

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**

# **METEOROLOGIA**



**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Mariana da Silva de Siqueira**

**Estimativa da evapotranspiração para uma bacia  
hidrográfica no semiárido brasileiro**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO PARA UMA BACIA HIDROGRÁFICA  
NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

MARIANA DA SILVA DE SIQUEIRA

**ORIENTADOR:** PROF. DR. MADSON TAVARES SILVA

CAMPINA GRANDE - PB  
FEVEREIRO, 2020

MARIANA DA SILVA DE SIQUEIRA

**ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO PARA UMA BACIA HIDROGRÁFICA  
NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia do Departamento de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Campina Grande, seguindo às exigências para obtenção do Título de Mestre em Meteorologia.

Área de concentração: **AGROMETEOROLOGIA**

Subárea: **MODELAGEM AMBIENTAL**

CAMPINA GRANDE - PB  
FEVEREIRO, 2020

S618e

Siqueira, Mariana da Silva de.

Estimativa da evapotranspiração para uma bacia hidrográfica no semiárido brasileiro / Mariana da Silva de Siqueira. - Campina Grande, 2020.

96 f. : il. Color.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2020.

"Orientação: Prof. Dr. Madson Tavares Silva".

Referências.

1. Evapotranspiração. 2. Modelagem Hidrológica. 3. Validação. 4. Dados Orbitais. 5. Reanálise. 6. Comparação. I. Silva, Madson Tavares. II. Título.

CDU 551.573(043)

MARIANA DA SILVA DE SIQUEIRA

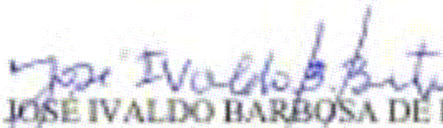
ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO PARA UMA BACIA  
HIDROGRÁFICA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 21/02/2020

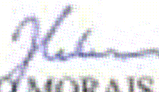
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. MADSON TAVARES SILVA  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. JOSÉ IVALDO BARBOSA DE BRITO  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. HUGO MORAIS DE ALCÂNTARA  
Unidade Acadêmica de Tecnologia do Desenvolvimento  
Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido  
Universidade Federal de Campina Grande

*A minha mãe Maria Braidá, meu pai Gilvan e meus irmãos Gilliard, Genilson e Gessica, que sempre estiveram ao meu lado, bem como meus amigos. Com muito carinho,*

### **Dedico**

*A todos os vovôs e vovós, em especial a Josefa Possidônea (minha mãe Zefa) e a Manoel André, Iracema Ussula e Antônio Galdino em memória, meus queridos avós,*

### **Ofereço**

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pela confiança em todas as minhas decisões e principalmente por contribuírem com amor e compreensão. Aos meus irmãos, pelo amor e amizade que nos une, agradeço a companhia e a forma carinhosa com que compartilhamos nosso tempo.

Ao professor Madson pela disponibilidade de orientação, incentivo, ensinamentos, e principalmente pela paciência e compreensão.

A minha madrinha Diana e a sua irmã Durciana, agradeço principalmente por dedicarem um espacinho do seu tempo para demonstrar com lindas ações todo carinho que sentem por mim.

A minha inesquecível professora e madrinha, Maria Tânia, por toda paciência e disponibilidade para transmitir seus conhecimentos em meio às dificuldades de ensinar a alunos com diferentes níveis de escolaridade em uma única sala de aula.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Meteorologia, por todos os ensinamentos, contribuição fundamental em todo conhecimento adquirido durante a vida acadêmica.

Aos funcionários, em especial a secretária Arilene e Dannilo pela paciência, solidariedade, dedicação, orientação e respeito.

A Meiry Siana, Izabele e Claudiana por todas as conversas e lições de vida e principalmente pela amizade.

Aos amigos Mayara e Eliton agradeço por toda contribuição para o entendimento de etapas importantes para realização deste trabalho.

Aos amigos Silânia, Kamila, Monalisa, Mércio, André, Izana, Tiago e Romero, pessoas maravilhosas que me proporcionaram experiências e aprendizados inesquecíveis. Em especial agradeço a Gabriella, Livia e Welinágila, pelos momentos de emoções, diversão e companheirismo.

A Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) pela estrutura cedida e também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo incentivo financeiro ao estudo.

Aos membros da banca examinadora por toda contribuição para correção deste trabalho.

Os meus passos são provas de tudo que me ensinou, agradeço por permitir que cada um deles fosse firme, por mostrar que novas escolhas são necessárias para nosso crescimento e por me fazer lembrar que escolhi ter o Senhor sempre ao meu lado.

# ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO PARA UMA BACIA HIDROGRÁFICA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

## RESUMO

A evapotranspiração - ET é um importante termo do ciclo da água que integra as demandas atmosféricas e as condições da superfície e uma das principais variáveis do ciclo hidrológico, como principal responsável pela perda de água nas bacias hidrográficas, a ET exerce uma grande influência sobre os processos hidrológicos. O principal objetivo deste estudo constituiu-se em avaliar o desempenho do modelo hidrológico SWAT *Soil and Water Assessment Tool* na simulação de estimativas de evapotranspiração para a Bacia Hidrográfica do rio Piranhas-Açu (BHRPA) no estado do Rio Grande do Norte, região semiárida Nordeste brasileiro. Os resultados da simulação hidrológica permitiram analisar o comportamento e a variabilidade sazonal da ET em escala de bacia. O modelo SWAT foi utilizado sem calibração e apresentou um bom desempenho na simulação da ET, oferecendo informações coerentes quando comparados aos estimados pelo método do balanço hídrico - BH, indicando que o mesmo um potencial expressivo para monitoramento espacial da ET de forma contínua, de modo que possa ser utilizado para determinar o comportamento do ciclo hidrológico. Os valores de ET da simulação com o SWAT e de mais três produtos de estimativas de métodos distintos foram comparados com estimativas pelo método do BH para localidades inseridas na BHRPA, também foi realizada a distribuição espacial da média dos valores acumulados anuais da simulação para as componentes hidrológicas. As estimativas de ET para o período de janeiro de 2002 a dezembro de 2011 utilizadas neste trabalho são oriundas de simulação hidrológica com o SWAT, de produtos de ET de escala global MOD16 (*Moderate resolution Imaging Spectroradiometer*) e GLDAS (*Global Land Data Assimilation System*) e do modelo regional R-SSEB (*Modelagem Simplificada Para Estimativa do Balanço de Energia à Superfície em Escala Regional*). Apesar das diferenças entre a ET oriunda dos métodos avaliados e a calculada pelo método do BH, no geral foi possível identificar que a simulação com o modelo SWAT apresentou resultados mais coerentes de evapotranspiração, indicando um potencial expressivo para monitoramento espacial da ET de forma contínua. Considerando a distribuição espacial das médias dos acumulados anuais das componentes hidrológicas, por meio da simulação hidrológica, descritas no trabalho, conclui-se podem ocorrer possíveis interferências da cobertura vegetal, uso e tipos de solo no processo de evapotranspiração, assim como influências da evapotranspiração nas componentes hidrológicas simuladas com o SWAT.

**Palavras-chave:** Modelagem hidrológica. Validação. Dados orbitais. Reanálise. Comparação.



## **EVAPOTRANSPIRATION ESTIMATION FOR A HYDROGRAPHIC BASIN IN THE BRAZILIAN SEMIARID**

### **ABSTRACT**

Evapotranspiration - ET is an important term in the water cycle that integrates atmospheric demands and surface conditions and one of the main variables of the hydrological cycle, as the main responsible for the loss of water in hydrographic basins, ET has a great influence on the hydrological processes. The main objective of this study was to evaluate the performance of the SWAT Soil and Water Assessment Tool hydrological model in the simulation of evapotranspiration estimates for the Piranhas-Açu River Basin (BHRPA) in the state of Rio Grande do Norte, Northeast semiarid region Brazilian. The results of the hydrological simulation allowed to analyze the behavior and seasonal variability of ET on a basin scale. The SWAT model was used without calibration and presented a good performance in the ET simulation, offering coherent information when compared to those estimated by the water balance method - BH, indicating that it has an expressive potential for continuously monitoring the spatial ET, that can be used to determine the behavior of the hydrological cycle. The ET values of the simulation with the SWAT and of three more products of estimates of different methods were compared with estimates by the method of BH for localities inserted in the BHRPA, the spatial distribution of the average of the annual accumulated values of the simulation for the components was also performed hydrological. The ET estimates for the period from January 2002 to December 2011 used in this work are derived from hydrological simulation with SWAT, from global scale ET products MOD16 (Moderate resolution Imaging Spectroradiometer) and GLDAS (Global Land Data Assimilation System) and the regional R-SSEB model (Simplified Modeling for Power Balance estimate the area in regional Scale). Despite the differences between the ET from the evaluated methods and the one calculated by the BH method, in general it was possible to identify that the simulation with the SWAT model showed more coherent evapotranspiration results, indicating an expressive potential for spatial monitoring of the ET continuously. Considering the spatial distribution of the averages of the annual accumulated hydrological components, through hydrological simulation, described in the work, it is concluded that there may be possible interferences of vegetation cover, use and types of soil in the evapotranspiration process, as well as influences of evapotranspiration in the hydrological components simulated with SWAT.

**Keywords:** Hydrological modeling. Validation. Orbital data. Reanalysis. Comparison.

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO 1

Figura 1 - Fluxograma da dissertação.....25

### CAPÍTULO 2

Figura 1 - Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Piranhas-Açu (BHRPA) com destaque as localidades das Estações meteorológicas e pluviométricas e pontos do CFSR.....37

Figura 2 - Mapa de delimitação para a BHRPA, trecho Rio Grande do Norte .....49

Figura 3 - Rede de drenagem para BHRPA, trecho Rio Grande do Norte.....50

Figura 4 - Mapa de declividade para a BHRPA, trecho Rio Grande do Norte. ....51

Figura 5 - Mapa de uso e ocupação do solo para a BHRPA, trecho Rio Grande do Norte.....52

Figura 6 - Mapa de distribuição dos tipos de solos para a BHRPA, trecho Rio Grande do Norte.  
.....53

Figura 7 - Variabilidade média do acumulado mensal (A) e do acumulado Sazonal (B) da distribuição da precipitação das estações selecionadas para BHRPA no período de janeiro de 2002 a dezembro de 2011.....54

Figura 8 - Variabilidade média do acumulado mensal (A) e do acumulado Sazonal (B) da distribuição da evapotranspiração estimada pelo SWAT para BHRPA no período de janeiro de 2002 a dezembro de 2011.....55

Figura 9 - Comparação das estimativas de evapotranspiração por modelagem e Balanço Hídrico para as sub-bacias das regiões de (A) Angicos, (B) Caicó, (C) Cruzeta, (D) Florânia e (E) Macau no período de janeiro de 2002 a dezembro de 2011.....58

Figura 10 - Séries temporais de precipitação, ET de referência - ETBH e simulada - ETSWAT para sub-bacias das regiões de (A) Angicos, (B) Caicó (C), Cruzeta, (D) Florânia e (E) Macau.  
.....60

### CAPÍTULO 3

Figura 1 - Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Piranhas-Açu (BHRPA) e distribuição espacial das localidades selecionadas.....75

Figura 2 - Matrizes de dispersão e correlação linear de Person entre os dados de ET do BH, SWAT, R-SSEB, MOD16 e GLDAS.....	81
Figura 3- Diagramas de Taylor ilustrando os resultados das estatísticas da comparação do acumulado mensal da ET entre SWAT, R-SSEB, MODIS, GLDAS e o método de referência BH para as localidades (A) Angicos, (B) Caicó, (C) Cruzeta, (D) Florânia e (E) Macau. ....	82
Figura 4 - Variação das estimativas de ET acumulada mensal (mm) pelos métodos BH, SWAT, R-SSEB, MOD16, GLDAS no período de janeiro 2002 a dezembro de 2011 para as localidades (A) Angicos, (B) Caicó, (C) Cruzeta, (D) Florânia e (E) Macau. ....	84
Figura 5 - Distribuição espacial média dos totais acumulados anuais das componentes hidrológicas PRECP (A) e WYLD (B) na região da Bacia do rio Piranhas-Açu, trecho Rio Grande do Norte. ....	86
Figura 6 – Distribuição espacial média dos totais acumulados anuais das componentes hidrológicas ETP (A) e ET (B) na região da Bacia do rio Piranhas-Açu, trecho Rio Grande do Norte. ....	87
Figura 7 – Distribuição espacial média dos totais acumulados anuais das componentes hidrológicas SURQ (A) e GWQ (B) na região da Bacia do rio Piranhas-Açu, trecho Rio Grande do Norte. ....	88
Figura 8 – Distribuição espacial média dos totais acumulados anuais das componentes hidrológicas SW (A) e PERC (B) na região da Bacia do rio Piranhas-Açu, trecho Rio Grande do Norte. ....	89

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO 2

Tabela 1- Critérios adotados de interpretação do desempenho dos métodos de estimativa pelo índice c.....	48
Tabela 2- Índices estatísticos obtidos para avaliação do desempenho do modelo SWAT.....	56

## LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

AGRL	Agricultural Land-Generic
BE	Balanço Energético
BH	Balanço Hídrico
BHRPA	Bacia Hidrográfica do Rio Piranhas-Açu
BHSRSF	Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco
c	Índice de exatidão
CAD	Capacidade de Água Disponível
CFSR	Climate Forecast System Reanalysis
CL	Calor Latente
CLM	Common Land Model
CNPM	Monitoramento por satélite
d	Índice de Concordância de Willmott
DJF	Dezembro, Janeiro e Fevereiro
EM	Erro Médio
EMA	Erro Médio Absoluto
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EMP	Erro Médio Percentual
EMPARN	Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte
ET	Evapotranspiração
ET <sub>o</sub>	Evapotranspiração de Referência
ET <sub>o</sub> -BC	Evapotranspiração de Referência- Blaney Criddle
ET <sub>o</sub> -HS	Evapotranspiração de Referência- Hargreave-Samani
ET <sub>o</sub> -L	Evapotranspiração de Referência- Linacre
ET <sub>o</sub> -PMFAO	Evapotranspiração de Referência-Penman-Monteith
ET <sub>o</sub> -RS	Evapotranspiração de Referência- Radiação Solar
ETP	Evapotranspiração Potencial
ETR	Evapotranspiração Real
FE	Fração Evaporativa
G	Fluxo de Calor no Solo
GLDAS	Global Land Data Assimilation System
GWQ	Escoamento Subterrâneo
H	Fluxo de Calor Sensível

HRUs	Unidades de Resposta Hidrológica
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
JJA	Junho, Julho e Agosto
Km <sup>2</sup>	Quilômetro por Metro Quadrado
LSM	Modelo de Superfície Terrestre
MAM	Março, Abril e Maio
MDE	Modelo Digital de Elevação
METRIC	Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration
mm	Milímetro
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NEB	Nordeste do Brasil
NOAH	Noah Land Surface Model
NS	Coefficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe
NSE	Nash e Sutcliffe
PAST	Pasture
Pbias	Porcentagem de viés
pcpSTAT	Precipitation Input Preprocessors
PM	Penman-Monteith
PRECP	Precipitação
R	Correlação de Pearson
R <sup>2</sup>	Coefficientes de Determinação
RbMSE	Raiz Quadrada do Erro Médio Quadrático
RMSE	Raiz do Erro Quadrático Médio
RN	Rio Grande do Norte
Rn	Saldo de Radiação
RNGB	Range-Brush
RNGE	Range-Grasses
R-SSEB	Modelagem Simplificada Para Estimativa do Balanço de Energia à Superfície em Escala Regional
SEBAL	Surface Energy Balance Algorithm for Land

SEBS	Surface Energy Balance System
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SIG's	Sistemas de Informações Geográficas
SOLARAV	Média de radiação solar diária para um determinado mês
SON	Setembro, Outubro e Novembro
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SSEB	Simplified Surface Energy Balance
SURQ	Escoamento superficial
SW	Quantidade de Água no Solo
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
URML	Residential-Med/Low Density
WYLD	Produção de Água Total da Bacia que Alcança o Canal

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	16
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	16
<b>2. JUSTIFICATIVAS</b> .....	17
<b>3. OBJETIVOS</b> .....	18
3.1. OBJETIVO GERAL .....	18
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
<b>4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	18
4.1. EVAPOTRANSPIRAÇÃO.....	18
4.2. SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO A ESTIMATIVA DA ET.....	20
4.3. <i>GLOBAL LAND DATA ASSIMILATION SYSTEM</i> (GLDAS).....	22
4.4. MODELAGEM AMBIENTAL APLICADA A ESTIMATIVA DA ET.....	23
<b>5. ESTRUTURA</b> .....	24
<b>6. REFERÊNCIAS</b> .....	25
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	33
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	35
<b>2. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	36
2.1. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	36
2.1.1. Localização.....	36
2.1.2. Clima .....	38
2.1.3. Geologia, geomorfologia e relevo .....	39
2.1.4. Solos.....	39
2.1.5. Vegetação .....	40
2.2. METODOLOGIA .....	40
2.2.1. Obtenção da ET pelo método do Balanço Hídrico .....	40
2.2.2. Simulações no modelo SWAT .....	41
2.2.3. Parâmetros estatísticos para avaliação do modelo.....	44
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	48
3.1. DISCRETIZAÇÃO DA BACIA E ANÁLISE MORFOMÉTRICA.....	48
3.2. ANÁLISE DA VARIABILIDADE DA PRECIPITAÇÃO E DAS ESTIMATIVAS DE ET POR MODELAGEM.....	54
3.3. VALIDAÇÃO DAS ESTIMATIVAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO.....	55
<b>4. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	61
<b>5. REFERÊNCIAS</b> .....	61



<b>CAPÍTULO 3</b> .....	71
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	73
<b>2. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	75
2.1. ÁREA DE ESTUDO.....	75
2.2. PRODUTOS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO .....	76
2.3. MEDIDAS ESTATÍSTICAS PARA AVALIAÇÃO DOS MODELOS .....	77
<b>2.3.1. Diagrama de Taylor</b> .....	78
<b>2.3.2. Desvio Padrão</b> .....	78
<b>2.3.3. Coeficiente de correlação linear de Pearson</b> .....	78
<b>2.2.4. Raiz do Erro Médio Quadrático e Raiz Quadrada da Média do Quadrado das Diferenças Centralizadas</b> .....	79
2.3. COMPONENTES DO BALANÇO HÍDRICO COM O MODELO SWAT .....	80
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	80
3.1. COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE ESTIMATIVAS DE ET .....	80
3.2. COMPONENTES DO BALANÇO HÍDRICO .....	85
<b>4. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	89
<b>5. REFERÊNCIAS</b> .....	90
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	96
<b>1. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	96
<b>2. RECOMENDAÇÕES</b> .....	96

## CAPÍTULO 1

### 1. INTRODUÇÃO

A evapotranspiração (ET) é um importante termo do ciclo da água que integra as demandas atmosféricas e as condições da superfície, é controlada pelo balanço de energia, pelo fornecimento de água à superfície através do processo de precipitação, pela demanda atmosférica e pelo suprimento de água do solo às plantas para o processo de evaporação e transpiração (BRAUN et al., 2001; ARAÚJO et al., 2007; CAVALCANTE JÚNIOR et al., 2010; HUO et al., 2013).

Como principal responsável pela perda de água nas bacias hidrográficas, a evapotranspiração exerce uma grande influência sobre os processos hidrológicos, sendo que, este componente está estreitamente relacionado com a dinâmica da umidade do solo, a recarga dos aquíferos e o escoamento superficial (LIANG et al., 2010). Avaliar a influência dos fatores climáticos na evapotranspiração favorece o entendimento dos impactos das alterações climáticas nos processos hidrológicos (ZHANG et al., 2011).

A evapotranspiração exhibe padrões espaciais e temporais muito complexos, que tornam a sua determinação em grande escala uma tarefa ambiciosa e desafiadora (BRAUN et al., 2001). É variável no espaço, devido à grande variabilidade na disponibilidade de água (distribuição das precipitações), características de solos e vegetação, e variável no tempo devido (influências do tempo e clima) à sazonalidade do clima (ALLEN et al., 2011a.).

As medidas e estimativas de ET incluem uma variedade de métodos, variando de monitoramento de água no solo, lisímetros, cintilômetros, medidas de fluxo baseados em covariância de vórtices turbulentos a estimativas usando dados meteorológicos e algoritmos que descrevem a energia da superfície e as características aerodinâmicas da vegetação, sendo assim, exigem metodologias que requerem o emprego de princípios e técnicas físicas relativamente complexas (ALLEN et al., 2011a.;2011b.).

Muitas das equações empregadas na estimativa da evapotranspiração são empíricas, o que as limita a serem usadas para locais e climas similares àqueles em que foram efetuadas suas determinações, e quando aplicadas em condições diferentes podem proporcionar grandes erros com consequências no manejo de produções agrícolas ou desperdício de recursos hídricos (ALENCAR et al., 2011; CAVALCANTE JÚNIOR et al., 2011).

Senay et al. (2011b) destacam que dependendo da disponibilidade de dados e da finalidade da estimativa da ET, diversos métodos podem ser utilizados para escala de bacia, favorecendo a compreensão da dinâmica do balanço hídrico, estes podem ser agrupados em três grandes classes: (1) medições pontuais que de alguma forma são regionalizadas; (2) aplicação

de dados meteorológicos e modelagem hidrológica; e (3) estimativas espacialmente explícitas baseadas em dados de sensoriamento remoto e modelagem.

Considerando a complexidade de estimativa do processo de evapotranspiração, o conhecimento da distribuição de solos, cobertura vegetal, relevo e precipitação, temperatura e umidade do ar e do solo para áreas de bacias permite identificar o comportamento de cada uma e verificar quais apresentam uma maior influência no processo de evapotranspiração.

## **2. JUSTIFICATIVAS**

A evapotranspiração além de ser um importante componente para estudos hidrológicos, influenciando nas trocas de energia e umidade entre superfície terrestre e a atmosfera, atua na dinâmica climática global e nos processos de produtividade primária de ecossistemas terrestres, uma vez que encontra-se diretamente ligada aos processos de transferência de energia, seu estudo permite a obtenção de informações importantes para o planejamento e gerenciamento do uso sustentável de recursos hídricos e agrícolas, bem como para estudos de mudanças climáticas (SCHIRMBECK, 2005; RUHOFF, et al., 2011; DJAMAN et al., 2015; MARTEL et al., 2018).

Todos os elementos do ciclo hidrológico, tais como precipitação, evapotranspiração, escoamento e fluxo de água subterrânea são afetados por mudanças nos fatores climáticos (ZHANG et al., 2015), cobertura vegetal e uso e ocupação do solo. O monitoramento preciso da evapotranspiração e suas componentes espacial e temporal representa um grande desafio para entendimento dos diversos processos energéticos e hidrológicos que ocorrem entre a superfície e a atmosfera em diferentes biomas (RUHOFF, 2011). Dessa forma, para as modelagens hídrica e agrícola, torna-se importante que a ET seja obtida com elevada frequência temporal, para a incorporação de sua dinâmica ao longo do tempo (TEIXEIRA et al., 2015).

O estudo da evapotranspiração assume ainda maior importância em regiões caracterizadas pela irregularidade espacial e temporal da precipitação, e pela escassez de reservas naturais de água, como nas regiões semiáridas do Nordeste do Brasil. Nessas regiões as perdas de água na evaporação e evapotranspiração são muito elevadas durante todo o ano (MAVI e TUPPER, 2004; MOURA, 2009). Além das incertezas provocadas pelo regime climático da região, os impactos das mudanças climáticas e alterações do uso do solo surgem como um agravante na vulnerabilidade ambiental dessas regiões.

A aplicação de metodologias que abrangem modelagem ambiental, e/ou técnicas de sensoriamento remoto, dados globais de reanálise com o objetivo de determinar ET, permite a obtenção de valores pontuais, sendo possível também realizar a sua distribuição espacial e

temporal, permitindo melhor avaliação dos resultados obtidos para áreas de estudo extensas e heterogêneas (SCHERER-WARREN e RODRIGUES, 2013).

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. OBJETIVO GERAL**

Avaliar a aplicabilidade da modelagem ambiental na simulação da evapotranspiração para uma bacia hidrográfica inserida região semiárida do Nordeste brasileiro por meio da utilização de dados de evapotranspiração calculado pelo método do Balanço Hídrico-BH, assim como analisar os ajustes das estimativas quando comparadas com produtos obtidos a partir de dados orbitais, e dados de fontes globais de reanálise.

