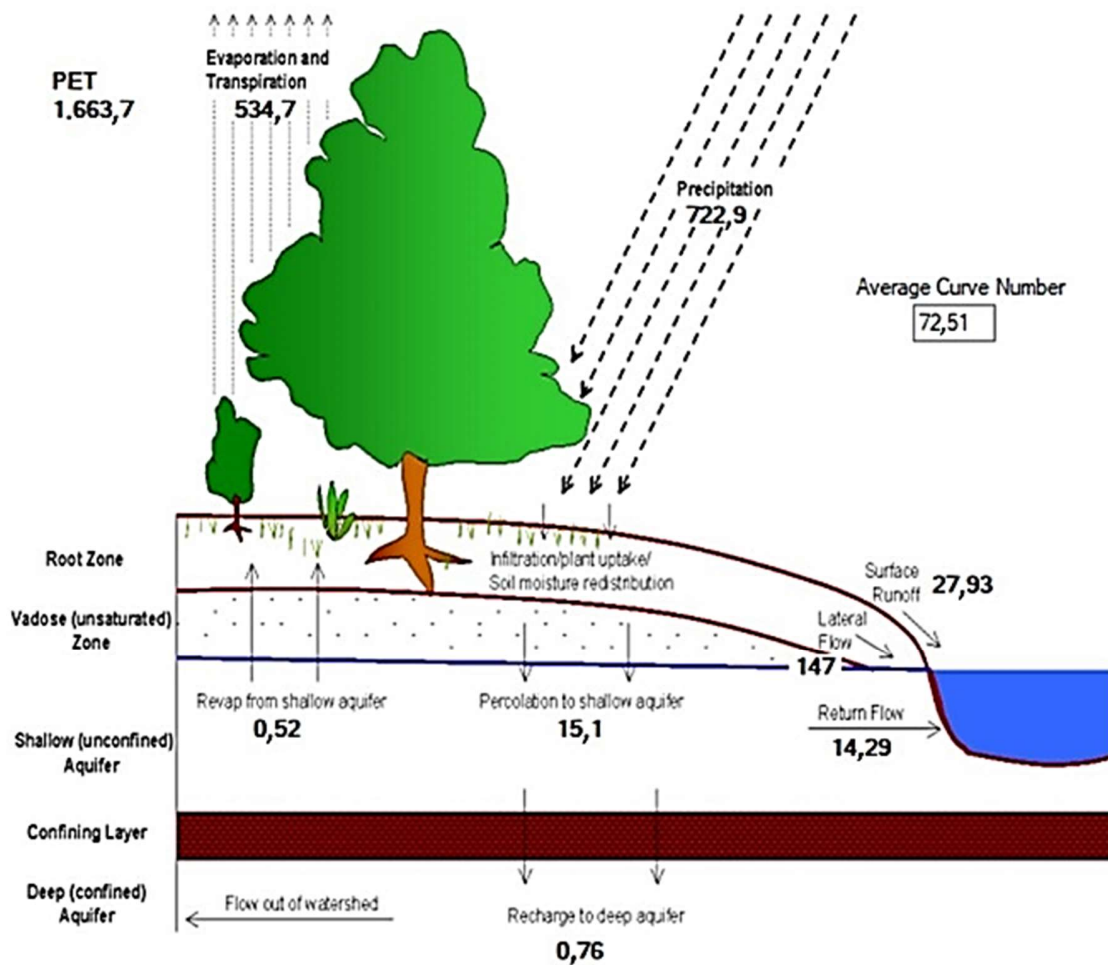
#### 5.4 Balanço hídrico da BERJ

A Figura 8 apresenta o resultado dos processos hidrológicos simulados pelo modelo SWAT para o período de 2000 a 2019. A precipitação anual média da BERJ foi igual a 722,9 mm, a evapotranspiração potencial anual média foi igual a 1.663,7 mm, com evapotranspiração real de 534,7 mm. A ascensão do aquífero raso anual média foi de 0,52 mm, e o escoamento superficial anual médio foi igual a 27,93 mm. Tais resultados indicam que de toda a precipitação ocorrida na bacia, 26% corresponde à precipitação efetiva, além disso, 74% da precipitação total retorna à atmosfera como evapotranspiração. Os valores médios do balanço hídrico verificados no presente estudo foram similares aos valores

encontrados por Magalhães *et al.* (2018) na mesma área de estudo, sendo que a evapotranspiração real verificada pelos autores foi superior ao do presente trabalho, com valor de 588,2 mm, além de uma precipitação média de 654,3 mm. Andrade *et*

*al.* (2017), realizando modelagem hidrológica sob escassez de dados em uma bacia do Alto Mundaú, Nordeste do Brasil, verificaram valores de ET de 674,2 mm, e precipitação média de 1.075 mm, no período compreendido entre 2000 e 2016.