#### **3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar a análise da bacia hidrográfica considerando seus aspectos físicos e morfológicos;
- Obter estimativas de evapotranspiração real por meio de modelagem hidrológica e aplicação do balanço hídrico;
- Avaliar a concordância dos resultados de evapotranspiração obtidos com a simulação mediante comparação com dados calculados através do Balanço Hídrico;
- Avaliar o ajuste entre as séries mensais de evapotranspiração, obtidas por meio de modelagem hidrológica, reanálise e dados orbitais;
- Analisar o comportamento espacial dos componentes hidrológicos resultantes da simulação e a sua relação com a evapotranspiração;

### **4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **4.1. EVAPOTRANSPIRAÇÃO**

A evapotranspiração é a combinação de dois processos, através dos quais a água é perdida, por um lado, da superfície do solo por evaporação e, por outro lado, da cultura por transpiração (ALLEN et al., 1998). Ambos os processos envolvem uma mudança na água do estado de líquido para vapor (MAVI E TUPPER, 2004).

A evaporação é o processo pelo qual a água é convertida da fase líquida para a fase de vapor (vaporização), sendo removida de uma variedade de superfícies evaporantes como:

oceanos, lagos, rios, pavimentos, solos e vegetação úmida, sendo dependente principalmente dos fatores: suprimento de energia externa, do grau de saturação do ar circundante e da velocidade do vento, além é claro, de disponibilidade de água (ALLEN et al., 1998; GIACOMONI, 2005). A transpiração consiste na vaporização da água líquida contida nos tecidos das plantas e a remoção do vapor à atmosfera (ALLEN et al., 1998).

Em estudos da dinâmica climatológica a evapotranspiração pode ser analisada em dois tipos, evapotranspiração de referência - ETo inicialmente introduzida com a denominação de evapotranspiração potencial - ETP e evapotranspiração real - ETR. Allen et al. (1998) recomendou o uso do termo ETo em vez de outras denominações como ETP devido a ambiguidade nas definições.

A ETP é definida como o processo de perda de água do sistema solo-planta para a atmosfera, sob condições padronizadas, através de uma área com extensa superfície natural, totalmente coberta por vegetação padrão, sem restrição hídrica para atender às necessidades da evaporação do solo e da transpiração, (CAMARGO e CAMARGO, 2000; CARVALHO et al., 2011). Segundo Allen, (1998) a ETo se refere a evapotranspiração em uma superfície cultivada com uma cultura de referência hipotética sob condições específicas com total exata disponibilidade de água, sendo parâmetros climáticos os únicos fatores que a afetam.

A evapotranspiração real (ETR) constitui a perda de água de uma superfície natural, em qualquer condição de umidade e de cobertura vegetal, podendo ser afetada por condições meteorológicas, dessa forma sua taxa pode ser calculada a partir de dados de energia solar, velocidade do vento, temperatura do ar, umidade atmosférica e dados climáticos (CAMARGO e CAMARGO, 2000; LIMA, 2008) e disponibilidade de água no solo e na planta. Sendo assim é controlada pelo balanço de energia, pela demanda atmosférica e pelo fornecimento de água do solo às plantas (MENDONÇA et al., 2003).

A estimativa da ET pode ser obtida usando vários métodos, sejam diretos ou indiretos, esses de acordo com Fernandes et al. (2010), se dividem em três grandes categorias: métodos baseados em física teórica, métodos semi-empíricos e métodos empíricos. A utilização de equações de estimativa que empregam métodos como de Penman-Monteith ETo-PMFAO, de Hargreave-Samani ETo-HS, Linacre ETo-L, de Blaney Criddle ETo-BC, da Radiação Solar ETo-RS, métodos de medições baseados no solo com lisímetros, cintilômetros, razão de Bowen, sistemas de fluxo baseados em covariância de vórtices turbulentos (método Eddy covariance) e balanço de água no solo, limitam-se à representarem valores pontuais para um local específico, ou seja espacialmente restrito ou homogêneo e não podendo representar valores em escala espacial (RUHOFF, 2011).

A aplicação de técnicas que abrangem modelagem ambiental, emprego de dados orbitais, dados globais de reanálise, se destaca por possibilitar além da obtenção de valores de ET local, estimativas para grandes áreas em amplas de escalas espaciais e temporais, surgindo como alternativa para avaliar a evapotranspiração escala, regional ou global.

As informações de ET além de fundamentais para entendimento do comportamento hidrológico de sistemas ambientais, avaliação e quantificação da produção de alimentos, rações, fibras e biocombustíveis, são usadas frequentemente como base ou evidência por gestores ambientais no gerenciamento, desenvolvimento e planejamento de políticas para uso e monitoramento de recursos hídricos, para parametrização de modelos de e para operar modelos de previsão de mudanças climáticas principalmente em regiões em que os recursos hídricos são escassos (ALLEN et al., 2011).

#### 4.2. SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO A ESTIMATIVA DA ET

Dados obtidos por sensoriamento remoto vêm sendo utilizados para obtenção de estimativas da ET a partir de algoritmos e modelos. Mu et al. (2011) destacam que o sensoriamento remoto é reconhecido como o meio mais viável para obter informações regionais de ET e distribuí-las espacialmente na superfície terrestre. Entre os métodos de estimativas de ET baseados em dados orbitais destacam-se os abordados em escala global por Mu et al. (2007; 2011), Rodell et al. (2004), regional e local por Bastiaanssen, (1995); Bastiaanssen et al. (2005), Allen et al. (2002), Allen et al. (2007a), Allen et al. (2007b), Senay et al. (2007) Senay et al. (2011a), Araújo (2014), Araújo et al. (2017).

A maioria dos métodos desenvolvidos para estimativas da ET que utilizam sensoriamento remoto ainda é muito dependente do uso de observações terrestres, dessa forma, a estimativa consistente para quantificação e espacialização da ET global atualizada com o sensoriamento remoto independente das observações de superfície continua sendo um desafio (NISHIDA et al., 2003).

Liaqat e Choi, (2017) destacam como principais abordagens para estimativa de ET baseadas em sensoriamento remoto as que incluem o método residual do balanço completo da radiação e da energia incidente sobre a superfície terrestre e o método com aplicação da equação de Penman-Monteith – PM com base na física que utiliza dados meteorológicos de superfície e globais de reanálise e de sensoriamento remoto. As principais vantagens da obtenção de dados via sensoriamento remoto orbital são a possibilidade de coleta de informações detalhadas com baixo custo para extensas áreas em escalas de tempo relativamente curto e quantificação de

parâmetros físicos da superfície terrestre com um fluxo quase contínuo de dados com alta resolução temporal e espacial (PAIVA et al., 2011).

O algoritmo para estimativas da ET proposto por Mu et al., (2007), melhorado por Mu et al. (2011), é aplicado para produzir dados de estimativas de evapotranspiração global fornecidos pelo produto MOD16 ET derivado de sensoriamento remoto usando dados do Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) desde o ano 2000 para 109,03 a 106 km<sup>2</sup> de área de terra com vegetação global, a 1 km<sup>2</sup> de resolução espacial em resoluções temporais de 8 dias, mensal e anual (MU et al., 2013).

A versão inicial do algoritmo MOD16 desenvolvida por Mu et al., (2007) para a estimativa da evapotranspiração de superfície em escala global foi fundamentada no modelo de sensoriamento remoto proposto por Cleugh et al. (2007) no qual a equação de Penman-Monteith - PM foi adaptada para a inserção de informações meteorológicas globais e de dados de sensoriamento remoto do MODIS (Terra e Aqua).

Os modelos SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*) (BASTIAANSSEN, 1995 e 1998), METRIC (*Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration*) (ALLEN et al., 2007a), SEBS (*Surface Energy Balance System*) (SU et al., 2001; 2002), SSEB (*Simplified Surface Energy Balance*) (SENAY et al., 2007) e R-SSEB (*Modelagem Simplificada Para Estimativa do Balanço de Energia à Superfície em Escala Regional*) (ARAÚJO, 2014) abrangem métodos baseados no balanço de energia para realizar estimativas dos fluxos de energia e da ET para grandes áreas.

Su et al., 2005 realizaram uma avaliação da capacidade do SEBS para previsão da evapotranspiração em escalas locais e regionais, usando dados in situ e meteorologia operacional, os resultados indicaram que o modelo foi capaz de representar com precisão o comportamento temporal da evapotranspiração na escala local. O modelo SEBS mostra-se muito promissor em aplicações em escalas regionais e maiores, usando dados de satélites e auxiliares em escalas correspondentes.

O desempenho do SSEB foi avaliado utilizando comparação com o METRIC (SENAY et al., 2011a) e com estimativas de ET baseadas em balanço hídrico (SENAY et al., 2011b), as comparações demonstrarem que a abordagem do modelo SSEB é promissora para conduzir estudos de monitoramento de recursos hídricos e de seca em escala de bacia hidrográfica em regiões com escassez de dados.

Araújo et al., (2017) aplicaram o R-SSEB para a região Nordeste do Brasil (NEB) com o intuito de comparar a ET obtida pelo algoritmo proposto por Araújo (2014), com dados de ET do produto MOD16, verificando que os resultados das estimativas do R-SSEB

apresentaram-se condizentes com a literatura e evidenciaram que a metodologia proposta possibilita operacionalizar o cômputo da ET em toda a região.

#### 4.3. *GLOBAL LAND DATA ASSIMILATION SYSTEM (GLDAS)*

As fontes globais de reanálise são conjuntos de dados meteorológicos, próprios para aplicações principalmente em ciências agrícolas, ecológicas, hidrológicas e ambientais, tanto para locais onde essas informações são escassas, quanto para regiões com disponibilidade de dados (JI et al., 2015).

A reanálise meteorológica é uma técnica de assimilação de dados para o desenvolvimento de conjuntos de informações meteorológicos, que combina modelos de simulação com observações irregularmente distribuídas no espaço e no tempo para obter a melhor estimativa do estado da atmosfera e da superfície terrestre em grade, (fornecendo previsão por meio das observações disponíveis e monitoramento contínuo do tempo e do clima em nível global) espacialmente completos e de longo prazo (DECKER et al., 2012; JI et al., 2015).

O modelo de reanálise *Global Land Data Assimilation System (GLDAS)* é um produto global que possibilita que diferentes lugares do planeta sejam comparados, usa majoritariamente observações derivadas de dados orbitais e in-situ com assimilação de dados terrestres obtidos de uma rede de estações climáticas (SOUZA, 2015). Consiste em estimativas de campos de estados e fluxos da superfície terrestre fornecendo conjuntos de dados contínuos em uma escala global baseados em Modelos de Superfície Terrestre, dados provenientes de estações meteorológicas distribuídos em todo o planeta e dados de satélites orbitais meteorológicos (RODELL et al., 2004).

Os produtos do GLDAS proporcionam aplicação em estudos de previsão de tempo e clima, suporte ao gerenciamento e investigações de alterações ambiental e dos recursos hídricos em escala global e regional, porém a sua avaliação vem sendo realizada apenas para vários parâmetros meteorológicos em regiões limitadas (JI et al., 2015), caso da evapotranspiração.

Xue et al. (2013) avaliaram as estimativas da evapotranspiração do GLDAS (ET) em duas bacias hidrográficas no Planalto do Tibete. Park e Choi (2014) utilizaram dados meteorológicos disponíveis para estimar em escala regional a evapotranspiração de referência na Península Coreana. Araújo et al. (2017) ao compararem os dados de evapotranspiração do GLDAS correspondentes ao modelo CLM (*Common Land Model*) do R-SSEB e do MOD16, constaram por meio do Teste F, que não houve diferença significativa entre os modelos para a região Nordeste do Brasil.



#### 4.4. MODELAGEM AMBIENTAL APLICADA A ESTIMATIVA DA ET

A modelagem ambiental se destaca por possibilitar a realização da predição de funcionamento de diversos sistemas naturais incluindo as bacias hidrográficas, na perspectiva de gerenciamento dos recursos hídricos é uma poderosa ferramenta para previsão hidrossedimentológica, tanto na avaliação dos impactos das alterações climáticas e de uso e ocupação do solo quanto na identificação e seleção de potenciais estratégias para gestão ambiental. Neste sentido, a utilização de modelos matemáticos de base física para a simulação ambiental pode auxiliar consideravelmente o entendimento da dinâmica de diversos processos hidrológicos, podem ser úteis no manejo de bacias hidrográficas, tanto para seu planejamento quanto para avaliar o impacto de mudanças no uso da terra (RANZINI, 2002).

A modelagem hidrológica e de qualidade da água e os Sistemas de Informações Geográficas (SIG's) têm evoluído para um ponto em que as vantagens de cada sistema podem ser totalmente integradas dentro de uma poderosa ferramenta para análise em bacias hidrográficas (MACHADO, 2002). Os estudos hidrológicos em bacias hidrográficas têm sido amplamente realizados a partir da necessidade de compreensão dos processos que controlam o movimento da água e sedimentos, e seus impactos sobre a disponibilidade e qualidade das águas (BLAINSKI et al., 2017).

Os modelos hidrológicos simulam a umidade entre atmosfera e superfície terrestre com base nos fluxos de massa, movimento e conservação de energia, para tanto necessitam descrever os processos dominantes adequadamente, e devem ser aplicáveis em áreas onde os solos e a vegetação variem espacialmente, buscando assim capturar o impacto da heterogeneidade na dinâmica dos processos simulados (RANZINI, 2002; YU et al., 2016; CHUN ET AL., 2018).

O modelo SWAT vem sendo aplicado em bacias hidrográficas de todo o mundo com diversas finalidades, a maioria dos estudos com o modelo visa calibrar, validar avaliar capacidade na simulação dos diversos processos ambientais que é capaz de simular, dentre outros buscam a sua aplicação em estudos ambientais para desenvolvimento, seleção, gerenciamento e planejamento estratégias para uso sustentável dos recursos naturais em escala de bacia.

Silva, (2013) realizou simulações com o modelo SWAT buscando avaliar o impacto causado pelas Áreas de Preservação Permanente e de áreas íngreme na quantificação do serviço ambiental hidrológico ligado as componentes hidrológicas e ao regime de vazões na bacia do rio Piracicaba e na sua sub-bacia, Ribeirão Posses. Taveira (2012) realizou a avaliação de alternativas de uso do solo por meio de simulação hidrossedimentológica usando o SWAT na bacia representativa de Sumé, Estado da Paraíba. Carvalho Neto et al. (2011) usaram o SWAT

para o estudo de cenários hipotéticos na Bacia Hidrográfica do Riacho dos Namorados no cariri paraibano com o objetivo de analisar o escoamento superficial e a produção de sedimentos para diferentes cenários de cobertura vegetal.

Alcântara, (2013) com o intuito de contribuir para seleção de estratégias de conservação e/ou recuperação de pequenas bacias hidrográficas do semiárido, na perspectiva dos recursos hídricos, aplicou modelagem ambiental utilizando o modelo SWAT para a sub-bacia Marias Pretas, integrante da bacia de Poço de Pedras sub-bacia da Bacia Representativa e Experimental do rio Taperoá, uma das bacias hidrográficas mais importantes do estado da Paraíba. Sousa et al., (2018) comparam componentes hidrológicas de uma sub-bacia da bacia hidrográfica do Rio Ipanema-PE resultantes de simulação usando modelo SWAT com componentes simuladas por meio de balanço hídrico.

Chen et al., (2017) avaliaram o desempenho das funções de auto-irrigação do SWAT em uma região de clima semiárido localizada no USDA-ARS CPRL perto de Bushland, Texas na simulação de técnicas de manejo de irrigação típicas da região Texas High Plains em Bushland. Abiodun et al., (2018) compararam estimativas da evapotranspiração de superfície em escala global do modelo de sensoriamento remoto MOD16 ET com as estimativas ET obtidas de simulação hidrológica com o modelo *Soil and Water Assessment Tool* SWAT em diferentes escalas espacialmente e temporalmente para um terreno complexo de clima semiárido na Bacia do Sixth Creek (Sixth Creek Catchment) no Sul da Austrália.

## **5. ESTRUTURA**

A estrutura proposta para o presente trabalho consiste em: apresentar no Capítulo 1 - breve introdução, justificativas, objetivo geral e objetivos específicos a serem abordados nos capítulos seguintes, revisão bibliográfica; o Capítulo 2 traz a caracterização da área de estudo, a descrição das informações necessárias para obtenção da ET com a aplicação do modelo hidrológico SWAT e com a realização do Balanço Hídrico, a análise dos aspectos físicos e morfológicos da bacia obtidos durante as etapas de simulação, avaliação da distribuição temporal da precipitação e das estimativas de ET por Modelagem e BH e ainda a validação dos resultados da modelagem quando comparados com os valores calculados pelo método do BH; o Capítulo 3 abordará a comparação do método de modelagem com produtos de sensoriamento remoto e dados de modelos globais de reanálise por meio da utilização de parâmetros estatísticos, avaliação da influência dos tipos de solos e de uso e ocupação do solo para os diferentes produtos de ET; Capítulo 4 às considerações finais e possíveis recomendações. O esquema da estrutura da dissertação é apresentado na Figura 1.

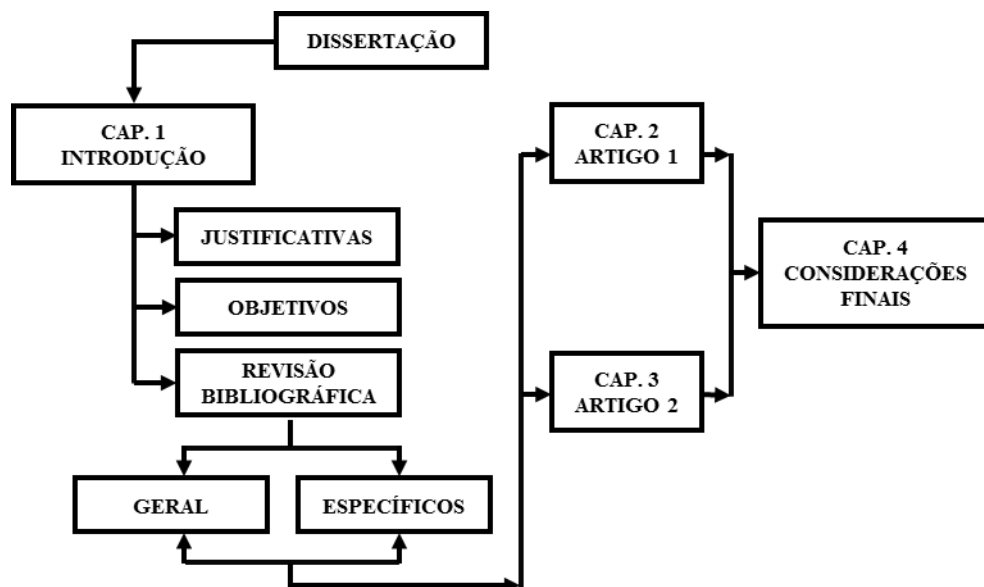


Figura 1 - Fluxograma da dissertação

## 6. REFERÊNCIAS

ABIODUN, O. O.; GUAN, H.; POST, VINCENT E. A.; BATELAAN, O. Comparison of MODIS and SWAT evapotranspiration over a complex terrain at different spatial scales. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 22, p. 2775–2794, 2018.

ALCÂNTARA, H. M. **Estabelecimento de metodologia para a conservação e Recuperação de pequenas bacias hidrográficas do semiárido**. Tese (Doutorado em Recursos Naturais). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2013. 143p.

ALENCAR, L. P.; DELGADO, R. C.; ALMEIDA, T. S.; WANDERLEY, H. S. Comparação de diferentes métodos de estimativa diária da evapotranspiração de referência para a região de Uberaba. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.6, n.2, p. 337-343. Recife, 2011.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; HOWELL, T. A.; JENSEN, M. E. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. **Agricultural Water Management** 98 p. 899-920, 2011a.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; HOWELL, T. A.; JENSEN, M. E. Evapotranspiration information reporting: II. Recommended documentation. **Agricultural Water Management** 98 p. 921–929, 2011b.

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; MORSE, A. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-Applications. **Journal of Irrigation and drainage**, v.133, n.4, p. 395-406, 2007a.

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-Model. **Journal of irrigation and drainage**. v.133, n.4, p. 380-394, 2007b.

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. **SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) advanced training and user's manual - Idaho implementation**. Idaho: Idaho University, 2002. 98 p.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56**. Rome-Italy, 1998.

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**, v. 32, p. 433-446, 2017.

ARAÚJO, A.L. **Operacionalização do balanço de energia e evapotranspiração em escala regional com dados de sensores orbitais**. Tese (Doutorado em Meteorologia). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2014. 101p.

ARAÚJO, W.F.; COSTA, S.A.A.; SANTOS, A.E. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) para Boa Vista-RR. **Caatinga**, Mossoró, v.20, n.4, p.84-88, 2007.

BASTIAANSEN, W. G. M.; NOORDMAN, E. J. M.; PELGRUM, H.; DAVIDS, G.; THORESON, B. P.; ALLEN, R. G. SEBAL Model with Remotely Sensed Data to Improve Water-Resources Management under Actual Field Conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.131, n.1, p. 85-93, 2005.

BASTIAANSEN, W.G.M. **Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain**. Wageningen Agricultural University. Ph.D. Thesis, Wageningen. 1995. 273 p.

BRAUN, P.; MAURER, B.; MULLER, G.; GROSS, P.; HEINEMANN, G.; SIMMER, C. An integrated approach for the determination of regional evapotranspiration using mesoscale modelling, remote sensing and boundary layer measurements. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 76, p. 83-105, 2001.

CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. Uma revisão analítica da evapotranspiração Potencial. **Bragantia**, v. 59, n.2, p.125-137, 2000.

CARVALHO, L. G.; RIOS, G. F. A.; MIRANDA, W. L.; CASTRO NETO, P. Evapotranspiração de referência: Uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 3, p. 456-465. Goiânia, 2011.

CARVALHO NETO, J. G. C.; SRINIVASAN, V. S.; RUFINO, I. A. A. Simulação hidrossedimentológica, analisando dois MDES, de duas pequenas sub-bacias no cariri paraibano utilizando o modelo swat. **Revista Geográfica Acadêmica** v.5, n.1, 2011. ISSN 1678-7226.

CAVALCANTE JÚNIOR, E. G.; OLIVEIRA, A. D.; ALMEIDA, B. M.; SOBRINHO, J. E. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para as condições do semiárido Nordeste. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 32, n.1, p. 1699-1708. Londrina, 2011.

CHEN, Y.; MAREK, G. W.; MAREK, T. H.; BRAUER, D. K.; SRINIVASAN, R. Assessing the Efficacy of the SWAT Auto-Irrigation Function to Simulate Irrigation, Evapotranspiration, and Crop Response to Management Strategies of the Texas High Plains. **Water**, v. 9, 2017.

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

DECKER, M.; BRUNKE, M. A.; WANG, K.; SAKAGUCHI, K.; ZENG, X.; BOSILOVICH, M. G. Evaluation of the reanalysis products from GSFC, NCEP, and ECMWF Using Flux Tower Observations. **Journal of Climate**, v.25, p. 1916-1944, 2012.

DJAMAN, K.; BALDE, A.B.; SOW, A.; MULLER, B.; IRMAK, S.; N'DIAYE, M.K.; MANNEH, B.; MOUKOUMBIA, Y. D.; FUTAKUCHI, K.; SAITO, K. Evaluation of sixteen reference evapotranspiration methods under Sahelian conditions in the Senegal River valley. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 3, p. 139-159, 2015.

FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A. B.; PAZ, R. L.; AMORIM, A. O. Evapotranspiração- Uma Revisão sobre os Métodos Empíricos. **Embrapa Arroz e Feijão**. Santo Antônio, 2010. 44 p. - (Documentos / Embrapa Arroz e Feijão, ISSN 1678-9644; 263).

GIACOMONI, M. H. **Estimativa da evapotranspiração regional por meio de técnicas de sensoriamento remoto integradas a modelos de balanço de energia: aplicação no Estado do Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005. 193 p.

HUO, Z. L.; DAI, X. Q.; FENG, S. Y.; KANG, S. Z.; HUANG, G. H. Effect of climate change on reference evapotranspiration and aridity index in arid region of China. **Journal of Hydrology** 492, p. 24-34, 2013.

JI, L.; SENAY, G. B.; VERDIN, J. P. Evaluation of the Global Land Data Assimilation System (GLDAS) Air Temperature Data Products. **Journal of Hydrometeorology**, v.16. p. 2463-2480, 2015.

KHAN, M. S.; LIAQAT, U. W.; BAIK, J.; CHOI, M. Stand-alone uncertainty characterization of GLEAM, GLDAS and MOD16 evapotranspiration products using an extended triple collocation approach. **Agricultural and Forest Meteorology**, 252, p.256-268, 2018.

LIANG, L.; LI, L.; LIU, Q. Temporal variation of reference evapotranspiration during 1961–2005 in the Taoer River basin of Northeast China. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.150, p.298-306, 2010.

LIAQAT, U. W.; CHOI, M. Accuracy comparison of remotely sensed evapotranspiration products and their associated water stress footprints under different land cover types in Korean peninsula. **Journal of Cleaner Production**, v. 155, p.93-104, 2017.

LIMA, W. P. **Hidrologia florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas**. 2º edição. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Departamento de Ciências Florestais. Piracicaba, 2008. 253 p.

MACHADO, R. E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. Tese (Doutorado em Agronomia), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba, 2002. 154 p.

MARTEL, M.; GLENN, A.; Wilson, H.; Kröbel, R. Simulation of actual evapotranspiration from agricultural landscapes in the Canadian Prairies. **Journal of Hydrology: Regional Studies** 15, p.105 -118, 2018.

MAVI, H.S.; TUPPER, G.J. Agrometeorology - **Principles and Applications of Climate Studies in Agriculture**. Food Products Press, New York, 2004. p. 364.

MENDONÇA, J. C.; SOUSA, E. F.; BERNARDO, S.; DIAS, G. P.; GRIPPA, S. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) na região Norte Fluminense, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.2, p. 275-279. Campina Grande, 2003.

MOURA, A. R. C. **Estimativa da evapotranspiração de referência em bacia experimental na Região Nordeste**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos), Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2009. 115 p.

MU, Q.; HEINSCH, F. A.; ZHAO, M.; RUNNING, S. W. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. **Remote Sensing of Environment**, v. 111, p. 519-536, 2007.

MU, Q.; ZHAO, M.; RUNNING, S. W. Improvements to a MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration Algorithm. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, p. 1781-1800, 2011.

NISHIDA, KENLO; NEMANI, RAMAKRISHNA R.; RUNNING, STEVEN W.; AND GLASSY, JOSEPH M. An Operational Remote Sensing Algorithm of Land Surface Evaporation. Ecosystem and Conservation Sciences Faculty Publications. **Journal of Geophysical Research**, v.108, 2003.

PAIVA, C. M.; TSUKAHARA, R. Y.; FRANÇA, G. B.; NICACIO, R. M. **Estimativa da evapotranspiração via sensoriamento remoto para fins de manejo de irrigação**. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, INPE. Curitiba, 2011. p. 0101-0107.

PARK, J.; CHOI, M. Estimation of evapotranspiration from ground-based meteorological data and global land data assimilation system (GLDAS). **Stoch Environ Res Risk Assess**, v. 29, p. 1963–1992, 2015.

RANZINI, M. **Modelagem hidrológica de uma microbacia florestada da Serra do Mar, SP, com o modelo TOPMODEL-simulação do comportamento hidrológico em função do corte raso**. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo. São Carlos, 2002.

RODELL, M.; HOUSER, P. R.; JAMBOR, U.; GOTTSCHALCK, J.; MITCHELL, K.; MENG, C.-J.; ARSENAULT, K.; COSGROVE, B.; RADA KOVICH, J.; BOSILOVICH, M.; ENTIN, J. K.; WALKER, J. P.; LOHMANN, D.; TOLL, D. The Global Land Data Assimilation System. **Bull. American Meteorological Society**, 85, p. 381–394. 2004.

RUHOFF, A. L. **Sensoriamento remoto aplicado à estimativa da evapotranspiração em biomas tropicais**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Porto Alegre, 2011. 162 p.

RUHOFF, A. L.; ARAGÃO, L. E.; COLLISCHONN, W.; ROCHA, H. R.; MU, O.; RUNNING, S. **MOD16: Desafios e limitações para a estimativa global de evapotranspiração**. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, INPE, p. 5124-5131. Curitiba, 2011.



SCHERER-WARREN, M.; RODRIGUES, L. N. **Estimativa de evapotranspiração real por sensoriamento remoto: procedimento e aplicação em pivô central**. Embrapa Cerrados. Planatina, 2013. 36 p.

SCHIRMBECK, J. **Estimativa da evapotranspiração regional em área de ocorrência do Sistema Aquífero Guarani – Vale do Rio dos Sinos – RS: uma aplicação de técnicas de sensoriamento remoto**. Dissertação (Mestrado). Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós Graduação em Geologia. São Leopoldo, 2005. 110p.

SENAY G. B.; BUDDE, M. E.; VERDIN J. P. Enhancing the Simplified Surface Energy Balance (SSEB) Approach for Estimating Landscape ET: Validation with the METRIC model. **Agricultural Water Management**, v.98, p. 606-618, 2011a.

SENAY, G. B.; BUDDE M. E.; VERDIN, J. P.; MELESSE, A. M. A coupled remote sensing and simplified surface energy balance (SSEB) approach to estimate actual evapotranspiration from irrigated fields. **Sensors** v.7, p.979-1000, 2007.

SENAY, G. B.; LEAKE, S.; NAGLER, P. L.; ARTAN, G.; DICKINSON, J.; CORDOVA, J. T.; GLENN, E. P. Estimating basin scale evapotranspiration (ET) by water balance and remote sensing methods. **Hydrological Processes**, v.25, p. 4037-4049, 2011b.

SILVA, J. M. **O serviço ambiental e hidrológico das áreas de proteção permanente: um estudo de caso com modelagem numérica em pequena e mesoescala na bacia do Rio Piracicaba**. Tese (Doutorado em ciências atmosféricas). São Paulo, 2013.

SOUSA, W. S.; VIANA, J. F. S.; SILVA, R. R.; IRMÃO, R. A. Estimativa do balanço hídrico de uma sub-bacia da Bacia Hidrográfica do Rio Ipanema com o Modelo SWAT. **Journal of Environmental Analysis and Progress**. v. 3, n. 1, p.146-154, 2018.

SU, H.; MCCABE, M. F.; WOOD, E. F.; SU, Z.; PRUEGER, J. H. Modeling evapotranspiration during SMACEX: comparing two approaches for local and regional scale prediction. **Journal of Hydrometeorology**. v.6, p.910-922, 2005.

SU, Z. A Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes from point to continental scale, In: *Advanced Earth Observation – Land Surface Climate*, Z. Su and Jacobs, C. (Eds.). Publications of the National Remote Sensing Board (BCRS), USP-2, 01-02. 184pp, 2001.

SU, Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. **Hydrology and Earth System Sciences**. v.6, p.85–100, 2002.

TAVEIRA, I. M. L. M. Avaliação de alternativas de uso do solo através de simulação hidrossedimentológica da bacia representativa de Sumé com o modelo SWAT. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2012.

TEIXEIRA, A. H. de C.; LEIVAS, J. F.; ANDRADE, R. G.; HERNANDEZ, F. B. T. **Determinação da evapotranspiração através de imagens de satélites de diferentes resoluções com e sem a banda termal**. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, INPE, p. 5423-5430. João Pessoa, 2015.

XUE, B.-L.; WANG, L.; LI, X.; YANG, K.; CHEN, D. SUN, L. Evaluation of evapotranspiration estimates for two river basins on the Tibetan Plateau by a water balance method. **Journal of Hydrology**, v. 492, p. 290–297, 2013.

YU, X.; LAMAČOVÁ, A.; DUFFY, C.; KRÁM, P.; HRUSKA, J. Hydrological model uncertainty due to spatial evapotranspiration estimation methods. **Computers & Geosciences**, n.90, p. 90–101, 2016.

ZHANG, K.; PAN, S.; ZHANG, W.; XU, Y.; CAO, L.; HAO, Y.; WANG, Y. Influence of climate change on reference evapotranspiration and aridity index and their temporal-spatial variations in the Yellow River Basin, China, from 1961 to 2012. **Quaternary International** 380-381, p. 75-82, 2015.

ZHANG, S. H.; LIU, S. X.; MO, X. G.; SHU, C.; SUN, Y.; ZHANG, C. Assessing the impact of climate change on potential evapotranspiration in Aksu River Basin. **Journal of Geographical Science** v. 21, n.4, p. 609-620, 2011.

## CAPÍTULO 2

### APLICAÇÃO DO MODELO SWAT NA SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PIRANHAS-AÇU NO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE

#### RESUMO

Diversos problemas são enfrentados para a realização de estudos que tratam da quantificação da evapotranspiração (ET) em unidades experimentais, a modelagem tem se destacado por possibilitar a realização da predição de funcionamento de diversos sistemas naturais incluindo as bacias hidrográficas, surgindo como uma alternativa para obtenção de estimativas da ET. O presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho do modelo hidrológico SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) por meio de análise de índices estatísticos, na simulação da ET para a bacia hidrográfica do Rio Piranhas-Açu (BHRPA), Rio Grande do Norte, diante da ausência da calibração de parâmetros de sensibilidade. As informações para área da bacia utilizadas na simulação neste estudo são referentes a topografia, com a utilização do Modelo Digital de Elevação (MDE) disponibilizado pela EMBRAPA, dados climatológicos do *Climate Forecast System Reanalysis (CFSR)*, do *The National Centers for Environmental Prediction (NCEP)*, disponíveis no Global Weather Data for SWAT, classes de solos e as características de uso e ocupação obtidas a partir dos Mapas de Solos e de Cobertura e uso da Terra do Brasil adquiridos junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE. Para validação dos resultados da simulação hidrológica foram obtidos os valores de ET por meio do balanço hídrico (BH) para cinco localidades inseridas na área de estudo. Por meio da análise da variabilidade mensal e sazonal foi possível verificar os maiores totais de precipitação e de ET simulada da série avaliada, na estação de outono, com média de 414,14 mm/estação, para precipitação e de 211,44 mm/estação, para ET, enquanto as estações de inverno e primavera são caracterizadas pelo registro dos menores acumulados, para precipitação os valores não ultrapassam 100 mm/estação. Os valores do coeficiente de Nash e Sutcliffe (NSE) variaram de Satisfatório (0,61) a Muito Bom (0,82), para o índice de desempenho (c) os valores variaram de Bom (0,67) a Muito Bom (0,81), para todas as localidades foi obtido índice de correlação (r) Forte. Os resultados dos índices estatísticos EM e Pbias evidenciam a subestimativa da ET simulada em relação a calculada pelo BH. Diante do exposto constatou-se que o modelo hidrológico SWAT utilizado sem calibração apresentou um bom desempenho para simulação da ET para a BHRPA.

**Palavras-chave:** Modelagem hidrológica. Semiárido. Estimativa. Validação.

# **APPLICATION OF SWAT MODEL TO ESTIMATE EVAPOTRANSPIRATION IN THE CATCHMENT AREA OF RIVER PIRANHASAÇU IN THE STATE OF RIO GRANDE DO NORTE**

## **ABSTRACT**

Several problems are faced to carry out studies that deal with the quantification of evapotranspiration (ET) in experimental units, the modeling has stood out for making it possible to perform the prediction of the functioning of several natural systems including hydrographic basins, emerging as an alternative to obtain of ET estimates. The present work aimed to evaluate the performance of the SWAT (Soil and Water Assessment Tool) hydrological model through the analysis of statistical indices, in the ET simulation for the hydrographic basin of the Piranhas-Açu River (BHRPA), Rio Grande do Norte, in the absence of calibration of sensitivity parameters. The information for the basin area used in the simulation in this study is related to topography, using the Digital Elevation Model (MDE) provided by EMBRAPA, climatological data from the Climate Forecast System Reanalysis (CFSR), from The National Centers for Environmental Prediction (NCEP), available on the Global Weather Data for SWAT, soil classes and the characteristics of use and occupation obtained from the Soil and Land Coverage and Use Maps of Brazil acquired from the Brazilian Institute of Geography and Statistics-IBGE. To validate the results of the hydrological simulation, the ET values were obtained through the water balance (BH) for five locations in the study area. Through the analysis of the monthly and seasonal variability, it was possible to verify the highest precipitation and simulated ET totals of the evaluated series, in the autumn season, with an average of 414.14 mm / season, for precipitation and 211.44 mm / season, for ET, while the winter and spring seasons are characterized by the record of the smallest accumulated, for precipitation the values do not exceed 100 mm / season. The values of the Nash and Sutcliffe coefficient (NSE) varied from Satisfactory (0.61) to Very Good (0.82), for the performance index (c) the values varied from Good (0.67) to Very Good (0.81), for all locations, a correlation index (r) Strong was obtained. The results of the statistical indices EM and Pbias show the underestimation of the simulated ET in relation to that calculated by the BH. Given the above, it was found that the SWAT hydrological model used without calibration performed well for simulating ET for BHRPA.

**Keywords:** Hydrological modeling. Semiarid. Estimate Validation.

## 1. INTRODUÇÃO

A evapotranspiração é definida como um elemento climatológico fundamental, que corresponde ao processo oposto da precipitação e também expressa na mesma unidade em milímetros por tempo (PEREIRA et al., 1997). A energia solar e a disponibilidade de água são condições necessárias para sustentar a evapotranspiração (ALLEN et al., 1998). Além de ser influenciada por vários fatores do clima local a evapotranspiração é afetada por condições da superfície terrestre (ZHANG et al., 2009).

Diversos problemas são enfrentados para a realização de estudos que tratam da quantificação da evapotranspiração em unidades experimentais, como as dificuldades de monitoramento, a variabilidade espacial e temporal das variáveis que afetam o processo e os custos das coletas dos dados terrestres em curto e longo prazo, além da falta de recursos humanos para a coleta e tratamento dos dados (LIMA et al., 2001).

A modelagem tem se destacado por possibilitar a realização de diagnóstico e predição de funcionamento de diversos sistemas naturais incluindo as bacias hidrográficas. Os modelos distribuídos de base física vêm sendo amplamente utilizados em estudos de avaliação do comportamento e impactos das mudanças do uso do solo e suas influências nos processos de perdas de água e de solo como: escoamentos superficial e subterrâneo, desprendimento, transporte e deposição de sedimentos em bacias hidrográficas (SILVA e SANTOS, 2008).

Os modelos matemáticos são ferramentas muito importantes e úteis para diagnóstico e previsão ou simulação nos processos hidrológicos e sedimentológicos (SRINIVASAN et al., 2003). Segundo Tripathi et al. (2003) entre os modelos aplicados para modelagem ambiental, o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) é o mais, utilizado com sucesso na simulação do escoamento, das cargas de sedimentos e da qualidade da água de pequenas bacias hidrográficas.

O modelo SWAT, desenvolvido com o objetivo de avaliar o efeito do uso do solo no escoamento, no transporte de sedimento e na qualidade da água em bacias hidrográficas, tem se destacado por ser uma ferramenta eficaz capaz de simular processos hidrológicos, transporte de contaminantes, processos de perdas de água e de solo, e para avaliar o comportamento e os efeitos de mudanças climáticas, mudança no uso da terra e práticas de gestão dos recursos hídricos em diferentes condições ambientais (BRIGHENTI et al., 2016; ABBASPOUR et al., 2015).

Por ser um modelo de base física e que considera a variabilidade espacial e temporal de processos hidrológicos apresenta-se em grande destaque, e vem sendo largamente utilizado em diversas partes do mundo, pois permite diagnosticar e prever impactos gerados por alterações de uso e ocupação do solo no meio urbano e rural (CARVALHO NETO et al., 2011). Para o

Nordeste Brasileiro, entre outros, destacam-se os trabalhos de Carvalho Neto (2011), Taveira (2012), Alcântara (2013), Silva (2014), Silva et al. (2015), Silva et al. (2016), Silva et al. (2017) e Silva et al. (2018).

Dentre estudos realizados para avaliação da aplicabilidade do modelo SWAT no Brasil que consideraram a simulação do processo de evapotranspiração real, destacam-se os trabalhos de Salles (2012) para a bacia hidrográfica do Ribeirão Pipiripau, região hidrográfica do Paraná; Castro (2013), na bacia do Alto Rio Jardim, porção sudeste do Distrito Federal (bacia experimental), uma bacia agrícola típica do bioma cerrado; Santos et al. (2018), para analisar o balanço hídrico da sub-bacia do rio Arapepó, no Estado do Pará; Melo Neto (2013), em que o modelo SWAT foi aplicado a bacia hidrográfica do Ribeirão Jaguará e a microbacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, localizadas no sul de Minas Gerais, considerando diferentes discretizações quanto ao número de sub-bacias e número de camadas do perfil do solo; e de Carvalho Neto (2011), em duas unidades experimentais e em toda área da Bacia do Riacho dos Namorados no Cariri Paraibano.

A utilização dessa ferramenta de simulação surge como uma alternativa para obtenção de estimativas da evapotranspiração em escala local e regional, auxiliando na geração de informações não comumente disponíveis, importantes para estudos sobre sua dinâmica e comportamento, bem como para o processo de tomada de decisões, com intuito de gerenciamento e planejamento de recursos hídricos.

Desta forma, o presente trabalho visa a sua aplicação, para obtenção de estimativas mensais de evapotranspiração para a sub-bacia do Rio Piranhas-Açu no Rio Grande do Norte, buscando verificar o desempenho do modelo SWAT na avaliação do processo de evapotranspiração diante da ausência da calibração de parâmetros de sensibilidade, através de análise de índices estatísticos de qualidade do ajuste.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO**

#### **2.1.1. Localização**

A bacia hidrográfica do Rio Piancó-Piranhas-Açu encontra-se localizada na região semiárida do Nordeste brasileiro, entre as latitudes  $-7^{\circ}52'14''$  e  $-5^{\circ}25'17''$  e entre as longitudes  $-38^{\circ}47'32,6''$  e  $-36^{\circ}8'4,6''$ , seu território está inserido nos estados da Paraíba (60%) e do Rio Grande do Norte (40%). É a maior unidade da Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental,

com área total de drenagem de 43.683 km<sup>2</sup>, equivalente a cerca 15% da sua área total (ANA, 2016; ANA, 2018).

A área da bacia inserida no Estado do Rio Grande do Norte Nordeste do Brasil (Figura 2) foi selecionada para avaliação do desempenho do modelo hidrológico SWAT na simulação da evapotranspiração.

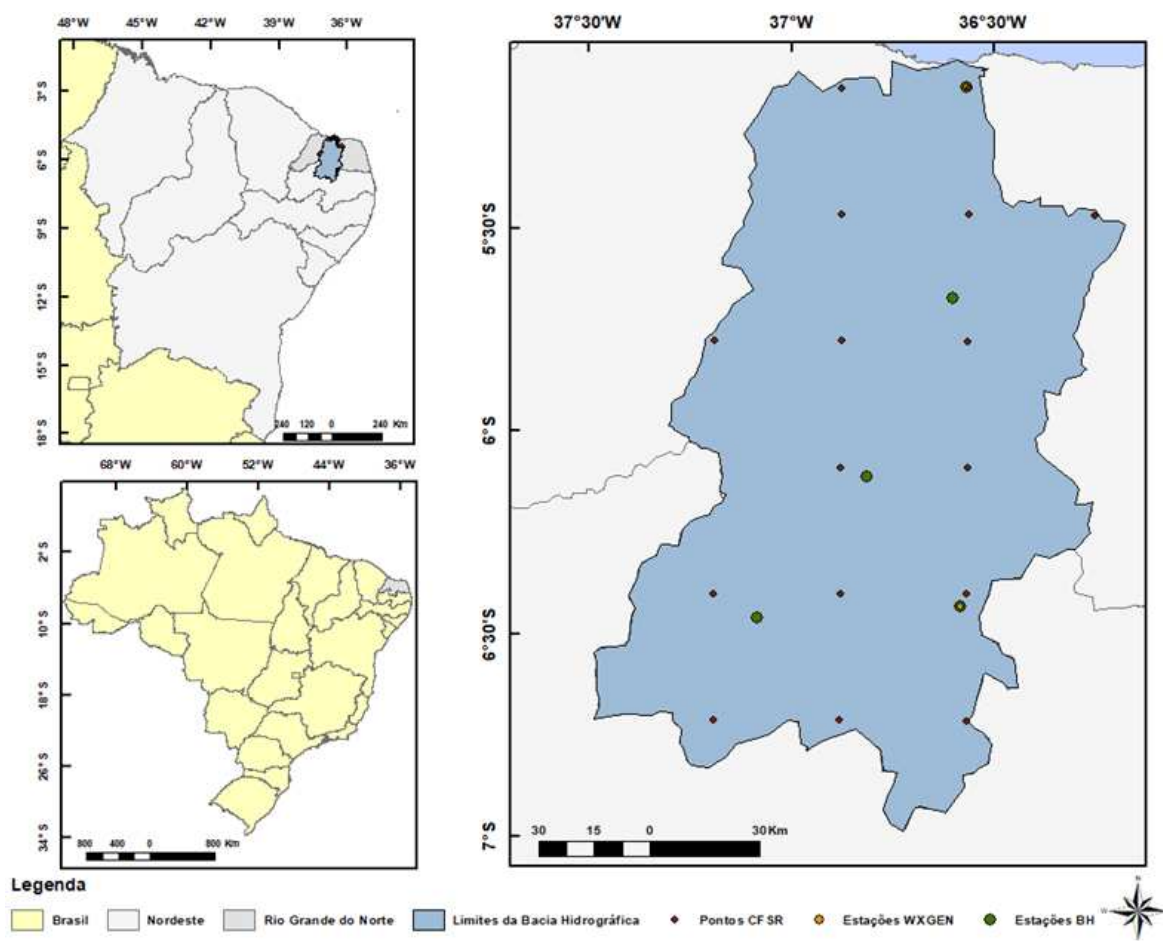


Figura 1 - Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Piranhas-Açu (BHRPA) com destaque as localidades das Estações meteorológicas e pluviométricas e pontos do CFSR.

A bacia hidrográfica do Rio Piancó-Piranhas-Açu é formada por as sub-bacias: do rio do Peixe, do rio Piancó, do Alto Piranhas, do Médio Piranhas, Baixo Piranhas (Açu), do rio Espinharas, do rio Seridó, do rio Paraú e do rio Pataxó; composta por rios intermitentes em condições naturais; e é perenizada por meio de dois reservatórios de regularização construídos pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS): Curema/Mãe d'Água, na Paraíba, e Armando Ribeiro Gonçalves, no Rio Grande do Norte ANA, 2016; ANA, 2018).

O principal curso d'água da bacia é formado pelo rio Piancó, desde a sua nascente, no município de Santa Inês/PB, até a confluência com o rio Piranhas; pelo rio Piranhas, que nasce

na Serra do Bonga, município de Bonito de Santa Fé, até o reservatório Armando Ribeiro Gonçalves, entre os municípios de São Rafael/RN e Assú/RN; e pelo rio Açu, até a foz, na cidade de Macau/RN. Os rios Piancó e Piranhas nascem e se juntam ainda no estado da Paraíba e, após a sua confluência, passam a seguir com o nome de Piranhas em direção ao estado do Rio Grande do Norte. No Rio Grande do Norte, ao passar pela barragem Armando Ribeiro Gonçalves, o rio Piranhas passa a se chamar Açu (ANA, 2018).

### **2.1.2. Clima**

A BHRPA apresenta os tipos climáticos A (clima tropical) e B (clima árido), segundo a classificação de Köppen, com predominância do clima BSw'h' (ANA, 2018; MOURA, 2007). Segundo a classificação climática de Köppen, esse tipo de clima se caracteriza por ser quente e seco (semiárido quente e seco com chuvas de verão-outono) e por apresentar insuficiência e irregularidade das precipitações pluviais e ocorrência de temperaturas elevadas (MMA, 2005).

A distribuição espacial e temporal da precipitação é muito irregular, com precipitações médias variando entre 400 e 800 mm/ano, concentradas entre os meses de fevereiro e maio e com um padrão de forte variabilidade interanual, caracterizado pela alternância entre anos de pluviosidade acima da média, regular e anos consecutivos de valores abaixo da média, que resultam em períodos de estiagem prolongados e baixa disponibilidade hídrica (ANA, 2014; ANA, 2016).

Considerando as normais climatológicas disponibilizadas pelo INMET (1981-2010) para as estações de Cruzeta, Florânia e Macau e Seridó Caicó, as temperaturas médias mensais variam em torno de 25,2 °C nos meses de junho e julho em Florânia a 29,8 °C nos meses de novembro e dezembro em Caicó, com máximas e mínimas mensais respectivamente em novembro e julho para as localidades de Cruzeta, Florânia e Seridó Caicó, e em setembro e agosto para a localidade de Macau, quanto a umidade relativa do ar apresenta variação de 49,5 a 77,5%, com oscilação anual, onde os meses de setembro outubro e novembro são os mais secos, com médias entre 49,5 e 66,7% e o mês mais úmido é abril com médias entre 71,6 e 78,5% .