**Figura 8.** Representação do balanço hídrico da Bacia Experimental do Riacho Jatobá (BERJ) simulado pelo modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) para o período de 2000 a 2019.



*Precipitation* = precipitação; *Average curve number* = Parâmetro Curva-Número médio; *Surface runoff* = escoamento superficial; *Lateral flow* = fluxo lateral; *Return flow* = fluxo de retorno; *Percolation to shallow aquifer* = percolação para o aquífero raso; *Revap from shallow aquifer* = ascensão da água do aquífero raso; *Recharge to deep aquifer* = recarga para o aquífero profundo.

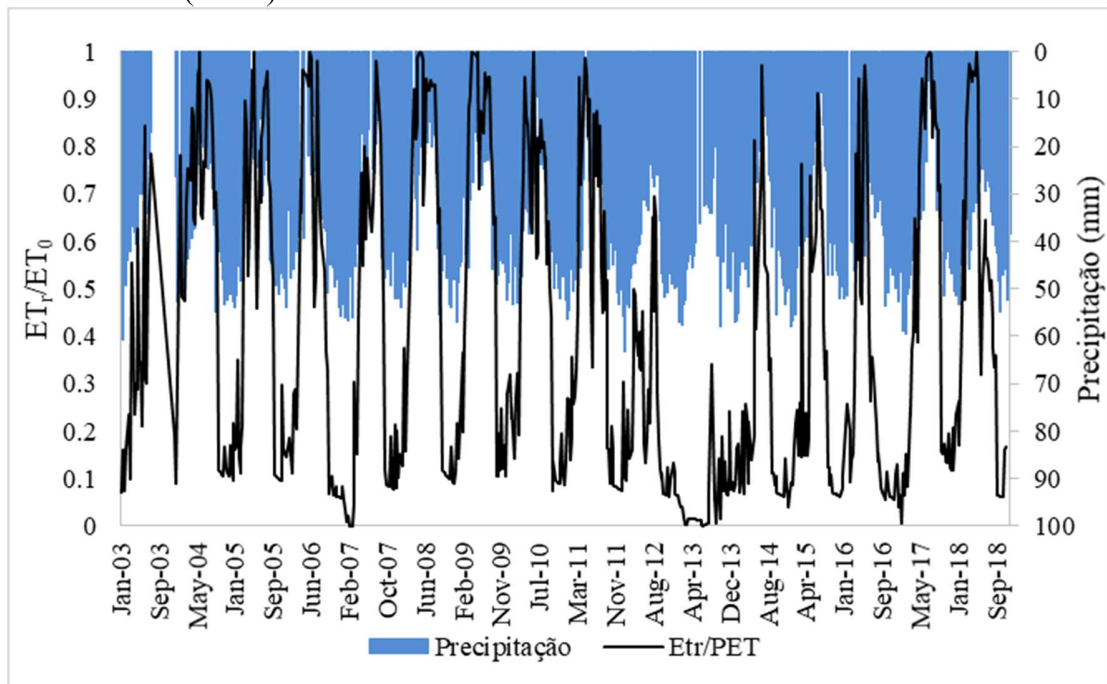
**Fonte:** Autores.



A Figura 9 apresenta a relação entre a evapotranspiração real e a evapotranspiração potencial, ambas acumuladas de 8 dias, estimadas pelo modelo SWAT e sua interação com a precipitação acumulada de 8 dias. A

relação  $E_{Tr}/ET_0$  é também chamada de fração evaporativa, pois refere-se a porcentagem da evapotranspiração potencial que está sendo evapotranspirada efetivamente (TEIXEIRA, 2018).

**Figura 9.** Precipitação e relação  $E_{Tr}/ET_0$  para a sub-bacia 19 da Bacia Experimental do Riacho Jatobá (BERJ).



Fonte: Autores.

É possível verificar uma forte influência da precipitação antecedente na evapotranspiração, sendo observado maiores índices de evapotranspiração quando se tem maiores precipitações antecedes. Teixeira (2018), ao avaliar a dinâmica da evapotranspiração em vegetação natural do Bioma Caatinga, relatou que os maiores valores da fração evaporativa nos períodos chuvosos e nos períodos secos (valores de  $E_{Tr}/ET_0$ ) oscilaram em torno de 20 a 40%.