A bacia apresenta altas taxas de evaporação, que acarretam perdas significativas das reservas de água, contribuindo assim para o déficit hídrico na bacia. Com base nas normais climatológicas de cinco estações (quatro situadas no interior da bacia), a evaporação média Piché é de 2.338 mm/ano e a evapotranspiração, segundo os métodos de Hargreaves e Penman-Monteith, da ordem, respectivamente, de 1.620 mm/ano e 1.786 mm/ano. As maiores taxas mensais ocorrem, de modo geral, no período de agosto a janeiro (ANA, 2014).



### **2.1.3. Geologia, geomorfologia e relevo**

A geologia da região em que está situada a BHRPA é constituída pelo embasamento cristalino de idade pré-cambriana, onde predominam amplamente rochas ígneas e metamórficas, representadas por gnaisses, xistos, migmatitos e granitos, que fazem parte da Província Borborema (ANA, 2014). Moura (2007) destaca que, predominam rochas cristalinas pré-cambrianas, nas porções centro-sul e sudeste, ocorrem calcários da Formação Jandaíra e arenitos da Formação Açú e Grupo Barreiras na parte norte da bacia e os sedimentos quaternários constituem o Vale do Açú.

Quanto ao aspecto geomorfológico, o embasamento cristalino corresponde principalmente à Depressão Sertaneja e, localmente, ao Planalto Borborema. A primeira localizada na porção centro-sul da bacia, no território potiguar, caracterizada, predominantemente, por formas de relevo tabulares amplas e pouco aprofundadas e por topografia plana a levemente ondulada com altimetrias inferiores a 400 m, e a segunda, restrita à região sudeste da bacia, constituída por um misto de formas aguçadas, convexas e tabulares, encimadas por notáveis ocorrências de topos amplos, com presença de sedimentos terciários, formando superfícies tabulares erosivas (MMA, 2005; ANA, 2014).

No setor norte da bacia, observa-se a Superfície Cárstica e os Tabuleiros Costeiros, compostos por relevos tabulares amplos e pouco dissecados e por superfície pediplanada. Nas áreas sedimentares, distinguem-se o domínio superfície cárstica, relacionado à Formação Jandaíra, e Chapadas Altas associadas à Formação Serra dos Martins. Na zona litorânea, na foz do rio Piranhas-Açú, dunas, praias e depósitos flúvio marinhos correspondem ao domínio geomorfológico Planície Litorânea (MMA, 2005; ANA, 2014).

### **2.1.4. Solos**

Os solos predominantes na região são de embasamento cristalino e arenosos, os principais tipos são o Luvissole Crômico e o Neossolo Litólico, seguidos do Argissolo Vermelho-Amarelo. Nas áreas das bacias sedimentares, são várias as unidades pedológicas existentes, com predominância de Planossolo Nátrico e Vertissolo Cromado na área da Bacia do Rio do Peixe, Cambissolo Háptico na área da Formação Jandaíra, Latossolos sobre as formações Açú e Barreiras, Neossolo Quartzarênico na Planície Aluvial do Rio Açú e Gleissolo Sáfico na Zona Litorânea (ANA, 2014).

### **2.1.5. Vegetação**

A vegetação natural é do tipo Xerófila predominando amplamente na BHRPA pertencente ao bioma Caatinga (vegetação do tipo caatinga - caducifólia espinhosa) vegetação típica da região semiárida do Nordeste brasileiro, mais especificamente caatinga hiperxerófila e hipoxerófila, com exceção feita aos ambientes costeiros (MMA, 2005; ANA, 2014).

Na área da bacia inserida no RN, 57,9% compreende vegetação do tipo Caatinga Herbácea-Arbustiva e 4,2% de Caatinga Arbórea, 22,0% Caatinga Antropizada, 1,5% Salinas e Áreas Salinizadas, 8,5% Agricultura e com menos expressividade Dunas e Areais ocupando uma área de 6,1 Km<sup>2</sup> (MMA, 2005; MOURA, 2007). O bioma apresenta, na bacia, três fitofisionomias: savana-estépica florestada, savana-estépica arborizada e savana-estépica parque. A vegetação remanescente de Caatinga ocupa 63% da área da bacia (ANA, 2014).

## **2.2. METODOLOGIA**

### **2.2.1. Obtenção da ET pelo método do Balanço Hídrico**

Thornthwaite e Mather (1955) desenvolveram um modelo de balanço hídrico climatológico para gerar o regime hídrico de um local sem necessidade de medidas diretas das condições do solo. Para sua elaboração, são necessários dados de estimativas da evapotranspiração potencial em cada período e do total de precipitação, além da definição da capacidade de armazenamento máximo de água no solo, ou seja, a Capacidade de Água Disponível -CAD.

O balanço hídrico climatológico fornece informações sobre o total de água retirada no solo (ou armazenamento de água no solo), evapotranspiração real, deficiência e/ou excedente hídrico para cada período, além de permitir que os valores obtidos de excesso e déficit hídrico sejam comparados entre si e com a necessidade de água, com a finalidade de fornecer índices que possam ser usados para classificação e avaliação climática (THORNTHWAITE e MATHER, 1955).

Para validação dos resultados da simulação hidrológica foram obtidos os valores de ET para cinco localidades inseridas na porção da BHRPA do Estado do Rio Grande do Norte, por meio do Balanço Hídrico seriado segundo o modelo proposto por Thornthwaite e Mather (1955), utilizando planilha eletrônica desenvolvida por Rolim et al.(1998).

Os dados necessários para realização do balanço hídrico foram obtidos para uma série de 10 anos, compreendendo o período de janeiro de 2002 a dezembro de 2011. Para os municípios de Cruzeta, Florânia, Macau e Caicó os dados pluviométricos (acumulados mensais)

e de temperatura média do ar (mensal) foram adquiridos através da base dados disponível no site do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, para Angicos o registro de precipitação é proveniente de base de dados da Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte - EMPARN e os valores de temperatura média foram estimados através do software Estima\_T desenvolvido por Cavalcanti e Silva (1994).

Este software foi desenvolvido para realização de estimativas de temperaturas do ar na Região Nordeste do Brasil, tomando como base a divisão da região em três áreas: 1. Maranhão e Piauí; 2. Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco, e 3. Alagoas; Sergipe e Bahia (CAVALCANTI e SILVA, 1994; CAVALCANTI et al., 2006; SILVA et al., 2006).

Temperaturas estimadas pelo software Estima\_T também foram utilizadas para preenchimento de falhas nos registros de temperatura. Para precipitação devido ausência de dados nas observações para apenas dois meses de anos distintos em uma das localidades selecionadas optou-se pelo uso de valores da média climatológica disponíveis pelo INMET de climatologia para realização do preenchimento.

Foram utilizadas informações de capacidade de armazenamento máximo de água no solo obtidas por meio de interpolação realizada por Sales (2009), de dados do mapa elaborado por Brito (2000) da distribuição espacial da máxima Capacidade de Água Disponível pelo solo (CAD) em mm, cujos valores, para cada tipo de solo do Nordeste, foram fornecidos pela EMBRAPA - Solos unidade de Recife.

### **2.2.2. Simulações no modelo SWAT**

Existe uma série de dados relacionados ao solo, clima, fisiologia de culturas e tipos de ocupações agrícolas e práticas de manejo do solo que devem ser fornecidos ao modelo SWAT (LELIS e CALIJURI, 2010). Os processos físicos associados ao movimento da água, e dos sedimentos, crescimento das culturas, ciclagem de nutrientes, entre outros, são diretamente modelados a partir dos dados de entrada (ARNOLD et al., 1998).

As informações utilizadas neste estudo são referentes a dados climatológicos, uso e ocupação do solo, relevo e os tipos de solo para a área. As características físicas e morfológicas da bacia hidrográfica em estudo foram obtidas do Modelo Digital de Elevação (MDE) gerado pelo projeto BRASIL EM RELEVO (MIRANDA, 2005), disponível no site da EMBRAPA Monitoramento por satélite (CNPM). Esse projeto oferece informações topográficas e suas derivações básicas em cobertura nacional, elaboradas a partir da base dos dados numéricos de relevo e da topografia (do Brasil), gerados a partir de dados de radar, obtidos de sensores a bordo nave espacial americana (Endeavour), no projeto SRTM (Shuttle Radar Topography

Mission). Nesse modelo digital de elevação (MDE) se dispõe de uma medida altimétrica precisa para células de área de 90 metros por 90 metros do território nacional, apresentando precisão vertical compatível com a escala de 1:100.000.

O Mapa de Solos do Brasil disponibilizado por meio do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE foi utilizado para avaliação da área de estudo permite a identificação e visualização espacial das diferentes classes de solos encontradas para o País. Produzido na escala de 1:5.000.000 foi elaborado a partir de informações do levantamento exploratório da EMBRAPA (1999), que oferece as especificações e nomenclaturas para os tipos de solos brasileiros descritas no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS (EMBRAPA, 1999), e dos estudos realizados por o IBGE e a EMBRAPA. De acordo com as informações disponíveis por meio do Mapa de Solos do Brasil foi possível identificar os diferentes tipos de solos presentes na área.

Os valores dos parâmetros obtidos para classes de solos presentes na Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco - BHSRSF por Silva, (2014) em seu estudo foram utilizados para alimentar a base de dados para os tipos de solos semelhantes aos encontrados na BHSRSF presentes na área da BHRPA.

As características de uso e ocupação do solo foram obtidas a partir do Mapa de Cobertura e uso da Terra do Brasil adquirido junto ao IBGE. Este mapa representa a distribuição geográfica da tipologia de uso, identificada por meio de padrões homogêneos da cobertura terrestre, realizada a partir de levantamento da Cobertura e do Uso da Terra, visando sua classificação e espacialização por meio de cartas (IBGE, 2013). Para este estudo foram utilizadas seis classes de tipo de cobertura do solo, identificadas após o processamento da imagem, sendo uma destas classes, a água.

Os parâmetros referentes aos tipos de uso e ocupação do solos vegetal encontrados para a área da bacia deste estudo não foram obtidos, portanto foram utilizadas para a simulação tipos de usos e ocupação do solo de bacias estudadas dos Estados Unidos, pois na base de dados na interface ArcSWAT há informações referentes aos tipos de cobertura do solo destas bacias com parâmetros já inseridos, dentre as classes foram selecionadas as que possuem semelhanças com as condições presentes na área da bacia estudada.

O modelo requer dados climatológicos diários de precipitação, temperatura máxima e mínima do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa (MACHADO, 2002; NEITSCH et al., 2005). Algumas dificuldades podem ser encontradas quanto a utilização de dados diários observados, em muitas situações nem sempre é possível obter dados confiáveis e suficientes para geração de resultados satisfatórios.

O conjunto de dados Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) do The National Centers for Environmental Prediction (NCEP) nos Estados Unidos foi desenvolvido como parte do projeto Climate Forecast System, projetado e executado para geração de previsões horárias de diversas variáveis meteorológicas para todo o globo terrestre usando informações da rede global de estações meteorológicas e produtos derivados de satélites (SAHA et al. 2010; YANG et al., 2014; RADCLIFFE e MUKUNDAN, 2017). Os dados resultantes são disponibilizados pelo NCEP-CFSR com resolução espacial de 0,5 Graus e temporal de 6 horas para o período de 1979 - 2014 (YANG et al., 2014). A aplicabilidade dos dados climáticos de reanálise do NCEP- CFSR para modelagem em bacias hidrográficas foi avaliada em diversos estudos, dentre os quais Fuka et al. (2013), Dile e Srinivasan (2014) e Yang et al. (2014).

Foram utilizados dados de precipitação, temperatura, velocidade do vento, radiação solar e umidade relativa disponíveis no Global Weather Data for SWAT, obtidos para 56 pontos de grade, dos quais 16 encontram-se inseridos na área da bacia. Nessa plataforma são fornecidos os dados NCEP-CFSR diários das variáveis para aplicação e em formato que pode ser usado na interface ArcSWAT (YANG et al., 2014).

Para aquisição dos parâmetros climatológicos mensais com exceção da Média de radiação solar diária para um determinado mês - SOLARAV, foram usados dados da precipitação, temperatura máxima, mínima, média e umidade relativa do ar obtidos de duas estações meteorológicas inseridas na área de estudo para o período de 1994 a 2018, tais estações fazem parte da rede de monitoramento meteorológico do INMET. Para a variável climática SOLARAV foram utilizadas informações obtidas por para Estação Meteorológica de Mossoró, também monitorada pelo INMET e localizada no estado que abrange totalmente a área de estudo.

Os dados referentes aos parâmetros de precipitação foram calculados utilizando o programa pcpSTAT (*Precipitation Input Preprocessors*), desenvolvido por Liersch (2003) para estabelecimento destes valores. O valor máximo de meia hora de chuva em todo o período de registros de um determinado mês RAINHHMX, foi calculado após a obtenção dos maiores valores de precipitação para cada mês da série de dados, utilizando os fatores para desagregação propostos por Oliveira et al. (2000), os quais permitem a transformação de chuvas de acumuladas em um dia, em chuvas de diversas durações, e estando entre os mais indicados para a localização da área de estudo.

Independente do tipo de estudo realizado com o SWAT, o seu funcionamento será sempre em função do balanço hídrico em cada Unidade de Resposta Hidrológica existente na

bacia hidrográfica (SALLES, 2012). Sendo assim, o ciclo hidrológico simulado pelo SWAT baseia-se na equação do balanço hídrico (NEITSCH et al., 2009) (Eq. (1)).

$$SW_1 = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{\text{day}} - Q_{\text{surf}} - E_a - W_{\text{seep}} - Q_{\text{gw}}) \quad (1)$$

em que,  $SW_1$  é o quantidade final de água no solo (mm),  $SW_0$  é a quantidade inicial de água no solo (mm),  $t$  é o tempo (dias),  $R_{\text{day}}$  é a precipitação acumulada no dia  $i$  (mm),  $Q_{\text{surf}}$  é o escoamento superficial acumulado no dia  $i$  (mm),  $E_a$  é a evapotranspiração acumulada no dia  $i$  (mm),  $W_{\text{seep}}$  é a quantidade de percolação e de desvio de fluxo que sai do perfil do solo no dia  $i$  (mm), e  $Q_{\text{gw}}$  é a quantidade do fluxo de retorno no dia  $i$  (mm).

As descrições completas dos processos simulados e as equações utilizadas pelo modelo são documentadas no manual teórico do SWAT (NEITSCH et al., 2009; ARNOLD et al., 1998).

Segundo Arnold et al. (1998) o modelo SWAT não requer calibração, caso não existam informações disponíveis de qualidade, como é o caso de trabalhos realizados utilizando bacias não-instrumentadas como unidades de estudo.

O SWAT utiliza um período de aquecimento que segundo Cibin et al. (2010) tem a finalidade de estabilizar o modelo durante seus processos iterativos iniciais minimizando as incertezas para a obtenção dos resultados. Segundo Brighenti et al. (2016) esse período visa estabilizar as condições iniciais de umidade do solo para os primeiros anos de simulação.

O modelo SWAT permite o cálculo da evapotranspiração potencial através dos métodos de Penman-Monteith, Priestley-Taylor e Hargreaves. Uma vez que a evapotranspiração potencial é determinada, busca-se a real através da demanda evaporativa da precipitação interceptada pela cobertura vegetal, da transpiração dos vegetais e da evaporação do solo (CARVALHO NETO, 2011).

Neste trabalho a equação adotada para a simulação da evapotranspiração potencial foi a de Penman Monteith, o período de aquecimento utilizado de três anos e, sendo assim, a série de resultados de Evapotranspiração real estabelecida foi de dez anos compreendendo o período de 2002 a 2011.

### **2.2.3. Parâmetros estatísticos para avaliação do modelo**

Buscando avaliar o desempenho e ajuste do método de modelagem, as séries temporais de evapotranspiração obtidas por meio do Balanço Hídrico e da simulação pelo modelo

hidrossedimentológico SWAT foram comparadas para as localidades selecionadas e inseridas na área da BHRPA. Machado (2002) destaca que o desempenho de modelos é usualmente avaliado por meio do uso de medidas estatísticas.

Para validação foram usados parâmetros estatísticos, para análise da quantificação dos erros proporcionados pelas estimativas foram utilizados o Erro Médio (ME), o Erro Médio Absoluto (EMA) e a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), para análise de confiança foram usados o Coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe (NS), a porcentagem de viés (Pbias), o Índice de Concordância de Willmott (d), o Índice de exatidão (c), os Coeficientes de Determinação ( $R^2$ ) e Correlação (R) de Pearson.

O Erro Médio (EM) (dado pela Eq. (2)) ou tendência mede o valor médio de erro de acordo com a diferença entre os valores obtidos nos métodos que se deseja avaliar e os valores do método que se tomou como parâmetro, indicando assim possíveis tendências de subestimativas ou superestimativas do modelo.

$$EM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i) \quad (2)$$

em que,  $O_i$  é o valor adotado como referência;  $S_i$ , o evento simulado pelo modelo; e  $N$ , o número de eventos. Este índice é dado nas mesmas dimensões que a variável analisada.

Já o Erro Médio Absoluto (EMA) estima o valor médio absoluto da diferença entre o simulado e observado de acordo com a Eq. (3), fornecendo um valor médio dos erros absolutos. O EMA é considerado preciso e robusto como medida da habilidade de modelos numéricos em reproduzir a realidade (FOX, 1981).

$$EMA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |S_i - O_i| \quad (3)$$

em que, os significados das variáveis são os mesmos da Eq. (2). Este índice tem as mesmas dimensões que a variável analisada.

Segundo Fox (1981) Raiz do Erro Médio Quadrático é a raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE). Este parâmetro fornece uma medida média da precisão do modelo através da raiz quadrada da média do quadrado da diferença entre valores simulados e de referência. Destaca-se que assim como o erro médio quadrático é uma das medidas de diferença ou erro

cada vez mais usadas na comparação e avaliação de modelos de simulação, podendo ser usada para substituir os índices baseados em correlação e tendências e principalmente como medidas para fornecimento de informações de precisão (WILLMOTT et al., 1985). O RMSE é calculado pela Eq. (4)

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2} \quad (4)$$

em que, os significados das variáveis são os mesmos da Eq. (2). Este índice é dado nas mesmas dimensões que a variável analisada.

De acordo com Machado (2002), um dos mais importantes critérios estatísticos para avaliar o ajuste de modelos hidrológicos é o Coeficiente Eficiência de Nash e Sutcliffe (1970). Segundo Bressiani et al. (2015) é o indicador estatístico de uso unânime na avaliação da eficiência do modelo SWAT. O Coeficiente de eficiência Nash e Sutcliffe (1970) é dado pela Eq. (5).

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad (5)$$

em que, os significados das variáveis como exceção de  $\bar{O}_i$ , que é a média dos valores adotados como referência para o período de simulação, são os mesmos da Eq. (2).

O coeficiente de eficiência (NSE) pode variar entre negativo infinito a 1, para um ajuste perfeito entre os dados, o valor de NSE deve ser igual a 1, quando o resultado for  $\leq 0$  significa que o uso da média dos dados observados é melhor que a simulação realizada (DILE e SRINIVASAN, 2014; BRIGHENTI, 2015). Moriasi et al. (2007) apresentaram a seguinte classificação de desempenho do modelo para este coeficiente, quando a etapa de tempo é mensal (se é utilizado passo mensal para simulação) para simulação:  $0,75 < \text{NSE} \leq 1,00$  o modelo é considerado muito bom;  $0,65 < \text{NSE} \leq 0,75$  o modelo é considerado bom;  $0,5 < \text{NSE} \leq 0,65$ , satisfatório;  $\text{NSE} \leq 0,50$  insatisfatório.

A porcentagem de viés (Pbias) mede a tendência de os dados simulados serem menores ou maiores do que os dados observados (GUPTA et al., 1999). O seu valor ótimo é 0,



com valores baixos indicando uma simulação acurada (MORIASI et al., 2007). O Pbias é obtido pela Eq. (6)

$$P_{bias} = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - S_i) \times 100}{\sum_{i=1}^N (O_i)} \quad (6)$$

em que, os significados das variáveis são os mesmos da Eq. (2).

Valores positivos de PBIAS indicam que o modelo está subestimando os valores observados, enquanto valores negativos indicam que o modelo superestima (GUPTA et al., 1999).

O índice de exatidão (d) de Willmott expressa a exatidão das estimativas em relação aos valores observados, sendo assim está relacionado ao afastamento dos valores estimados considerando os observados (WILLMOTT et al., 1985). Este índice varia desde zero, onde não existe nenhuma concordância, a um, para a concordância perfeita. O índice de aproximação é obtido utilizando-se a Eq. (7):

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|S_i - \bar{O}_i| + |O_i - \bar{O}_i|)^2} \quad (7)$$

Em que, os significados das variáveis são os mesmos da Eq. (5).

O coeficiente de correlação linear de Pearson r (Eq. (8)) é uma medida estatística usada para avaliar a intensidade da associação linear entre duas variáveis, enquanto o coeficiente de determinação  $r^2$  permite avaliar o quanto o modelo reflete a variância entre os valores observados e simulados (SANTHI et al., 2001). O coeficiente de correlação r varia entre -1 e 1, sendo quanto mais próximo de 1 e -1 maior é a tendência de relação linear positiva (diretamente correlacionadas) e negativa (inversamente correlacionada) respectivamente e quando estiver próximo de zero indica ausência de correlação linear entre as variáveis.

O coeficiente de determinação é o quadrado do coeficiente de correlação e informa que fração da variabilidade de uma característica é explicada estatisticamente pela outra variável (CALLEGARI-JACQUES, 2003). Para o coeficiente de determinação se os valores forem iguais ou muito próximos de zero, a previsão do modelo será considerada inaceitável ou ruim, e para valores iguais a um, a simulação do modelo é perfeita (SANTHI et al., 2001).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S}_i) \times (O_i - \bar{O}_i)}{\sqrt{[\sum_{i=1}^N [\sum (O_i - \bar{O}_i)^2] \times \sum_{i=1}^N [\sum (S_i - \bar{S}_i)^2] ]}} \quad (8)$$

em que, os significados das variáveis como exceção de  $\bar{S}_i$ , que é a média dos eventos Simulados no período de simulação, são os mesmos da Eq. (5).

O índice de desempenho (c) utilizado para indicar a confiança dos métodos é obtido pelo produto do índice de precisão (r) (coeficiente de correlação de Pearson) pelo índice de exatidão (d) (índice de exatidão de Willmott) (Eq. (9)) (CAMARGO e SENTELHAS, 1997). Conforme critérios adotados por Camargo e Sentelhas (1997) e apresentados na Tabela 1 pode-se, com base nesse índice, classificar o desempenho dos métodos de estimativas.

$$c = d \times r \quad (9)$$

Tabela 1- Critérios adotados de interpretação do desempenho dos métodos de estimativa pelo índice c

Valor de c	Valores
>0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito Bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
≤ 0,40	Péssimo

Fonte: CAMARGO E SENTELHAS, 1997.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1. DISCRETIZAÇÃO DA BACIA E ANÁLISE MORFOMÉTRICA

Durante as etapas de simulação a área de estudo é dividida em sub-bacias, as quais são subdivididas em uma ou mais Unidades de Resposta Hidrológica (HRU's). De acordo com Machado (2002) cada sub-bacia pode ser parametrizada pelo SWAT usando uma série de Unidades de Resposta Hidrológica (Hydrologic Response Units – HRU's), as quais correspondem a uma única combinação de uso da terra e solos dentro da sub-bacia. No presente trabalho a delimitação resultou em 67 sub-bacias ao total conforme distribuídas na Figura 2.

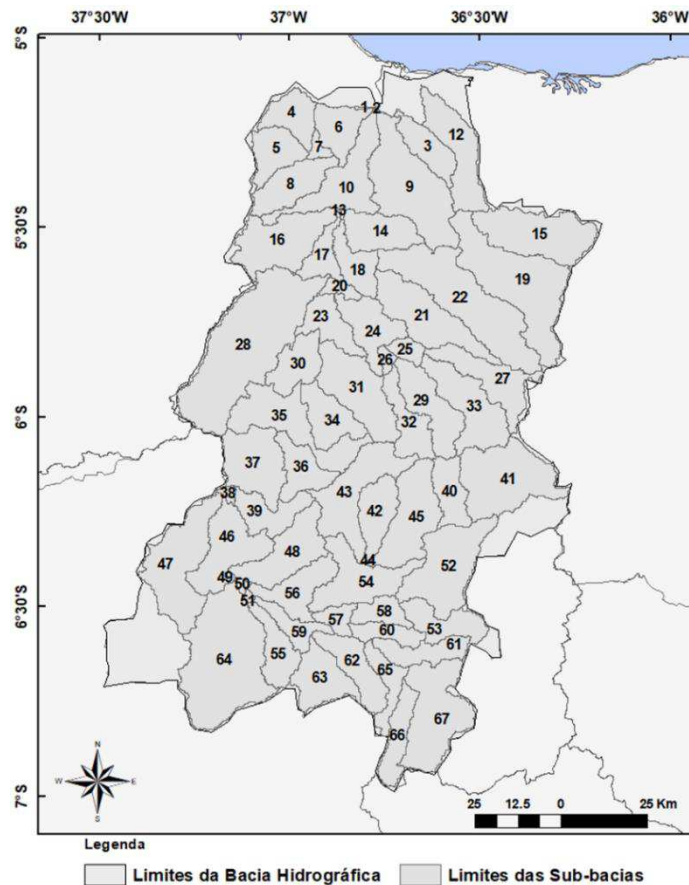


Figura 2 - Mapa de delimitação para a BHRPA, trecho Rio Grande do Norte

Neste estudo para a geração das HRU's, foram adotadas as classes de uso e ocupação e o tipo de solo presentes para cada sub-bacia como dominantes, gerando somente uma unidade de resposta hidrológica (HRU), a utilização de HRU dominante não permite que sejam mantidas todas as classes de solo, uso e declividade. A definição das HRU's leva em consideração o balanço hídrico e é realizada após a sobreposição dos mapas de uso e ocupação, tipos de solos e de relevo. Definida a área de contribuição hídrica da bacia é possível obter a rede de drenagem (Figura 3) para a área da bacia delimitada e discretizada durante a etapa de simulação.

A partir do MDE ainda foi possível obter a distribuição espacial da divisão para as classes de declividade, neste estudo foram definidas cinco classes, a Figura 4 indica o mapa resultante da classificação da declividade para a área da bacia. A área de contribuição da bacia é de 15983,11442 Km<sup>2</sup>, possui uma variação de altitude de 91m com elevações mínimas, médias e máximas de 422 m, 455 m e 513 m respectivamente.

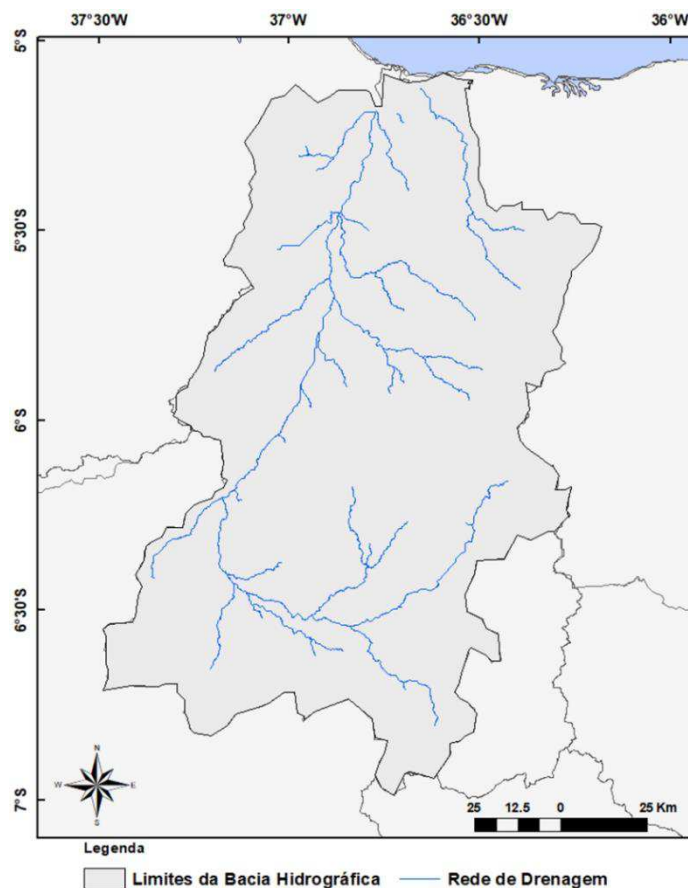


Figura 3 - Rede de drenagem para BHRPA, trecho Rio Grande do Norte.

Para fins de descrição de relevo, foram utilizadas as classes propostas pela EMBRAPA, (1979). Conforme pode ser observado na Figura 4 as classes de declividade de 0 a 5% e 5 a 12% ocupam a maior porção da área da bacia com 11836,97 Km<sup>2</sup> (74,06%) e 2316,58 Km<sup>2</sup> (14,49%) respectivamente, estendendo-se principalmente em áreas próximas a cursos d'água, essas classes representam relevo plano a suave ondulado, enquanto a última classe que corresponde a declividades acima de 40% é a de menor representatividade com abrangência de 204,352 Km<sup>2</sup> (1,28%) está distribuída principalmente nas porções central e sudeste da bacia. As classes de declividade de 12 a 20% e 20 a 40% que correspondem a relevo ondulado a fortemente ondulado ocupam respectivamente 772,61 Km<sup>2</sup> (4,83%) e 852,60 Km<sup>2</sup> (5,33%).

As informações altimétricas empregadas são significativamente importantes na avaliação da influência das variações de amplitude apresentadas pela bacia hidrográfica, indicando condições mais propícias a dissecação para as áreas de maior altitude e de acumulação para as áreas de menor altitude (TRENTIN et al., 2015).

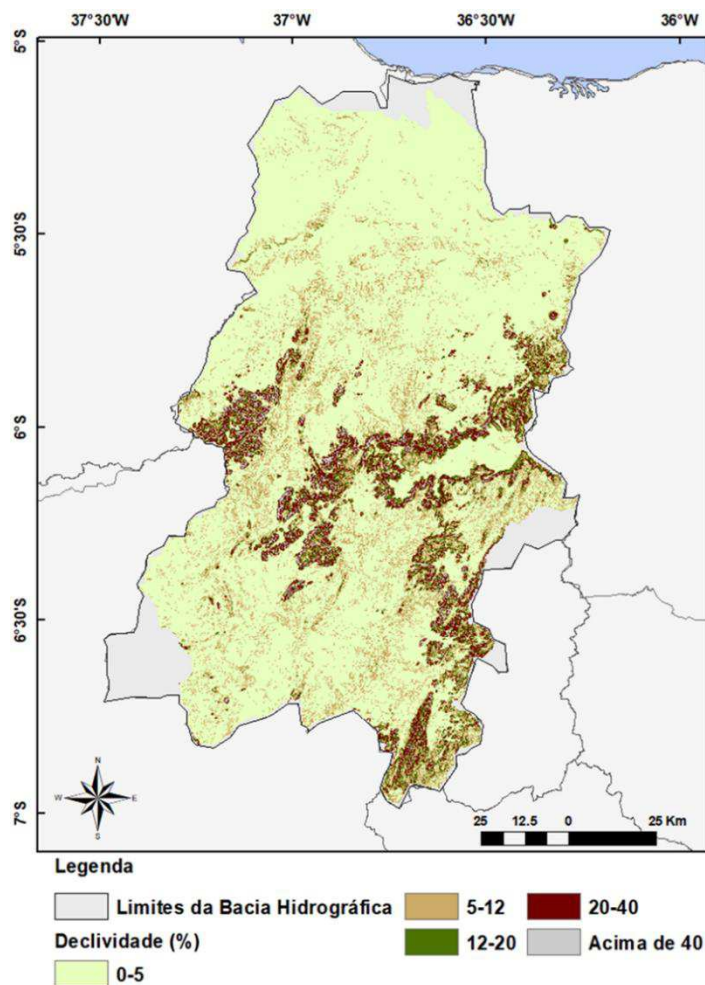


Figura 4 - Mapa de declividade para a BHRPA, trecho Rio Grande do Norte.

A Figura 5 indica o mapa de cobertura do solo resultante do processo de classificação que também foi utilizado como dado de entrada no modelo SWAT para realização da simulação, os tipos de cobertura foram renomeados de acordo com a associação realizada para cada cobertura. As classes de cobertura dos solos selecionadas para fazer analogia aos tipos de uso e ocupação do solo presentes na bacia em estudo são as denominadas Residential-Med/Low Density - URML, Range-Brush - RNGB, Pasture - PAST, Agricultural Land-Generic AGRL e Range-Grasses - RNGE, estas foram escolhidas por apresentarem semelhanças com respectivamente condições de Área Artificial, Pastagem Natural, Vegetação Campestre com Áreas Agrícolas, Área Agrícola e Agropecuária com Remanescentes Florestais.

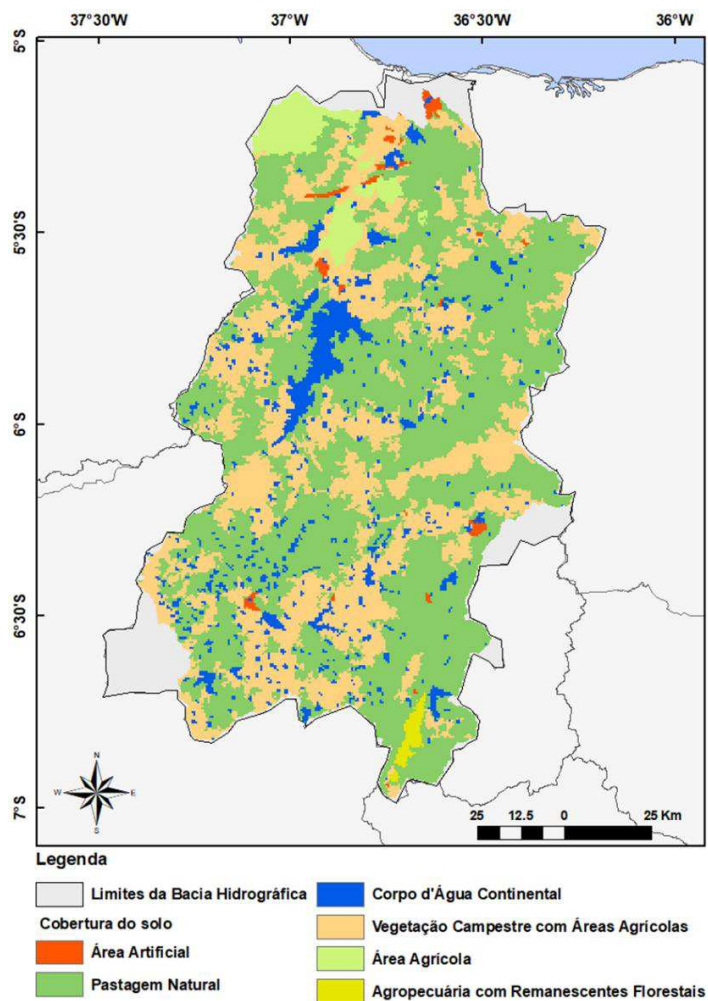


Figura 5 - Mapa de uso e ocupação do solo para a BHRPA, trecho Rio Grande do Norte.

Considerando a distribuição das classes de vegetação (Figura 5) verifica-se maior abrangência na área da Bacia Hidrográfica (55,33%) da cobertura classificada como Pastagem Natural com uma área correspondendo a 8.842,77 Km<sup>2</sup>, sendo que, a segunda classe mais significativa a Vegetação Campestre com Áreas Agrícolas, ocupa uma área equivalente a 5.232,66 Km<sup>2</sup> (32,74% da área total), observa-se que a classe para qual se fez analogia como Corpo d'Água Continental totaliza cerca de 1.156,91 Km<sup>2</sup> (7,24% da área total), a Área Agrícola corresponde a 3,36% cerca de 536,5 Km<sup>2</sup> sendo encontrada na porção Norte da bacia e que a área de Agropecuária com Remanescentes Florestais é a classe menos expressiva com abrangência de 0,55% (88,09 Km<sup>2</sup>) e estando localizada na parte Sul da bacia, as porções correspondentes a Área Artificial ocupam 0,79% (126,19 Km<sup>2</sup>).

Os tipos de solos presentes na área da bacia (Figura 6) possuem a seguinte distribuição percentual: as classes de solos com maior ocorrência são Neossolo Litólico (35,16%), nas áreas da bacia encontra-se predominantemente nas porções central, oeste, leste e sudeste, onde as

classes de declividade variam de ondulado, forte ondulado a montanhoso, em seguida o Luvissole Crômico (33,92%), corresponde as áreas de relevo plano, ondulado a suavemente ondulado, seguidos do Planossolo Nátrico e do Cambissolo Háptico que ocupam respectivamente 10,42% e 5,58% da área, são solos de drenagem deficiente.

Os solos de menor representatividade são Latossolo Vermelho Amarelo (3,61%), Neossolo Flúvico (3,25%), Argissolo Vermelho Amarelo (2,66%), Latossolo Amarelo (2,24%), Planossolo Hidromórfico (0,73%), Gleissolo Sálico (0,39%) e Neossolo Quartzarênico (0,15%), destacando 1,89% da área corresponde a Massa d'Água (1,89%)

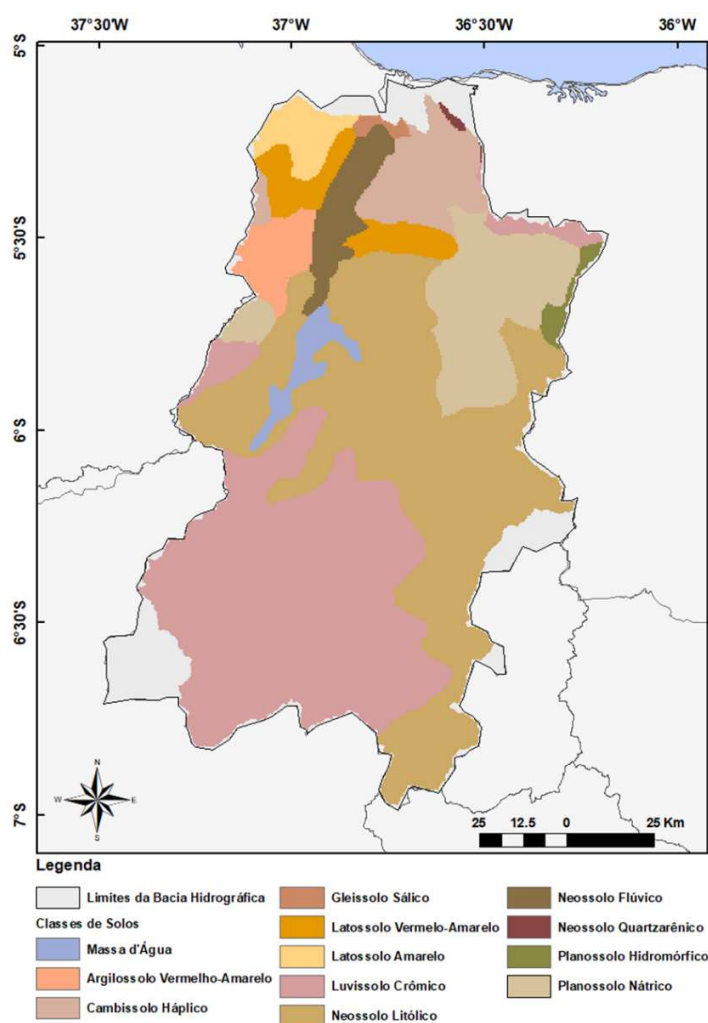


Figura 6 - Mapa de distribuição dos tipos de solos para a BHRPA, trecho Rio Grande do Norte.

O Neossolo Litólico e o Luvissole Crômico são expressivos na região semiárida, o Neossolo Litólico possui baixa intensidade de atuação dos processos pedogenéticos, são pouco profundos, apresentam pedregosidade, enquanto o Luvissole Crômico possui profundidade

média e abrange solos minerais, não hidromórficos, com argila de atividade alta e saturação por bases alta (EMBRAPA, 2006; IBGE,2007).

### 3.2. ANÁLISE DA VARIABILIDADE DA PRECIPITAÇÃO E DAS ESTIMATIVAS DE ET POR MODELAGEM

Nas Figuraa 7 (A) e (B) é possível observar a variabilidade média mensal e sazonal da precipitação para a BHRPA. Verificar-se que as maiores médias dos acumulados mensais estão distribuídas de janeiro a maio, a partir do mês de janeiro são observados valores significativos de precipitação, pode-se verificar menor dispersão para o mês de setembro e maior amplitude no mês de março (77,63 mm).

Na análise da variabilidade sazonal da precipitação e da ET simulada (Figuras 7 e 8 (B)) pode-se verificar que os maiores valores entre os acumulados médios trimestrais são observados no período de março, abril e maio (MAM), com média de 414,14 mm/estação para precipitação e de 211,44 mm/estação para evapotranspiração, ou seja, os maiores incrementos de precipitação e de ET simulada da série analisada para a área de estudo são observados na estação de outono, para esta também foi verificada maior amplitude para valores de precipitação (135,29 mm), esta indica a diferença entre os valores mínimos e máximos.

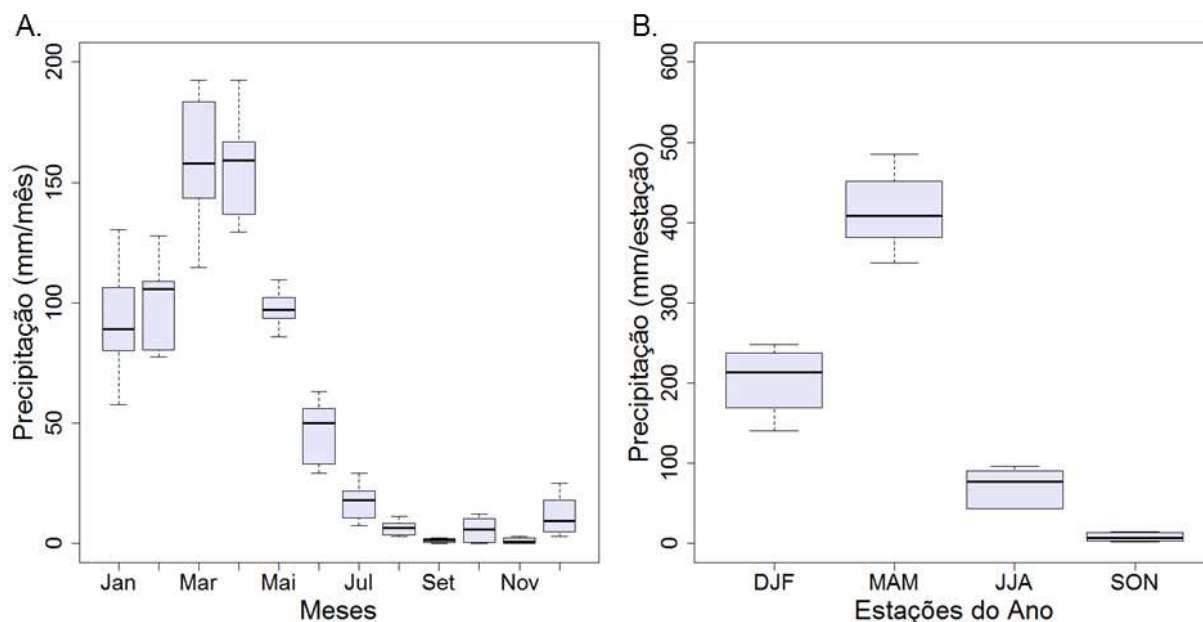


Figura 7 - Variabilidade média do acumulado mensal (A) e do acumulado Sazonal (B) da distribuição da precipitação das estações selecionadas para BHRPA no período de janeiro de 2002 a dezembro de 2011.



As estações de inverno (JJA) e primavera (SON) são caracterizadas pelo registro dos menores acumulados de precipitação, com valores inferiores a 100 mm/estação. Inverno com valores máximo e mínimo de 96,65 e 43,59 (mm/estação) respectivamente e primavera 14,73 e 2,1 (mm/estação). Nestas estações também são verificados os menores registros de ET simulados com o SWAT (Figura 8 (B)). Porém quanto a evapotranspiração a maior amplitude (580,74 mm/estação) foi obtida para a primavera.

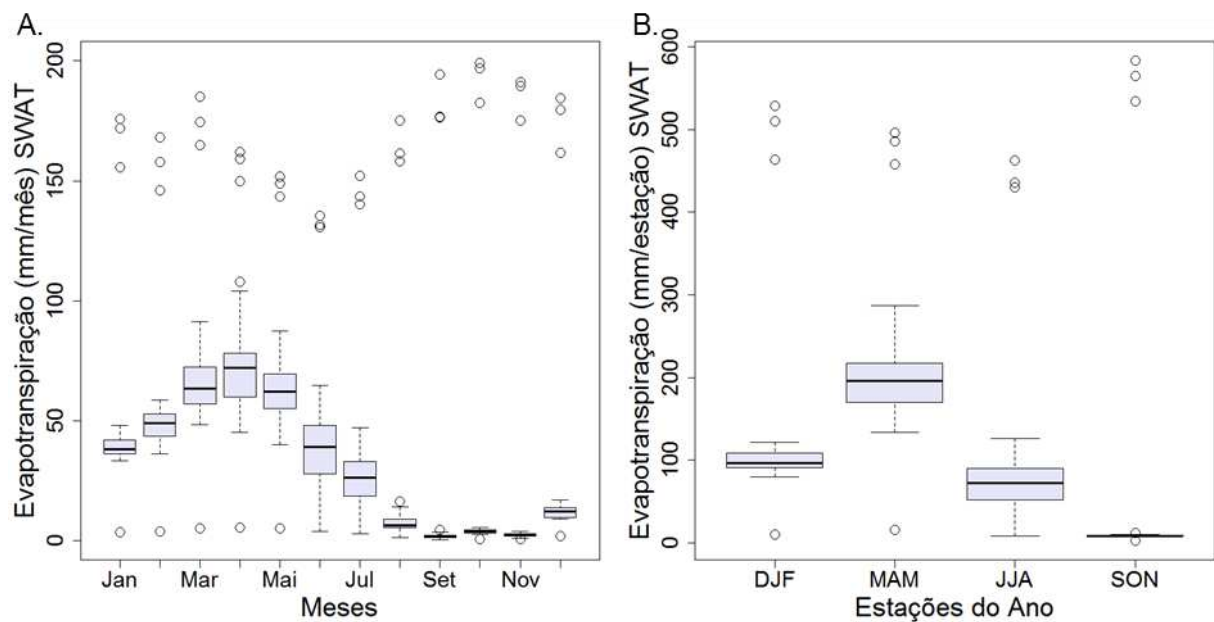


Figura 8 - Variabilidade média do acumulado mensal (A) e do acumulado Sazonal (B) da distribuição da evapotranspiração estimada pelo SWAT para BHRPA no período de janeiro de 2002 a dezembro de 2011.

As estimativas de ET da modelagem são dispersas, refletindo na simulação possíveis perdas de acordo com o tipo de solo e de uso e ocupação. Essas perdas também podem ser influenciadas pelas classes de declividades.

### 3.3. VALIDAÇÃO DAS ESTIMATIVAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Para avaliar a concordância entre as estimativas, os valores dos cálculos dos dois métodos foram comparados. Foram obtidos os parâmetros estatísticos Erro Médio (EM), Erro Médio Absoluto (EMA), Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ), Coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE), a Porcentagem de Viés (Pbias), Índice de Exatidão de Willmott (d), coeficiente de determinação ( $r^2$ ) e correlação (r), e o índice de desempenho (c).

Os valores para os índices estatísticos calculados são apresentados na Tabela 2. Os valores do coeficiente de Nash e Sutcliffe (NSE) (Tabela 2) resultantes para o modelo de acordo com a classificação de Moriasi et al. (2007) foram considerados: Satisfatório para Cruzeta (0,61) e Caicó (0,64); Bom para Florânia (0,71); e Muito Bom para Angicos (0,77) e Macau (0,82), sendo assim os valores obtidos fazem com que o desempenho do modelo seja julgado como aceitável, quanto ao Pbias esta medida indicou a subestimativa do modelo, os menores valores foram obtidos para Macau (17,10) e Angicos (23,07).