## 6 CONCLUSÕES

A modelagem hidrológica utilizando o modelo SWAT produziu estimativas de evapotranspiração real consistentes com os valores advindos de sensoriamento remoto baseado no MODIS após refinamento de calibração dos parâmetros do modelo para a bacia experimental do Riacho Jatobá. Tais resultados destacam que a utilização de dados alternativos para a calibração do modelo SWAT, como a evapotranspiração baseada no sensoriamento remoto, é de grande relevância, especialmente, em bacias hidrográficas semiáridas, marcadas pela presença de eventos pluviométricos irregulares, rios intermitentes,

e pouca ou nenhuma geração de escoamento superficial; ainda, tais dados indiretos podem subsidiar estudos hidrológicos em bacias com carência de informações de campo.

Diante das análises de tendência para a evapotranspiração, foi verificado que há tendência decrescente da evapotranspiração real acumulada em 8 dias, tanto para a evapotranspiração real simulada quanto para a observada, indicando que o modelo SWAT representa bem os dados observados pelo sensor MODIS. Não foi identificada tendência para as médias móveis de cinco períodos de 8 dias da evapotranspiração real.

## 7 AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pela Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco – FACEPE (APQ 0300-5.03/17; APQ 0646-9.25/16; IBPG-0446-5.03/18), pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, e pela Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP. Os autores agradecem por todos os comentários importantes dos revisores anônimos, que contribuíram para uma atualização significativa do manuscrito.

## 8 REFERÊNCIAS

- ABIODUN, O. O.; GUAN, H., POST, V. E. A.; BATELAAN, O. Comparison of MODIS and SWAT evapotranspiration over a complex terrain at different spatial scales. **Hydrology and Earth System Sciences**, Gottingen, n. 22, p.2775–2794, 2018.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements – FAO**. Irrigation and Drainage. Rome. n. 56, p.297, 1998.
- ANDRADE, C. W. L.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; LIMA, J. R. S.; MONTENEGRO, A. A. A.; MAGALHÃES, A. G. Modelagem hidrológica sob escassez de dados na Bacia do Alto Mundaú, Nordeste do Brasil. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, Recife, v. 02 n. 03 p.227-238, 2017.
- ARAÚJO, A. L.; SILVA, M. T.; SILVA, B. B.; SANTOS, C. A. C.; AMORIM, M. R. B. Modelagem Simplificada Para Estimativa do Balanço de Energia à Superfície em Escala Regional (R-SSEB). **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v.32 n.3, p.433-446, 2017.
- ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J. R.; HANEY, E. B.; NEITSCH, S. L. 2012. **Input/Output Documentation version 2012**. Texas Water Resources Institute. 650p.
- BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. **Precipitação**. Hidrologia Ciência e Aplicação. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2013. Cap. 5. p. 177-241.
- BOUZADA, M. A. C. **Aprendendo decomposição clássica: tutorial para um método de análise de séries temporais**. TAC, Rio de Janeiro, v.2 n. 1, p. 1-18, 2012.

BRESSIANI, D. A.; GASSMAN, P. W.; FERNANDES, J. G.; GARBOSSA, L. H. P.; SRINIVASAN, R.; BONUMÁ, N. B.; MENDIONDO, E. M. Review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, Pequin, v. 8, n. 3, p. 9-35, 2015.

CABRAL JÚNIOR, J.B.; SANTOS E SILVA, C.M.; ALMEIDA, H.A.; BEZERRA, B.G.; SPYRIDES, M.H.C. Detecting linear trend of reference evapotranspiration in irrigated farming areas in Brazil's semiarid region. **Theoretical and Applied Climatology**, Wien, v. 138, n. 1-2, p. 215-225, 2019.

CARVALHO, A. A. D.; MONTENEGRO, A. A. A.; SILVA, H. P. D.; LOPES, I.; DE MORAIS, J. E.; DA SILVA, T. G. Trends of rainfall and temperature in Northeast Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.24 n.1, p. 15-23, 2020.

CHAGAS, A. M. S.; MONTENEGRO, A. A. A.; ALMEIDA, T. A. B.; SILVA, J. A. S. **Caracterização dos padrões de chuva na bacia do Riacho Jatobá no semiárido de Pernambuco**. XV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. 22 e 26 de novembro de 2020 em formato 100% online. p. 1 – 10, 2020.