Tabela 2- Índices estatísticos obtidos para avaliação do desempenho do modelo SWAT

Localidades	ME	EMA	RMSE	NSE	Pbias	r	r <sup>2</sup>	d	c
Angicos	-10,25	22,18	32,71	0,77	23,07	0,84	0,70	0,91	0,77
Caicó	-24,66	29,09	46,07	0,64	48,58	0,81	0,66	0,83	0,67
Cruzeta	-30,3	31,94	47,16	0,61	55,5	0,84	0,71	0,81	0,68
Florânia	-20,00	25,82	38,56	0,71	38,8	0,78	0,61	0,88	0,69
Macau	-8,44	20,88	31,70	0,82	17,1	0,87	0,75	0,94	0,81

Com relação ao EM observou-se que os resultados para este índice são predominantemente negativos e assim como os resultados do Pbias também expressam a tendência do método do BH em subestimar as estimativas pelo método da modelagem ambiental, com variações do EM entre -30,30 (Cruzeta) e -8,44 (Macau), na Figura 10, a subestimativa pode-se ser observada ao longo da série. Os resultados para o RMSE dos dados da simulação foram altos variando entre 31,70 (Macau) e 47,16 (Cruzeta).

Na classificação com base no índice de desempenho (c) proposto por Camargo e Sentelhas (1997), o modelo apresentou maiores valores para Angicos e Macau, sendo que para estas localidades o modelo apresentou desempenho Muito Bom, para as demais localidades o desempenho do modelo foi tido como Bom. Para Macau foram obtidos o maior coeficiente de correlação (0,87) e o maior índice de exatidão (0,94). Os valores para o Índice de Exatidão de Willmott variaram de 0,81 (Cruzeta) a 0,94 (Macau). Considerando coeficiente de correlação (r) foram obtidos valores de variando entre 0,78 (Florânia) e 0,87 (Macau), indicando assim maior tendência de relação linear positiva entre os métodos para todas as localidades (Tabela 2 e Figura 9 (C) e (D)).

Os diagramas de dispersão entre as estimativas mensais da ET por modelagem e Balanço Hídrico para o período em estudo são mostrados na Figura 9. Reforçando a avaliação dos resultados obtidos para os parâmetros estatísticos EM e Pbias os diagramas permitem verificar a subestimativa dos resultados do BH em relação aos obtidos por meio da modelagem.

Ao comparar os resultados de ET da simulação com SWAT para a bacia do Alto Rio Jardim com valores de referência obtidos experimentalmente em outros trabalhos, Castro (2013), verificou que a modelagem apresentou um valor inferior para a evapotranspiração, quase a metade do valor esperado. Em todas as simulações realizadas por Melo Neto (2013) a evapotranspiração anual simulada pelo SWAT foi subestimada quando comparada com os valores estimados por balanço hídrico simples.

Uzeika (2009) ao aplicar o modelo SWAT para uma bacia hidrográfica rural localizada no município de Arvorezinha-RS, buscando avaliar seu desempenho através da comparação dos resultados hidrológicos e sedimentológicos simulados pelo modelo, com dados observados de monitoramento hidrossedimentológico, ressaltou a importância de estudos mais detalhados de validação do modelo para estimativas relacionadas com o movimento de água no solo (evapotranspiração, infiltração, percolação e percolação profunda).

Observou-se, que em regiões mais secas, a evapotranspiração real simulada pela modelagem apresentou-se muito menor, evidenciando a resposta do modelo quanto a quantidades de água precipitada e disponível para o processo de evapotranspiração. Melo Neto (2013) verificou em seu estudo que as maiores subestimativas para evapotranspiração se associavam ao período de recessão, justificando que esta observação pode refletir uma possível limitação do modelo em expressar a retirada de água do solo para atender a demanda evaporativa, promovendo como compensação a redução da evapotranspiração real no período.

Van Liew et al., 2007 realizaram uma investigação para avaliar o desempenho da aplicação do modelo SWAT para uma variedade de bacias hidrográficas localizadas nos Estados Unidos, cada qual com características climáticas e físicas distintas, os resultados obtidos sugerem que o SWAT geralmente apresentará melhor desempenho em bacias hidrográficas de climas mais úmidos do que de climas mais secos onde a evapotranspiração é geralmente o processo hidrológico com maior importância.

Ao analisar os valores dos coeficientes de determinação ( $r^2$ ), (Tabela 2 e Figura 9) é possível verificar que, os resultados obtidos indicam as melhores precisões das estimativas para as localidades de Angicos, Cruzeta e Macau. Os menores valores de  $r^2$  foram obtidos para as localidades de Florânia e Caicó, indicando maior grau de dispersão entre os valores da simulação e do BH. Santhi et al. (2001) consideraram na avaliação da predição do modelo no procedimento de calibração para vazão, produção de sedimentos e nutrientes, valores de  $r^2$  maiores ou iguais a 0,6 como aceitáveis. Aplicando esse critério para a ET simulada é possível perceber que os valores dos coeficientes de determinação ( $r^2$ ) obtidos são superiores, significando assim que se alcançou um bom ajuste para as localidades validadas.

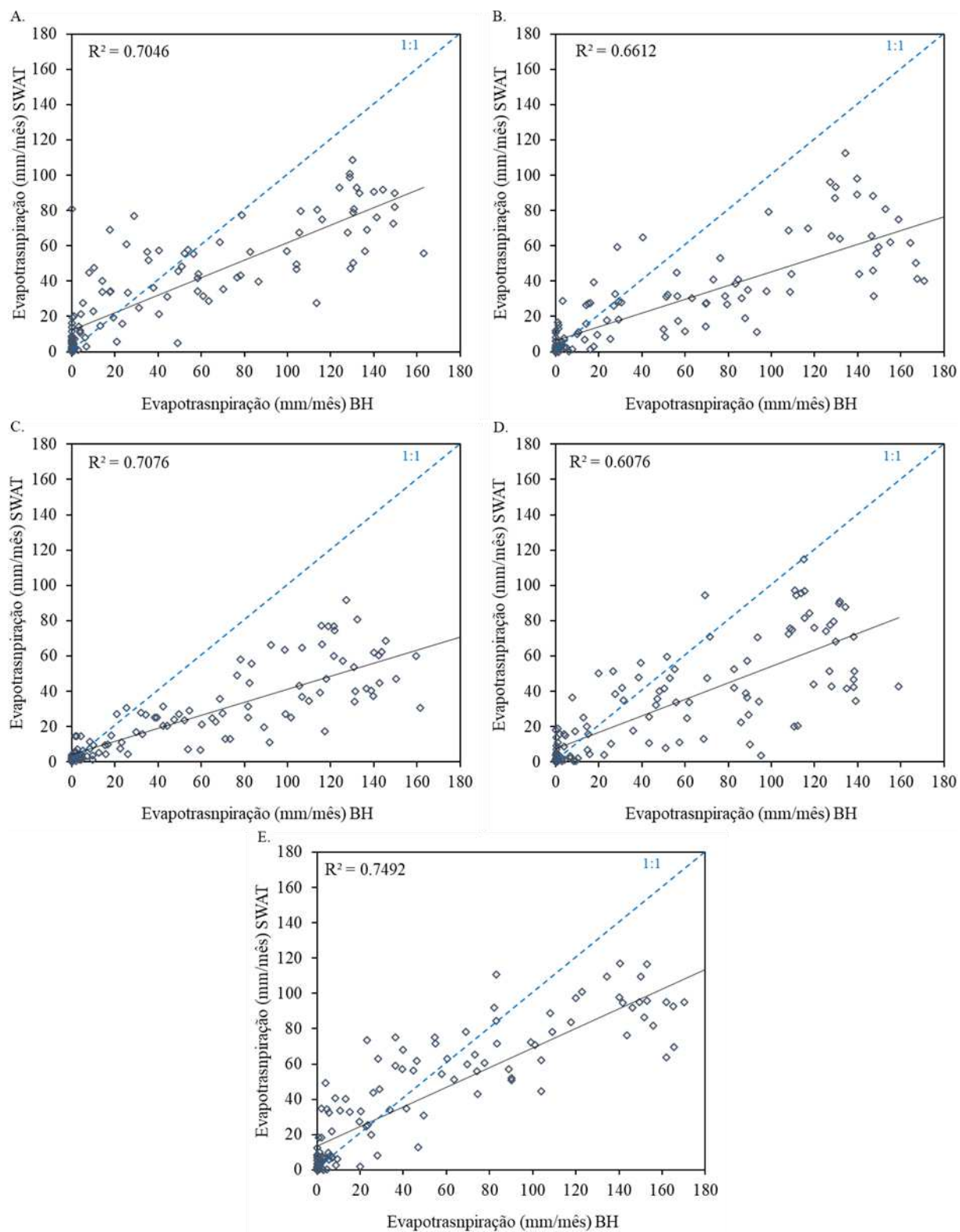


Figura 9 - Comparação das estimativas de evapotranspiração por modelagem e Balanço Hídrico para as sub-bacias das regiões de (A) Angicos, (B) Caicó, (C) Cruzeta, (D) Florânia e (E) Macau no período de janeiro de 2002 a dezembro de 2011.

Na Figura 10 é possível observar a distribuição mensal da série temporal de ET mensal estimada a pelos dos dois métodos e da precipitação mensal acumulada. É possível observar que para todas as localidades os valores estimados de ET pela modelagem em comparação com os obtidos por BH em quase toda a totalidade da série são subestimados, como também pode-se verificar a influência da distribuição temporal da precipitação nas estimativas da evapotranspiração de ambos os métodos.

De acordo com a série pluviométrica para os municípios de Angicos, Cruzeta, Florânia, Macau e Caicó, com dez anos de dados de chuva, em todas as localidades os anos de 2008, 2009 e 2011 apresentaram totais anuais precipitados acima da média histórica, para os anos de 2002, 2004 e 2006 também foram registrados acumulados anuais acima, porém para o ano de 2004 o total precipitado foi próximo a média histórica para o município de Florânia, no de 2006 para os município de Angicos e Florânia e no ano de 2002 para as localidades de Florânia e Caicó.

Considerando os anos de 2003, 2005 e 2007 foram observados valores dos acumulados de precipitação abaixo da média histórica, para estes foram obtidos os menores totais de ET por BH e modelagem para Macau. Apenas para o ano de 2005 os registros totais de precipitação foram inferiores em todas as localidades, nos anos de 2003 e 2007 foram verificados totais de chuva em torno da média histórica para as localidades de Macau e Caicó respectivamente. Quanto ao ano de 2010 foram observados totais de precipitação abaixo da média histórica para os municípios de Angicos e Macau, em torno da média para Florânia e acima nas localidades de Cruzeta e Caicó.

Para os anos com totais acima da média de precipitação, os valores de ET pelo método do BH estão entre os maiores obtidos, considerando as estimativas por modelagem foram os maiores observados nas localidades de Macau e Caicó e para Angicos, Cruzeta e Florânia os maiores valores foram verificados nos anos de 2009 e 2011.

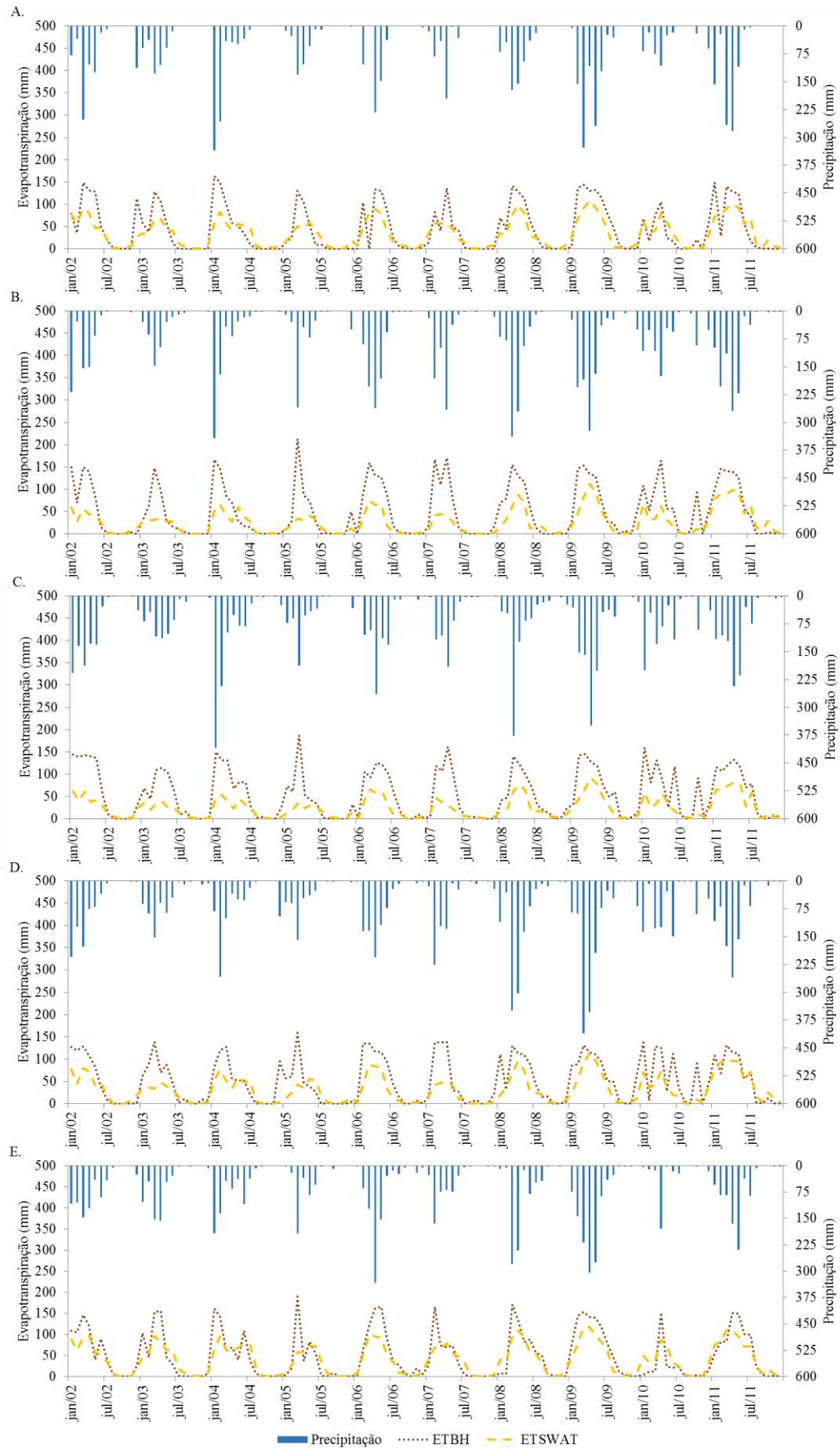


Figura 10 - Séries temporais de precipitação, ET de referência - ETBH e simulada - ETSWAT para sub-bacias das regiões de (A) Angicos, (B) Caicó (C), Cruzeta, (D) Florânia e (E) Macau.

A validação dos resultados mensais de ET estimados por modelagem hidrológica, foi realizada utilizando dados de ET em uma escala de tempo mensal obtidos pelo método do BH contemplando o período de 2002 a 2011 para os locais inseridos na área da bacia. Os dados de evapotranspiração da modelagem foram extraídos para cada sub-bacia correspondente à posição das cinco estações meteorológicas selecionadas para realização do BH.

#### **4. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Por meio da análise da variabilidade mensal e sazonal foi possível verificar que os maiores incrementos de precipitação e de ET simulada da série avaliada para a área de estudo são observados na estação de Outono, enquanto as estações de inverno (JJA) e primavera (SON) são caracterizadas pelo registro dos menores acumulados.

Os resultados dos índices estatísticos EM e Pbias evidenciam a subestimativa da evapotranspiração calculada pelo método do BH em relação a simulada usando o SWAT, por meio dos diagramas e da representação da série temporal foi possível verificar a subestimativa dos resultados em quase a totalidade da série.

Pode-se verificar a influência da distribuição temporal da precipitação nas estimativas da evapotranspiração de ambos os métodos. Anos com totais acima da média de precipitação apresentaram valores de ET pelo o método do BH e de modelagem entre os maiores obtidos para a série.

Considerando a eficiência da modelagem na simulação do processo de evapotranspiração, o modelo apresentou boa representação para o NSE, para o índice de desempenho (c) desempenho de Bom a Muito Bom, em relação ao coeficiente de determinação ( $r^2$ ) as melhores precisões das estimativas foram para as localidades de Angicos, Cruzeta e Macau, quanto ao coeficiente de correlação (r), os resultados obtidos indicaram Forte correlação entre os métodos para todas as localidades, já para o Pbias, os menores valores foram obtidos apenas para as localidades de Macau e Angicos.

Diante do exposto constatou-se que o modelo hidrológico SWAT utilizado sem calibração apresentou um bom desempenho para simulação da evapotranspiração para a bacia hidrográfica do Rio Piranhas-Açu.

#### **5. REFERÊNCIAS**

ABBASPOUR, K.C., ROUHOLAHNEJAD, E., VAGHEFI, S., SRINIVASAN, R., YANG, H., KLØOVE, B. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: calibration

and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. **Journal Hydrology**. 524, p. 733–752, 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil) - ANA. **Plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Piranhas-Açu**. Brasília, 2014. 97 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil) – ANA. **Plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açu**. Brasília, 2016. 167 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil) -ANA. **Plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açu: resumo executivo**. Brasília, 2018. 170 p.

ALCÂNTARA, H. M. **Estabelecimento de metodologia para a conservação e Recuperação de pequenas bacias hidrográficas do semiárido**. Tese (Doutorado em Recursos Naturais). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2013. 143p.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements** - FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome-Italy, 1998.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. **Journal of the American water Resources Association**, v. 34, n.1, p. 73-89, 1998.

BLAINSKI, E.; ACOSTA, E.; NOGUEIRA, P. C. P. Calibração e validação do modelo SWAT para simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica do litoral norte catarinense. **Revista Ambiente & Água**, v. 12, n. 2, Taubaté, 2017.

BRESSIANI, D. A.; GASSMAN, P. W.; FERNANDES, J. G.; GARBOSSA, L.; SRINIVASAN, R.; MENDIONDO, E. M.; BONUMÁ, N. B. A review of SWAT (Soil and Water Assessment Tool) applications in Brazil: challenges and prospects. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering (IJABE)**, In Press, 2015.



BRIGHENTI, T. M. **Modelagem Hidrológica e Avaliação de Diferentes Métodos de Calibração para o Modelo SWAT**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2015. 119 p.

BRIGHENTI, T. M.; BONUMÁ, N. B.; CHAFFE, P. L. B. Calibração hierárquica do modelo SWAT em uma bacia hidrográfica Catarinense. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21 n. 1, p. 53 - 64, 2016.

BRITO, J. I. B. **Modelo regional de estimativa do balanço hídrico aplicado à variabilidade climática do Nordeste do Brasil**. Tese (Doutorado em Recursos Naturais). Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba-UFPB, 2000. 129 p.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Porto Alegre: Artemed, 2003. 255p.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97. 1997.

CARVALHO NETO, J. G. C.; SRINIVASAN, V. S.; RUFINO, I. A. A. Simulação hidrossedimentológica, analisando dois MDES, de duas pequenas sub-bacias no cariri paraibano utilizando o modelo swat. **Rev. Geogr. Acadêmica** v.5, n.1, 2011. ISSN 1678-7226.

CARVALHO NETO, J. G. **Simulação hidrossedimentológica da bacia do riacho dos Namorados com o modelo SWAT**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2011. 216p.

CASTRO, K. B. **Avaliação do modelo SWAT na simulação da vazão em bacia agrícola do cerrado intensamente monitorada**. Dissertação (Mestrado em Geociências). Universidade de Brasília, Instituto de Geociências. Brasília, 2013. 141 p.

CAVALCANTI, E.P.; SILVA, E.D.V. **Estimativa da temperatura do ar em função das coordenadas locais**. VIII Congresso Brasileiro de Meteorologia e II Congresso Latino-Americano e Ibérico de Meteorologia. Sociedade Brasileira de Meteorologia. Belo Horizonte, outubro de 1994. 154-157. 1994.

CAVALCANTI, ENILSON P.; SILVA, VICENTE DE P. R.; SOUSA, FRANCISCO, A. S. Programa computacional para a estimativa da temperatura do ar para a região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Brasil, v. 10, n. 1, p. 140-147, 2006.

CIBIN, R.; SUDHEER, K. P.; CHAUBEY, I. Sensitivity and identifiability of stream flow generation parameters of the SWAT model. **Hydrological Process**, v. 24, p. 1133- 1148, 2010.

DILE, Y.T.; R. SRINIVASAN. Evaluation of CFSR Climate Data for Hydrologic Prediction in Data-Scarce Watersheds: An Application in the Blue Nile River Basin. **Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)** 1-16. DOI: 10.1111/jawr.12182. 2014.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Brasil em Relevô. Disponível em:<<https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/relevobr/download/index.htm>>. Acesso em: 20 Abr.2019.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Sistema brasileiro de classificação de solos. 2. ed., EMBRAPA-SPI. Rio de Janeiro, 2006.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Rio de Janeiro, 1979. 87 p.

EMPARN - Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte. Disponível em: <<http://189.124.130.5:8181/estacaomet.php>>. Acesso em: 05 Mai. 2019.

Estima\_T. Estimativa da Temperatura do Ar. Disponível em:<<http://www.dca.ufcg.edu.br/download/estimat.htm>>. Acesso em: 29 Mai. 2019.

FOX, D. G. **Judging Air Quality Model Performance**. Bulletin of the American Meteorological Society, v. 62, p. 599-609, 1981.

FUKA, D. R.; WALTER, M. T.; MACALISTER, C.; DEGAETANO, A. T.; STEENHUIS, T. S.; EASTON, Z. M. Using the Climate Forecast System Reanalysis as Weather Input Data for Watershed Models. **Hydrological Processes**. 2013.

GLOBALWEATHER. (2019). NCEP climate forecast system reanalysis (CFSR). Disponível em:< <https://globalweather.tamu.edu/>>. Acesso em: 20 abr. 2019.

GUPTA, H.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P. Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration. **Journal of Hydrologic Engineering** v. 4, n. 2, p. 135-143. 1999.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Brasil - Pedologia. Disponível em: <<https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#mapa220925>>. Acesso em 20 abr. 2019.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Manual Técnico de Pedologia. Manuais técnicos em geociências, 2º edição, n.4. Rio de Janeiro, 2007. 316 p.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Manual Técnico de Uso da Terra. Manuais técnicos em geociência, 3º edição, n.7. Rio de Janeiro, 2013. 171 p.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Mapa de Cobertura e uso da Terra do Brasil. Disponível em:<<https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#mapa220578>>. Acesso em: 20 abr. 2019.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em:< <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 29 abr. 2019.

LELIS, T. A.; CALIJURI, M. L. Modelagem hidrossedimentológica de bacia hidrográfica na região sudeste do Brasil, utilizando o SWAT. **Ambi-Agua**, v. 5, n. 2, p. 158-174, 2010.

LIERSCH, S. 2003. **The Program pcpcSTAT: user's manual**. Berlin. Disponível em:<<https://swat.tamu.edu/software/>>. Acesso em 21 de abril de 2019.

LIMA, J. E.F.W.; SILVA, C. L.; OLIVEIRA, C. A. S. Comparação da evapotranspiração Comparação da evapotranspiração real simulada e observada em uma bacia real simulada e observada em uma bacia hidrográfica em condições naturais de cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.5, n.1, p.33-41. Campina Grande, 2001.

MACHADO, R. E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. Tese (Doutorado em Agronomia), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba, 2002.

MELO NETO, J. O. **Análise de sensibilidade escalar do modelo hidrológico SWAT**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2013. 149 p.

MIRANDA, E. E. de; (Coord.). **Brasil em Relevô**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 18 Jun. 2019.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Proposta de instituição do Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Piranhas-Açu, conforme resolução nº 05, de 10 de abril de 2000, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos**. Agência Nacional de Águas Governo do Estado da Paraíba Governo do Estado do Rio Grande do Norte. 2005.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, Transactions of the ASABE, v.50, n.3, p. 885-900. 2007.

MOURA, E. M. **Avaliação da disponibilidade hídrica e da demanda hídrica no trecho do Rio Piranhas-Açu entre os Açudes Coremas-Mãe d'Água e Armando Ribeiro Gonçalves**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2007. 140 p.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, I. V. River flow forecasting through conceptual models Part I - a discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, p. 282-290. 1970.

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 Research Experiment Station, 2005.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. Soil and Water Assessment Tool: Theoretical Documentation: Version 2009. Grassland, Soil and Water Research Laboratory - Agricultural Research Service, Blackland Research Center - Texas Agricultural Research Experiment Station, 2009. 604p.

OLIVEIRA, L. F. C.; CORTÊS, F. C.; BARBOSA, F. O. A.; ROMÃO, P. A.; CARVALHO, D. F. **Estimativa das equações de chuvas intensas para algumas localidades no estado de Goiás pelo método da desagregação de chuvas.** Pesquisa Agropecuária Tropical, v. 20, p. 23-27. 2000.

PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)-ração.** 1.ed. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.

RADCLIFFE, D.E.; R. MUKUNDAN. PRISM vs. CFSR Precipitation Data Effects on Calibration and Validation of SWAT Models. **Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)**, v.53, n. 1, p. 89-100. 2017.

ROLIM, G. S.; SENTELHAS, P. C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente EXCEL para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 133-137, 1998.

SAHA, S., MOORTHY, S., PAN, H. L., WU, X., WANG, J., NADIGA, S., CK TRIPP, P., KISTLER, R., EN, J. W., D BEHRINGER, D., LIU, H., STOKES, D., GRUMBINE, R., GAYNO, G., WANG, J., HOU, Y. T., CHUANG, H. Y., JUANG, H. M. H., SELA, J., IREDELL, M., TREADON, R., KLEIST, D., T, P. V. D., KEYSER, D., DERBER, J., EK, M., E MENG, J., WEI, H., ANYANG, R., LORD, S., VAN DEN DOOL, H., KUMAR, A., U WANG, W., LONG, C., IAH, M. C., XUE, Y., N HUANG, B., SCHEMM, J. K., EY EBISUZAKI, W., LIN, R., XIE, P., CHEN, M., ZHOU, S., HIGGINS, W., ZOU, C. Z., LIU, Q., CHEN, Y., HAN, Y., CUCURULL, L., REYNOLDS, R. W., RUTLEDGE, G.,

GOLDBERG, M. The NCEP climate forecast system reanalysis. **American Meteorological Society**, v.91, p.1015–1057. 2010.

SALES, E. S. G. **Classificação de áreas semiáridas e subúmidas secas utilizando diferentes índices climáticos**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Campina Grande, 2019. 66 p.

SALLES, L. A. **Calibração e validação do modelo SWAT para a predição de vazões na bacia do ribeirão Pipiriau**. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Ciências Florestais), Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Brasília, 2012.

SANTHI, C.; ARNOLD, J. G.; WILLIAMS, J. R.; DUGAS, W. A.; SRINIVASAN, R.; HAUCK, L. M. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. **Journal of the American Water Resources Association**, v.37, n.5, p. 1169-1188. 2001.

SANTOS, J. T. S.; SOUSA, A. M. L.; NUNES, H. G. G. C.; PONTES, A. K.; SILVA, P. V; C. Estimativa dos componentes do balanço hídrico na sub-bacia do rio Arapepó com o modelo SWAT. **Revista de Geografia** v. 35, n. 5. Recife, 2018.

SILVA, M. T. **Mudança no uso de solo e no aporte de sedimentos na bacia hidrográfica do submédio Rio São Francisco**. Tese (Doutorado em Meteorologia). Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Campina Grande, 2014. 121 p.

SILVA, M. T.; AZEVEDO, P. V.; SILVA, V. P. R.; NOBREGA, B. K. S.; MARIANO, E. B.; AMORIM, M. R. B.; Estimativa da produção de sedimentos na bacia hidrográfica do submédio rio São Francisco. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 2, n. 3, p. 203-211, 2017.

SILVA, M. T.; SILVA, V. P. R.; SOUSA, E. P.; ARAÚJO, A. L. SWAT model application to estimate the flow in the basin of lower-middle São Francisco River. **Revista Brasileira de Geografia Física** v. 8, n. 2, p. 1615-1627, 2015.

SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G. Estimativa da produção de sedimentos mediante uso de um modelo hidrossedimentológico acoplado a um SIG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.5, p.520–526. Campina Grande, 2008.

SILVA, V. P. R.; SILVA, M. T.; SINGH, P.; SOUZA, E. P.; BRAGA, C. C.; HOLANDA, R. M.; ALMEIDA, R. S. R.; SOUSA, F. A. S.; BRAGA, A. C. R. Simulation of stream flow and hydrological response to land-cover changes in a tropical river basin. **CATENA**, 162, p. 166-176 2018.

SILVA, V. P. R.; SILVA, M. T.; SOUZA, E. P. Influence of land use change on sediment yield: a case study of the sub-middle of the São Francisco River Basin. **Engenharia Agrícola**, v. 36, n.6 p. 1005-1015, 2016.

SILVA, V. P. R.; SOUSA, F. A. S.; CAVALCANTI, E. P.; SOUZA, E. P.; SILVA, B. B. Teleconnections between sea-surface temperature anomalies and air temperature in northeast Brazil. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 68, n. 68, p. 781-792, 2006.

SRINIVASAN, V. S.; SANTOS, C. A. G.; GALVÃO, C. O. Erosão hídrica do solo no semi-árido brasileiro: A experiência na bacia experimental de Sumé. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, p. 57-73, 2003.

TAVEIRA, I. M. L. M. Avaliação de alternativas de uso do solo através de simulação hidrossedimentológica da bacia representativa de Sumé com o modelo SWAT. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2012.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. Publication in Climatology, Laboratory of Climatology, **Centerton**, v. 8, n.1. 1955.

TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. S.; SILVEIRA, C. T. Compartimentação geomorfométrica da bacia hidrográfica do Rio Itú/RS. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.16, n.2, p.219-237. São Paulo, 2015.

TRIPATHI, M. P.; PANDA, R. K.; RAGHUWANSHI, N. S. Identification and prioritization of critical sub-watersheds for soil conservation management using the SWAT model. *Biosystems Engineering*, v. 85, n. 3, p. 365-379, 2003.

UZEIKA, T. **Aplicabilidade do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação da produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica rural.** Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2009. 147 p.

VAN LIEW, M. W.; VEITH, T. L.; BOSCH, D.D.; ARNOLD, J. G., Suitability of SWAT for the Conservation Effects Assessment Project: Comparison on USDA Agricultural Research Service Watersheds. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 12, n. 2. 2007.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. K.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M.. Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research*, Ottawa, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.

YANG, Y.; WANG, G.; WANG, L.; YU, J.; XU, Z. Evaluation of Gridded Precipitation Data for Driving SWAT Model in Area Upstream of Three Gorges Reservoir. *PLoS ONE*, v. 9 n. 11, e112725. doi:10.1371/journal.pone.0112725. 2014.

ZHANG, X.; REN, Y.; YIN, Z.-Y.; LIN, Z. ; ZHENG, D. Spatial and temporal variation patterns of reference evapotranspiration across the Qinghai-Tibetan Plateau during 1971–2004. *Journal of Geophysical Research*, v. 114. 2009.



### CAPÍTULO 3

## AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PIRANHAS-AÇU NO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE

### RESUMO

Abordagens para estimativas de ET por meio de técnicas de sensoriamento remoto, modelagem ambiental, produtos globais de reanálise são promissoras para conduzir estudos de monitoramento de recursos hídricos em regiões com escassez de dados e de reservas hídricas, como as regiões semiáridas brasileiras, caracterizadas pela irregularidade espacial e temporal da precipitação. Dessa forma, o presente estudo visa avaliar o desempenho de quatro métodos distintos para estimativas de ET por meio de comparação com valores calculados pelo método do balanço hídrico - BH para localidades inseridas na Bacia Hidrográfica do rio Piranhas-Açu no estado do Rio Grande do Norte, região semiárida NE brasileiro, assim como analisar o comportamento da ET e das componentes hidrológicas geradas pelo método da modelagem ambiental. As estimativas de ET para o período de janeiro de 2002 a dezembro de 2011 utilizadas neste trabalho são oriundas de simulação hidrológica com o SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*), de produtos de ET de escala global MOD16 (*Moderate resolution Imaging Spectroradiometer*) e GLDAS (*Global Land Data Assimilation System*) e do modelo regional R-SSEB. Com base nos coeficientes de correlação os dados do BH apresentam maior concordância com os dados do SWAT do R-SSEB. As dispersões para os conjuntos de dados mostraram em todos os casos, que os menores valores de ET se apresentam concentrados, enquanto os maiores valores mostram-se mais dispersos. Os modelos SWAT e R-SSEB apresentaram subestimativas em todas as localidades, enquanto o GLDAS superestimativas, menores subestimativas e superestimativas foram verificadas para o MOD16. Constatou-se por meio da análise da variabilidade sazonal que os modelos R-SSEB, MOD16 e o SWAT, de forma geral, apresentam certa similaridade ao do método do BH quanto aos incrementos estimados para os períodos seco e chuvoso. Considerando a distribuição espacial das componentes hidrológicas observou-se demandas elevadas de ET ao Norte da bacia em áreas com coberturas arbustivas e pastagens com destaque de uso e ocupação do solo em atividades agropecuárias, e as áreas com predominância dos solos dos tipos Neossolo Litólico e Luvisolo Crômico apresentaram menores valores de ET. Os produtos têm um grande potencial para obtenção de informações em áreas com escassez de dados.

**Palavras-chave:** Modelagem hidrológica. Dados orbitais. Reanálise. Comparação.

# **EVALUATION OF EVAPOTRANSPIRATION ESTIMATION METHODS FOR THE RIO PIRANHAS-AÇU WATER BASIN IN THE STATE OF RIO GRANDE DO NORTE**

## **ABSTRACT**

Approaches to ET estimates by means of remote sensing techniques, environmental modeling, global reanalysis products are promising for conducting water resources monitoring studies in regions with limited data and water reserves, such as the Brazilian semiarid regions, characterized by irregularity spatial and temporal rainfall. Thus, the present study aims to evaluate the performance of four different methods for estimating ET through comparison with values calculated by the water balance method - BH for locations located in the Hydrographic Basin of the Piranhas-Açu River in the state of Rio Grande do Norte , Brazilian NE semi-arid region, as well as analyzing the behavior of ET and hydrological components generated by the environmental modeling method. The ET estimates for the period from January 2002 to December 2011 used in this work are derived from hydrological simulation with the SWAT (Soil and Water Assessment Tool), of global scale ET products MOD16 (Moderate resolution Imaging Spectroradiometer) and GLDAS (Global Land Data Assimilation System) and the regional R-SSEB model. Based on the correlation coefficients, the BH data show greater agreement with the SWAT data of the R-SSEB. The dispersions for the data sets showed in all cases that the lowest ET values are concentrated, while the highest values are more dispersed. The SWAT and R-SSEB models showed underestimations in all locations, while GLDAS overestimates, minor underestimates and overestimates were verified for MOD16. It was found through the analysis of seasonal variability that the R-SSEB, MOD16 and SWAT models, in general, show some similarity to the BH method in terms of the estimated increments for the dry and rainy periods. Considering the spatial distribution of the hydrological components, high ET demands were observed in the North of the basin in areas with shrub cover and pastures with emphasis on land use and occupation in agricultural activities, and the areas with predominance of Neosol Litolic and Luvisol types. Chromic showed lower ET values. The products have great potential for obtaining information in areas with little data.

**Keywords:** Hydrological modeling. Orbital data. Reanalysis. Comparison.

## 1. INTRODUÇÃO

As ações antrópicas são responsáveis por modificações consideráveis no ambiente, podendo antecipar processos de degradação dos solos, dos recursos hídricos e da vegetação, assim como beneficiar mudanças climáticas gerando desertificação em diferentes áreas do planeta, podendo se agravar em áreas mais vulneráveis como regiões semiáridas (DHAR e Mazumdar2009). Nessas regiões a variabilidade pluviométrica espacial e temporal, as alterações de uso e ocupação do solo, os tipos de solo e as condições climáticas adversas, quando associados a ausência de práticas conservacionistas, influenciam diretamente no regime hidrológico em bacias hidrográficas.

Nesse contexto, há uma grande necessidade de um planejamento e gerenciamento adequado e adaptativo da água na região do Nordeste brasileiro, utilizando ferramentas capazes de fornecer informações confiáveis podendo auxiliar consideravelmente o entendimento de processos hidrológicos. A realização de estudos hidrológicos em bacias hidrográficas surge da necessidade de se compreender o funcionamento do balanço hídrico, dos processos que controlam o movimento da água e seus prováveis impactos sobre a quantidade e a qualidade da água (ANDRADE et al., 2013).

A evapotranspiração é um dos mais importantes fatores mediadores do clima e do tempo, tanto em escala global quanto local, consistindo da ligação entre energia, clima e hidrologia (BRAUN et al., 2001). A estimativa precisa e análise quantitativa das perdas por evapotranspiração representam uma estratégia essencial para monitoramento, gerenciamento e manejo de recursos hídricos, agrícolas e ambientais, monitoramento e previsão de secas e estudos de mudanças climáticas em bacias hidrográficas (SENAY et al., 2011; LIU et al., 2013; RAZIEI; PEREIRA, 2013; ZHAO et al., 2013).

Segundo Azevêdo e Silva (2018), a Bacia Hidrográfica do rio Piranhas-Açu, localizada na região semiárida Nordeste brasileiro tem elevada importância socioeconômica e ambiental para os estados do Rio Grande do Norte e da Paraíba, mas devido ao modelo de exploração estabelecido ao longo de décadas na região, os seus recursos naturais têm sido degradados, limitando, assim, o desenvolvimento regional e local. Dessa forma, o estudo do comportamento da ET e dos componentes do balanço hídrico para a bacia hidrográfica do rio Piranhas Açu tem potencial aplicação na avaliação dos processos hidrológicos e no desenvolvimento de estratégias para gestão dos recursos hídricos.

Experimentalmente, as medições de evapotranspiração podem ser realizadas, com bastante acurácia, dentre outros, a partir do método do balanço hídrico, do método do balanço de energia e do método de correlações turbulentas (SANTOS, 2009). No entanto, para estimar

a distribuição espacial da ET em áreas com grande cobertura espacial (em escala regional) por estes métodos nem sempre é possível, a instalação e manutenção destas pesquisas por longos prazos em grandes áreas são onerosas, devido a necessidade de numerosas instalações, e nem sempre ocorrem com a frequência necessária, como também apresentam grandes limitações em relação a acentuada heterogeneidade de áreas maiores (SANTOS, 2009; LIU et al., 2012).

O desenvolvimento e aplicação de metodologias para estimativas de ET por meio de técnicas de sensoriamento remoto é uma ferramenta promissora, uma alternativa eficiente e de baixo custo com potenciais aplicações em estudos ambientais, (NISHIDA et al., 2003), hidrológicos e climatológicos. Os produtos globais de ET do *Moderate resolution Imaging Spectroradiometer* -MODIS, ou seja, MOD16 ET (MU et al., 2007; MU et al., 2011) e do *Global Land Data Assimilation System* - GLDAS (RODELL et al., 2004), se qualificam como conjuntos de dados, que estão amplamente disponíveis, possuem grande cobertura e encontram aplicações operacionais, fornecendo conjuntos de dados de ET contínuos em uma escala global que são baseados nas abordagens Penman-Monteith e em simulações com Modelo de Superfície Terrestre (LSM), respectivamente (KHAN et al., 2018).

A metodologia simplificada e ajustada a partir de algoritmos (Modelagem Simplificada Para Estimativa do Balanço de Energia à Superfície em Escala Regional - R-SSEB) existentes a dados de sensores orbitais disponíveis para a região Nordeste do Brasil, aplicada por Araújo (2014), se apresenta como uma excelente alternativa para obtenção de produtos derivados do BE e da ET com facilidade e boa precisão e por ser facilmente adaptável a calibrações locais (ARAÚJO, 2017).

Silva (2014) calibrou o modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) para a Bacia Hidrográfica Submédio do Rio São Francisco (BHSRSF), e validou a componente de evapotranspiração potencial (ETP), obtendo valores satisfatórios para todas as localidades selecionadas, verificando que a modelagem do sistema ambiental para análise das componentes do balanço hidrossedimentológico utilizando o modelo apresentou desempenho satisfatório em regiões semiáridas. Silva et al. (2018) aplicaram o SWAT para simular e avaliar a resposta do modelo na quantificação das variáveis hidrológicas escoamento superficial, evapotranspiração potencial, água armazenada no solo, produção de água e sedimentos para alterações de uso e cobertura do solo na BHSRSF.

Neste sentido, considerando a complexidade e importância de estimativas confiáveis de ET para entendimentos da dinâmica dos processos hidrológicos em escala de bacias, como também para avaliação, planejamento e gestão dos recursos hídricos, este trabalho visou avaliar o desempenho da aplicação de técnicas de modelagem ambiental, de sensoriamento remoto por

meio de produtos dos modelos baseados em balanço de energia e produtos de dados globais de reanálise em relação a dados calculados por meio do método do balanço hídrico para localidades inseridas na Bacia Hidrográfica do rio Piranhas-Açu, no Estado do Rio Grande do Norte, região semiárida do NE (Nordeste) brasileiro, assim como analisar o comportamento da ET e das componentes hidrológicas gerados pelo método da modelagem ambiental.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. ÁREA DE ESTUDO

Foram selecionadas localidades inseridas na porção da bacia hidrográfica do Rio Piranhas-Açu no estado do Rio Grande do Norte (Figura 1), para avaliação do desempenho de métodos de estimativa de evapotranspiração real.

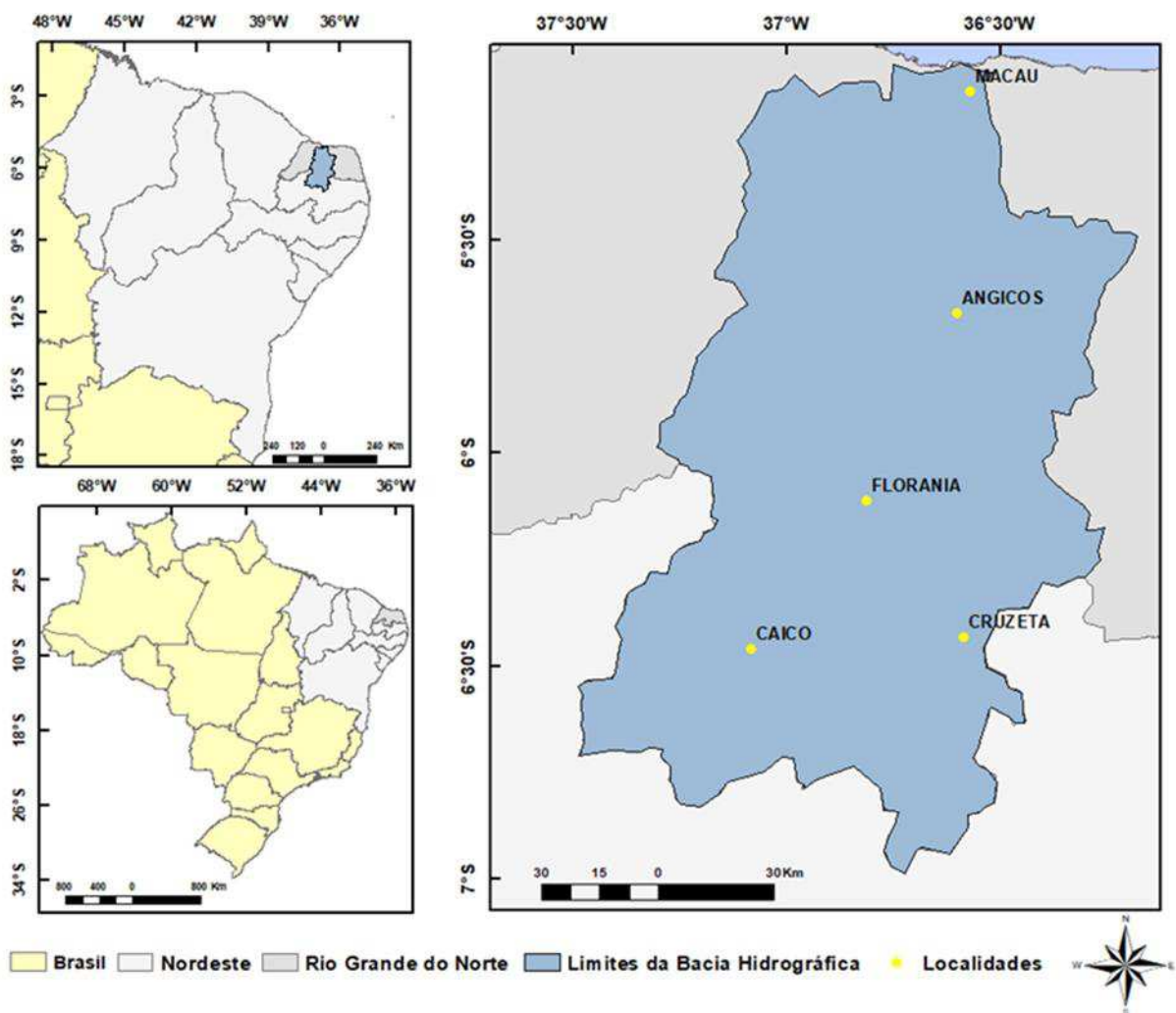


Figura 1 - Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Piranhas-Açu (BHRPA) e distribuição espacial das localidades selecionadas.

A Bacia Hidrográfica do rio Piranhas-Açu localizada na região semiárida do Nordeste brasileiro, ao longo de sua rede de drenagem possui reservatórios superficiais que correspondem às suas principais fontes hídricas, responsáveis inclusive pelo atendimento de demandas de água externas, que estão associadas a bacias adjacentes (ANA, 2018). Ao longo do seu curso desenvolvem-se diversas atividades econômicas, que incluem, entre outras, a agropecuária, a mineração, a aquicultura que demandam expressivo volume de água (ANA, 2018; MOURA, 2007).

## 2.2. PRODUTOS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Visando o estudo da evapotranspiração na Bacia Hidrográfica do rio Piranhas Açu, estimativas de ET para o período de janeiro de 2002 a dezembro de 2011 obtidas por meio de simulação hidrológica com o SWAT, produtos de ET baseados em dados orbitais dos modelos de escala global MOD16 e de reanálise GLDAS e do modelo regional R-SSEB foram avaliados em comparação com dados de ET calculados pelo método do balanço hídrico.

A ET pelo método do BH foi calculada para as cinco localidades a partir de informações de Capacidade de Água Disponível pelo Solo - CAD, obtidas por Sales (2019) por meio de interpolação de dados do mapa elaborado por Brito (2000)) da distribuição espacial de valores, fornecidos pela EMBRAPA - Solos unidade de Recife, para tipos de solos da região Nordeste do Brasil e dados de precipitação e temperatura média de estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET e pluviométricas da Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte - EMPARN, como também temperaturas médias estimadas por meio do software Estima T, proposto por Cavalcanti e Silva (1994), seguindo o modelo proposto por Thornthwaite e Mather (1955), utilizando planilha eletrônica desenvolvida por Rolim et al. (1998).

Os dados globais de ET do MODIS utilizados foram adquiridos junto à plataforma Reverb disponibilizada pela agência EOSDIS (Earth Observing System Data and Information System) pertencente à NASA, as informações para a área de estudo foram obtidas utilizando o Tile h14v09 e h14v10, com base nos produtos de 8-day a 1 km<sup>2</sup> de resolução espacial e referentes ao produto MOD16A2, que utiliza o modelo apresentado em Mu et al. (2011).

Desenvolvido por Mu et al. (2007) e Mu et al. (2011), o algoritmo MOD16 permite obter a ET através da utilização integrada de dados meteorológicos de superfície e de reanálise e de dados de sensoriamento remoto do sensor MODIS (*Moderate resolution Imaging Spectroradiometer*), e aplicação da equação de Penman-Monteith, fornecendo uma considerável série temporal de dados de ET para todo o globo (LIAQAT e CHOI, 2017).

Foi utilizado o produto ET estimado usando Modelagem Simplificada Para Estimativa do Balanço de Energia à Superfície em Escala Regional R-SSEB. A técnica empregada nesse modelo foi desenvolvida por Araújo (2014), a partir de metodologia simplificada e ajustada tendo como base algoritmos existentes e uso de dados de sensoriamento remoto disponíveis para o NEB.

O R-SSEB foi projetado para simular fluxos de superfície, incorporando variáveis derivadas de dados orbitais sem a necessidade de informações de superfície, permite contabilizar através de uma série de equações os fluxos radiativos à superfície, ou seja o saldo de radiação (Rn), por meio do qual são estimados componentes do balanço de energia: fluxo de calor no solo (G), fração evaporativa (FE), fluxo de calor sensível (H) e calor latente (LE), sendo a ETr obtida diretamente a partir da fração evaporativa e do Rn.