CHUN, J.A.; BAIK, J.; KIM, D.; CHOI, M. A comparative assessment of SWAT-model-based evapotranspiration against regional-scale estimates. **Ecological Engineering**, Amsterdã, v. 122, p. 1-9, 2018.

COELHO, V. H. R., MONTENEGRO, S. M., ALMEIDA, C. N., SILVA, B. B., OLIVEIRA, L. M., GUSMÃO, A. C. V., FREITAS, E. S., MONTENEGRO, A. A. A. Alluvial groundwater recharge estimation in semi-arid environment using remotely sensed data. **Journal of Hydrology**, Amsterdã, v.548, 2017.

COSTA, R. L.; BAPTISTA, G. M. M.; GOMES, H. B.; SILVA, F. D. S.; ROCHA JÚNIOR, R. L.; SALVADOR, M. A.; HERDIES, D. L. Analysis of climate extremes indices over northeast Brazil from 1961 to 2014. **Weather and Climate Extremes**, Amsterdã, v. 28, p. 100254, 2020.

FERREIRA, P. S.; SOUZA, W. M. Modelagem hidroclimática e demográfica para estimativa da disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica do Rio Brígida. **Revista Brasileira de Climatologia**, São Paulo, v.27, 2020.

FILGUEIRAS, R.; ALMEIDA, T. S.; MANTOVANI, E. C.; S. H. B., FERNANDES-FILHO, E. I., DA CUNHA, F. F.; VENANCIO, L. P. Soil water content and actual evapotranspiration predictions using regression algorithms and remote sensing data. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 241, p. 106346, 2020.

FONTES JÚNIOR, R.; MONTENEGRO, A.A.A. Impact of land use change on the water balance in a representative watershed in the semiarid of the state of Pernambuco using the SWAT model. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.39, n.1, p.110-117, 2019.

FRANCO, A. C. L.; BONUMÁ, N. B., Multi-variable SWAT model calibration with remotely sensed evapotranspiration and observed flow, **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.22, 2017.

JOVANOVIĆ N., GARCIA C. L., BUGAN R. D. H., TEICH I.; RODRIGUEZ C. M. G. Validation of remotely-sensed evapotranspiration and NDWI using ground measurements at Riverlands, South Africa. **Water**, Basel, v.40 n.2, p. 211–220, 2014.

KAFFAS, K.; HRISSANTHOU, V.; SEVASTAS, S. Modeling hydromorphological processes in a mountainous basin using a composite mathematical model and ArcSWAT, **Catena**, Amsterdã, v. 162, p. 108-129, 2018.

LINS, F. A. C.; ARAÚJO, D. C. S.; SILVA, J. L. B.; LOPES, P. M. O.; OLIVEIRA, J. D. A.; SILVA, A. T. G. C. S. G. Estimativa de parâmetros biofísicos e evapotranspiração real no semiárido Pernambucano utilizando sensoriamento remoto. **Irriga**, Botucatu, v. 1, p. 64-75, 2017.

MAGALHÃES, A. G.; MONTENEGRO, A. A. A.; ANDRADE, C. W. L.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; FONTES JÚNIOR, R. V. P. Hydrological modeling of an experimental basin in the semiarid region of the Brazilian State of Pernambuco. **Ambiente e Água**, São Paulo, v. 13, 2018.

MELO, R. O.; MONTENEGRO, A. A. A. Dinâmica temporal da umidade do solo em uma bacia hidrográfica no semiárido Pernambucano. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.20, n.2, p.430-441, 2015.

MIRANDA, R. Q.; GALVÍNCIO, J. D.; MOURA, M. S. B.; JONES, C. A.; SRINIVASAN, R. Reliability of MODIS Evapotranspiration Products for Heterogeneous Dry Forest: A Study Case of Caatinga. **Advances in Meteorology**, Londres, p.1-14, 2017.

MIRANDA, R.Q. **Avaliação integrada da variação espacial e temporal do balanço hídrico na Caatinga utilizando o modelo hidrológico SWAT**. 2017. Tese (Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 122p.

MONTENEGRO, A. A. A.; RAGAB, R. Hydrological response of a Brazilian semi-arid catchment to different land use and climate change scenarios: a modelling study. **Hydrological Processes**, Bristol, v. 24, p. 2705-2723, 2010.

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. **Soil and water assessment tool: Theoretical documentation - version 2005**. Grassland, Soil and Water Research Laboratory - Agricultural Research Service; Blackland Research Center - Texas Agricultural Experiment Station, 2005. 494p.

PARAJULI, P. B.; JAYAKODY, P.; OUYANG, Y. Evaluation of Using Remote Sensing Evapotranspiration Data in SWAT. **Water Resources Management**, Athens v.32, n.3, p.985–996, 2017.

PAULINO, V. E. D. N.; STUDART, T. M. D. C.; CAMPOS, J. N. B.; PESTANA, C. J.; LUNA, R. M.; ALVES, J. M. B. Trends in Crop Reference Evapotranspiration and Climatological Variables Across Ceará State–Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v.34 n.1, p.79-88, 2019.

PINHEIRO, A.; GRACIANO, R. L. G.; SEVERO, D. L. Tendência das séries temporais de precipitação da região sul do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v.28, p.281-290, 2013.

ROCHA JÚNIOR, R. L. D.; SILVA, F. D. D. S.; COSTA, R. L.; GOMES, H. B.; GOMES, H. B.; SILVA, M. C. L. D.; PINTO, D. D. C. P.; HERDIES, D. L.; CABRAL JÚNIOR, J. B.; PITA-DÍAZ, O. Mudança de Longo Prazo e Regionalização da Evapotranspiração de Referência no Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v.35, n. Especial, p.891-902, 2021.

RUHOFF, A. L.; PAZ, A. R.; ARAGAO, L. E. O. C.; MU, Q.; MALHI, Y.; COLLISCHONN, W.; ROCHA, H. R.; RUNNING, S. W. Avaliação do algoritmo de evapotranspiração global MODIS usando medidas de covariância turbulenta e modelagem hidrológica na bacia do Rio Grande. **Hydrological Sciences Journal**, v.58, n. 8, p. 1658–1676. 2013.

SALAMA, M. A.; YOUSEF, K. M.; MOSTAFA, A. Z. Simple equation for estimating actual evapotranspiration using heat units for wheat in arid regions. **Journal of Radiation Research and Applied Sciences**, Cairo, v. 3, p. 418-427, 2015.

SILVA JUNIOR, V. P.; MONTENEGRO, A. A. A.; MELO, R. O. Temporal stability of soil moisture in an experimental watershed in the Pernambuco semiarid region. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 20, n. 10, p. 880-885, 2016.

SIRISENA, T. A.; MASKEY, S.; RANASINGHE, R. Hydrological Model Calibration with Streamflow and Remote Sensing Based Evapotranspiration Data in a Data Poor Basin. **Remote Sensing**, Basel, v. 12, n. 22, p. 3768, 2020.

TABARI, H.; GRISMER, M. E.; TRAJKOVIC, S. Comparative analysis of 31 reference evapotranspiration methods under humid conditions. **Irrigation Science**, v. 31, p. 107–117, 2013.  
TANKSALI, A.; SORAGANVI, V.S. Assessment of impacts of land use/land cover changes upstream of a dam in a semi-arid watershed using QSWAT. **Modeling Earth Systems and Environment**, 2020.

TEIXEIRA, L. M. N. **Evapotranspiração em vegetação natural do bioma Caatinga obtida por balanço hídrico no solo e por sensoriamento remoto**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 124p.

TOBIN, K. J.; BENNETT, M. E. Constraining swat calibration with remotely sense evapotranspiration data. **Journal of the American Water Resources Association**, Middleburg, v. 53, n. 3, p. 593 – 604, 2017.

VANINO, S.; NINO, P.; DE MICHELE, C.; BOLOGNESI, S. F.; D'URSO, G.; DI BENE, C.; PENNELLI, B.; VUOLO, F.; FARINA, R., PULIGHE, G.; NAPOLI, R. Capability of Sentinel-2 data for estimating maximum evapotranspiration and irrigation requirements for tomato crop in Central Italy. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdã, v. 215, p. 452-470, 2018.

VIANA, J. F. S. **Impactos das mudanças do uso da terra sobre o balanço hidrossedimentológico: bases para o gerenciamento dos recursos hídricos na Bacia do Rio Pirapama**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 200p.

WARRICK A.W.; NIELSEN, D.R. **Spatial variability of soil physical properties in the field**. In: HILLEL, D. (Ed.). Application of soil physics. New York: Academic Press, 1980.

XU, M.; KANG, S.; WU, H.; YUAN, X. Detection of spatio-temporal variability of air temperature and precipitation based on long-term meteorological station observations over Tianshan Mountains, Central Asia. **Atmospheric Research**, Amsterdã, v.203, p.141-163, 2018.