Neste trabalho foram usados dados médios mensais de evapotranspiração do Modelo de reanálise *Global Land Data Assimilation System* (GLDAS) correspondentes ao modelo *Noah Land Surface Model* (NOAH) GLDAS\_NOAH25\_Mv2.1 adquirido junto à plataforma Giovanni (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>) para as coordenadas das localidades em que foram estimados valores de evapotranspiração usando o método do BH. Os produtos GLDAS têm resolução espacial de 0,25°, resolução temporal de três horas, o conjunto de dados da evapotranspiração mensais são gerados através da média temporal dos produtos de 3 horas.

A evapotranspiração obtida por meio de simulação hidrológica, usando o SWAT, na BHRPA, também foi utilizada neste trabalho (SIQUEIRA et al., 2019). Os dados de evapotranspiração da modelagem foram extraídos para cada sub-bacia correspondente à posição das cinco estações meteorológicas e pluviométricas selecionadas para realização do balanço hídrico.

### 2.3. MEDIDAS ESTATÍSTICAS PARA AVALIAÇÃO DOS MODELOS

Buscando avaliar o desempenho dos modelos, as séries temporais de evapotranspiração oriundas da simulação pelo modelo hidrológico SWAT, do produto regional R-SSEB e dos produtos globais MOD16 ET e GLDAS foram comparadas com as estimativas obtidas por meio do Balanço Hídrico para as localidades selecionadas e inseridas na área da BHRPA.

Foram usadas as medidas estatísticas Desvio Padrão (DP), e a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) para análise dos erros proporcionados pelas estimativas e o Coeficiente de Correlação (R) de Pearson para análise de correspondência entre as estimativas.

### 2.3.1. Diagrama de Taylor

A correspondência entre as estimativas de ET dos modelos em relação ao método do BH foi avaliada usando uma abordagem para comparação simultânea entre métodos de estimativa e dados observados/método de referência introduzida por Taylor (2001), a qual resume concisamente o grau de correspondência em um diagrama.

O diagrama de Taylor fornece visualmente um resumo das estatísticas: desvio-padrão, correlação (coeficiente de correlação linear de Pearson) e raiz quadrada da média do quadrado das diferenças centralizadas dos dados observados e modelados, de forma que facilita a distinção dos resultados, para o qual se tem um ponto de referência para essas três métricas que indica o melhor resultado (PEREIRA et al., 2014; GUIMARÃES et al., 2016).

As distâncias radiais da origem aos pontos são proporcionais aos desvios padrão e as posições azimutais fornecem o coeficiente de correlação de Pearson (representada no arco principal), a raiz quadrada da média do quadrado das diferenças centralizadas é proporcional (nas mesmas unidades que o desvio padrão) à distância do ponto do dado modelado ao ponto do dado de referência (TAYLOR, 2001).

### 2.3.2. Desvio Padrão

O desvio Padrão é uma medida de dispersão dos dados, estima o grau, em média, que cada valor se distancia da própria média aritmética, é obtido extraindo a raiz quadrada da variância (HALLAK e PEREIRA FILHO, 2011) (Eq. (1)).

$$DP = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x - \bar{x})^2} \quad (1)$$

em que,  $x$  é uma variável aleatória. Este índice é dado nas mesmas dimensões que a variável analisada.

### 2.3.3. Coeficiente de correlação linear de Pearson

O coeficiente de correlação linear de Pearson  $r$  (Eq. (2)) é uma medida estatística usada para avaliar a intensidade da associação linear entre duas variáveis, (SANTHI et al., 2001). O coeficiente de correlação  $r$  varia entre  $-1$  e  $1$ , sendo quanto mais próximo de  $1$  e  $-1$  maior é a tendência de relação linear positiva (diretamente correlacionadas) e negativa (inversamente



correlacionada) respectivamente e quando estiver próximo de zero indica ausência de correlação linear entre as variáveis.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S}_i) \times (O_i - \bar{O}_i)}{\sqrt{[\sum_{i=1}^N [\sum (O_i - \bar{O}_i)^2] \times \sum_{i=1}^N [\sum (S_i - \bar{S}_i)^2] ]}} \quad (2)$$

em que,  $O_i$  é o valor tido como referência para o observado;  $S_i$ , o evento simulado pelo modelo;  $\bar{S}_i$ , é a média dos eventos Simulados no período de simulação;  $\bar{O}_i$ , é a média dos eventos observados e  $N$ , o número de eventos.

#### 2.2.4. Raiz do Erro Médio Quadrático e Raiz Quadrada da Média do Quadrado das Diferenças Centralizadas

Segundo Fox (1981) Raiz do Erro Médio Quadrático é a raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE). Este parâmetro fornece uma medida média da precisão do modelo através da raiz quadrada da média do quadrado da diferença entre valores simulados e de referência. Destaca-se que assim como o erro médio quadrático é uma das medidas de diferença ou erro cada vez mais usadas na comparação e avaliação de modelos de simulação, podendo ser usada para substituir os índices baseados em correlação e tendências e principalmente como medidas para fornecimento de informações de precisão (WILLMOTT et al., 1985). O RMSE é calculado pela Eq. (3)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2} \quad (3)$$

em que,  $O_i$  é o valor tido como referência para o observado;  $S_i$ , o evento simulado pelo modelo; e  $N$ , o número de eventos. Este índice é dado nas mesmas dimensões que a variável analisada.

A Raiz Quadrada da Média do Quadrado das Diferenças Centralizadas RMS (Eq. (3) é a diferença de RMSE removida pela média (TAYLOR, 2001), assim calculada com a Eq. (4).

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(S_i - \bar{S}_i) - (O_i - \bar{O}_i)]^2} \quad (4)$$

em que, os significados das variáveis são os mesmos da Eq. (2).

### 2.3. COMPONENTES DO BALANÇO HÍDRICO COM O MODELO SWAT

As principais componentes do balanço hídrico considerados pelo modelo SWAT são: a quantidade total de chuva que precipita sobre a área da bacia durante o tempo de simulação (PRECP - precipitação total), a evapotranspiração potencial da bacia (ETP - evapotranspiração potencial), a evapotranspiração real da bacia (ET- evapotranspiração), o volume de água que é propagado pelos canais da rede de drenagem até o exutório da bacia (WYLD - produção de água total da bacia que alcança o canal), a produção de água que inclui as contribuições do escoamento superficial (SURQ - escoamento superficial), água que retorna do aquífero raso e entra no canal (GWQ - escoamento subterrâneo) menos as perdas: água armazenada no solo nas HRU's (SW - quantidade de água no solo) ou percolada no solo e que se torna recarga do aquífero (PERC - percolação).

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1. COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE ESTIMATIVAS DE ET

Na Figura 2 são observadas as matrizes de correlação e dispersão entre os dados acumulados mensais da ET calculada por meio do BH e obtidos por simulação ambiental com modelo SWAT, aplicação do modelo R-SSEB e dos produtos de evapotranspiração global MOD16 e GLDAS. Os diagramas de dispersão entre os valores de referência e estimados pelos métodos permitem entender até que ponto os modelos subestimam ou superestimam os resultados do método de referência para cada localidade.

Ao analisar os diagramas de dispersão é possível observar que as estimativas de ET do SWAT e do R-SSEB tendem a ser subestimadas pelos valores de ET do BH para todas as localidades avaliadas, as estimativas do método do balanço hídrico tendem a ser subestimadas para todas as localidades pelo produto de ET global do GLDAS, enquanto as estimativas do MOD16 para as localidades Angicos, Florânia e Macau.

Xue et al. (2013) ao avaliaram estimativas da ET do MODS e do GLDAS (ET) em duas bacias hidrográficas no Planalto do Tibete, em comparação com estimativas pelo método

tradicional de BH, constataram que em ambas as bacias, o GLDAS apresentou subestimação relativamente pequena, enquanto o MODIS superestimou muito.

Araújo et al. (2017) comparou dados de ET anuais do R-SSEB com produtos do GLDAS e MOD16 para o NE brasileiro como forma de validação, verificando que menores valores de Erro Médio Absoluto (EMA) e Erro Médio Percentual (EMP) foram obtidos entre os modelos R-SSEB e GLDAS.

Observa-se uma boa representação dos dados de ET estimados pelos modelos MOD16 e RSSEB e SWAT em comparação aqueles calculados pelo BH (Figura 2). O SWAT e o R-SSEB apresentaram boa correlação para todas as localidades, sendo que o R-SSEB, assim como o GLDAS apresentou melhor correlação que o SWAT para a localidade de Florânia. Com base nos coeficientes de correlação os dados do BH apresentam maior concordância com os dados da modelagem com o SWAT e método derivado de dados orbitais R-SSEB.

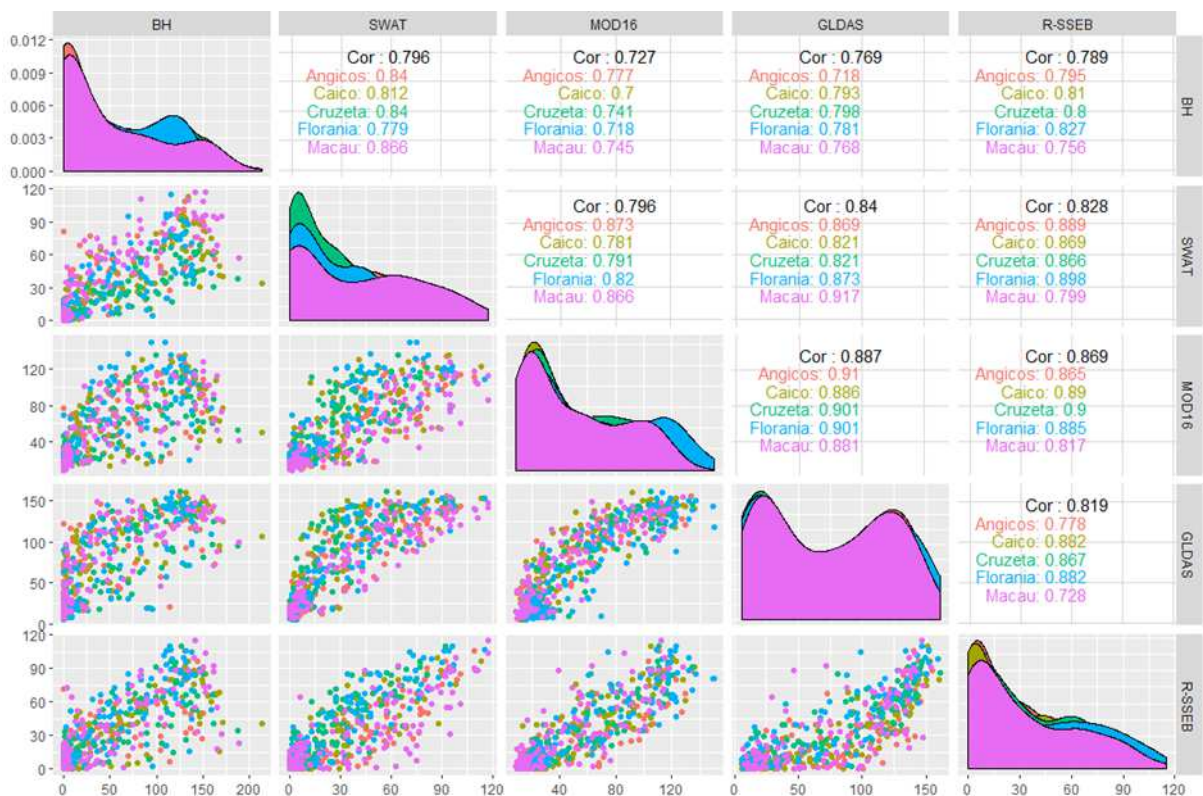


Figura 2 - Matrizes de dispersão e correlação linear de Person entre os dados de ET do BH, SWAT, R-SSEB, MOD16 e GLDAS.

Avaliando os diagramas de dispersão apresentados na Figura 2, observa-se que o GLDAS tende a deslocar seu eixo da dispersão para valores acima de 50 mm/mês, o que indica que o mesmo superestima os demais modelos. Ao comparar o BH e SWAT e o BH e R-SSEB

observa-se uma maior concentração dos dados na faixa de ET inferior a 80 mm/mês, o que indica uma maior proximidade entre os modelos. Analisando as dispersões para os conjuntos de dados verifica-se, em todos os casos, que os menores valores de ET se apresentam concentrados, enquanto os maiores valores mostram-se mais dispersos.

As comparações dos modelos SWAT, R-SSEB, MOD16 e GLDAS, em relação ao método do BH para estimativa da ET durante o período de estudo são apresentadas por meio combinação de todos os resultados para o acumulado mensal da ET para as localidades (Figura 3) com as representações estatísticas por meio de diagramas de Taylor.

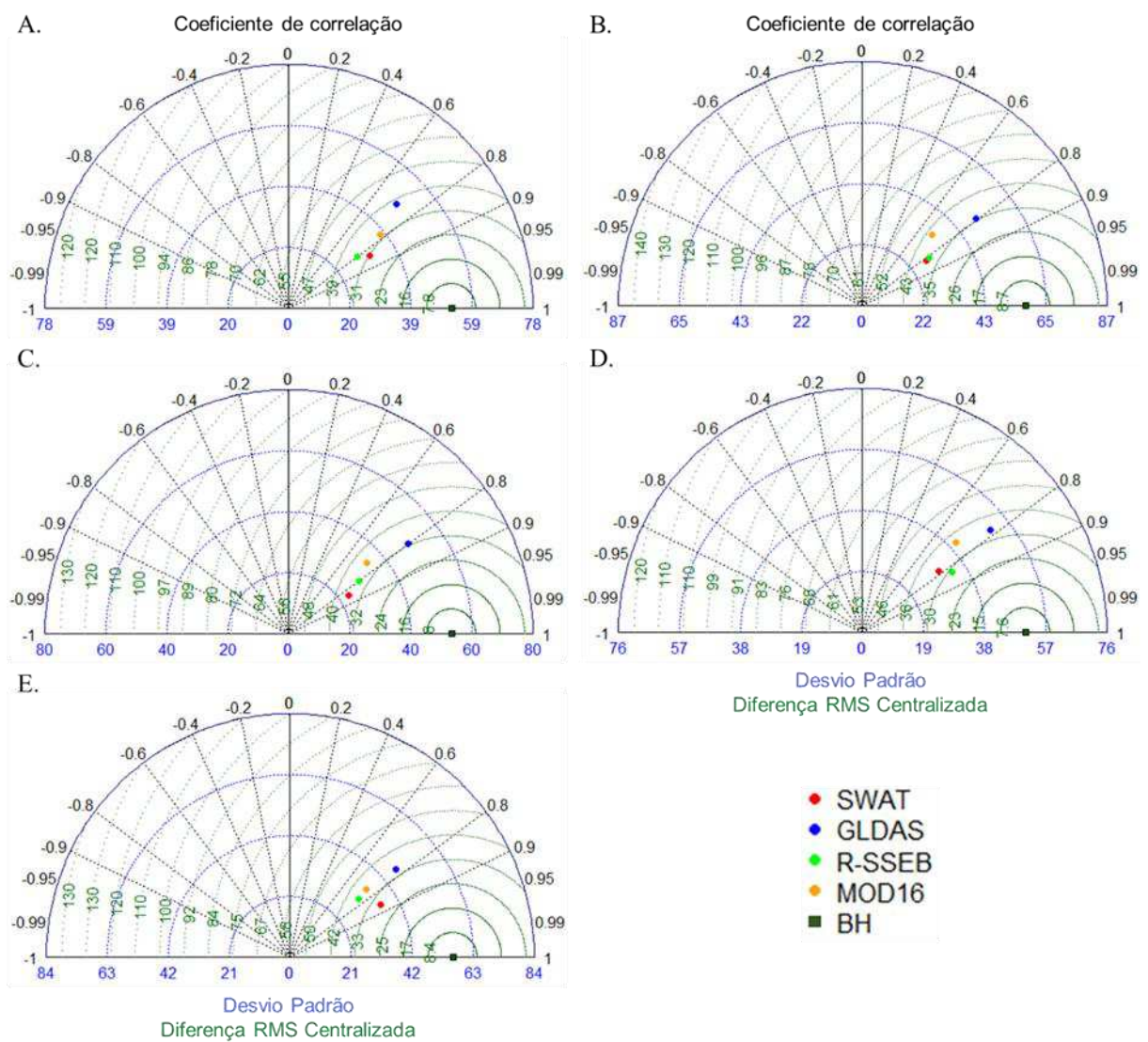


Figura 3- Diagramas de Taylor ilustrando os resultados das estatísticas da comparação do acumulado mensal da ET entre SWAT, R-SSEB, MODIS, GLDAS e o método de referência BH para as localidades (A) Angicos, (B) Caicó, (C) Cruzeta, (D) Florânia e (E) Macau.

É possível observar que os modelos apresentaram correlação a partir de 0,7, boas faixas de correlações são verificadas para o SWAT nas localidades de Angicos, Caicó, Cruzeta e Macau e o R-SSEB em todas as localidades, enquanto menores faixas de correlações são observadas no MOD16 para as localidades de Caicó, Cruzeta, Florânia e Macau e no GLDAS para a localidade de Angicos.

O GLDAS apresentou os maiores valores de desvio padrão em todas as localidades, seguido pelo MOD16, no entanto, para a localidade de Macau o modelo SWAT exibiu praticamente o mesmo valor de desvio padrão que o MOD16. Os menores valores de desvios foram verificados para as localidades de Caicó Cruzeta e Florânia pelo modelo SWAT e para as localidades Angicos e Macau como R-SSEB.

Considerando a diferença RMS centralizada verifica-se que os produtos R-SSEB e SWAT têm um comportamento semelhante para as localidades de Caicó e Cruzeta, o R-SSEB e MOD para Macau e o SWAT e o MOD para Angicos. Quanto ao GLDAS, este apresentou melhor representação espacial da diferença RMS para as localidades de Caicó e Cruzeta.

Para comparar a dinâmica temporal das estimativas de ET do SWAT, R-SSEB, MOD16, GLDAS em relação aos valores calculados pelo método do BH, foi realizada a análise da variabilidade sazonal dos dados para as cinco localidades. Os perfis da ET acumulada mensal agrupados para os trimestres que remetem as estações do ano são apresentados na Figura 4.

A análise da variabilidade sazonal dos acumulados mensais das estimativas considerando todos os anos analisados permitiu observar que o R-SSEB, MOD16 e o SWAT, de forma geral apresentam certa similaridade ao do método do BH quanto aos totais estimados para os períodos seco e chuvoso. Onde, nota-se que os maiores valores são observados no período chuvoso, com destaque para a estação de outono e os menores no período seco.

Ao comparar a ET do conjunto de dados do MODIS (MOD16) com as estimativas de ET do SWAT em diferentes escalas espaciais na Sixth Creek Catchment, Sul da Austrália Abiodun et al. (2018) encontraram resultados análogos quando compararam MOD e SWAT, onde o MOD16 simula maior ET no período de inverno. Enquanto, o SWAT no período de verão. Porém Abiodun et al. (2018) observaram que a concordância entre os produtos se mostrou mais consistente durante a estação de verão.

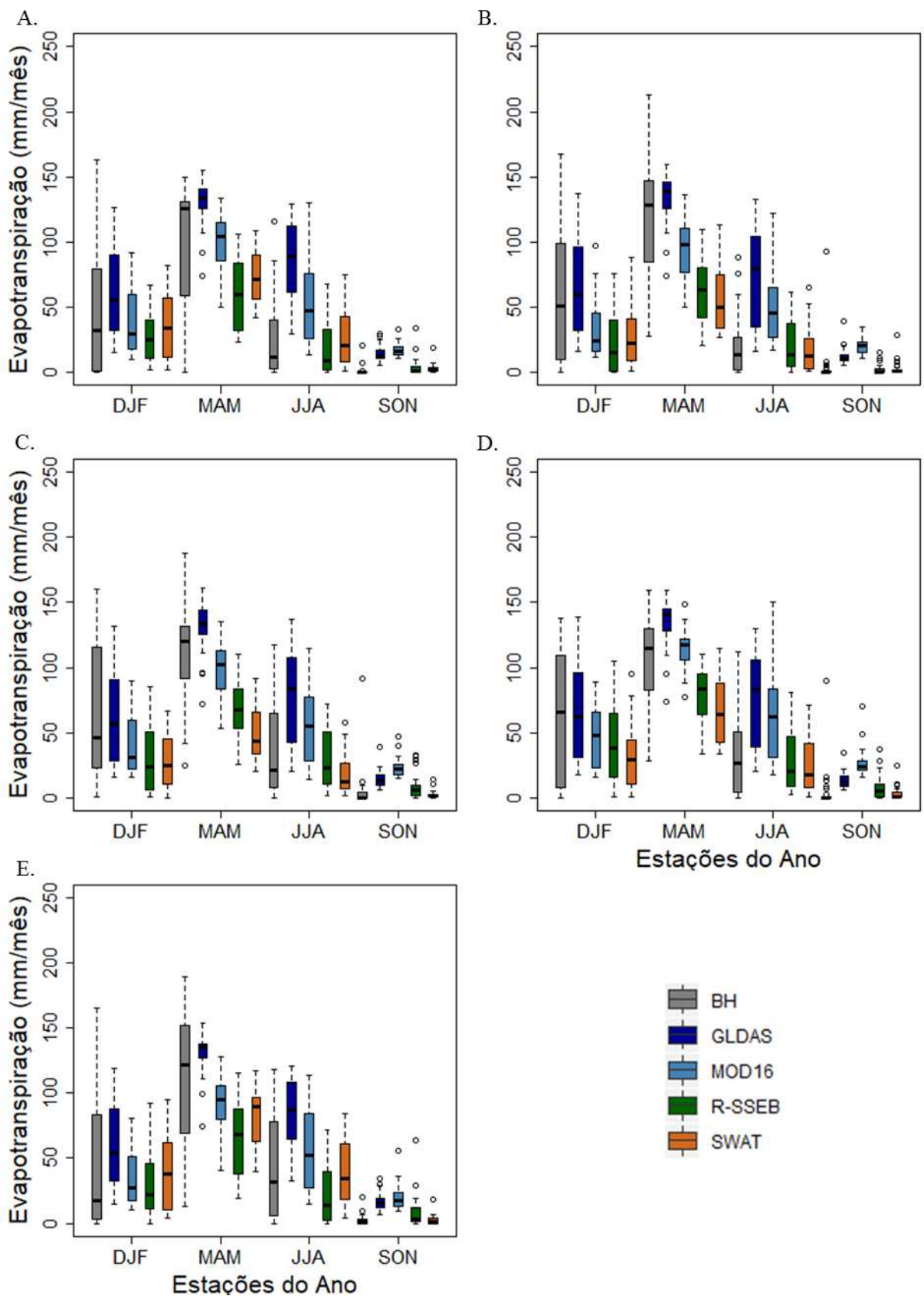


Figura 4 - Variação das estimativas de ET acumulada mensal (mm) pelos métodos BH, SWAT, R-SSEB, MOD16, GLDAS no período de janeiro 2002 a dezembro de 2011 para as localidades (A) Angicos, (B) Caicó, (C) Cruzeta, (D) Florânia e (E) Macau.

Os valores máximos e mínimos dos produtos do MOD16 e GLDAS não coincidem com os dados calculados pelo método do BH, enquanto, nos trimestres de DJF e JJA os valores mínimos dos modelos SWAT e R-SSEB são próximos aos do BH, e no trimestre JJA os valores máximos são semelhantes para a localidade de Angicos e Caicó. O modelo SWAT apresenta uma distribuição temporal e espacial da ET semelhante ao R-SSEB com destaque para os trimestres DJF e JJA.

### 3.2. COMPONENTES DO BALANÇO HÍDRICO

Considerando a distribuição espacial das componentes PRECP e WYLD (Figura 5) pode-se observar que áreas com maiores registros de acumulados médios anuais de precipitação apresentam maiores contribuições para propagação e produção total de água na bacia, as maiores frequências das médias acumuladas de precipitação ocorreram para valores acima de 300 (mm), já a maior frequência para WYLD foi verificada na faixa de 25 a 50 (mm), com distribuição nas áreas ao Norte e ao Sul da bacia. Na região semiárida do Brasil, a falta de chuvas não é a responsável pela oferta insuficiente de água na região, mas sua má distribuição, associada a uma alta taxa de evapotranspiração (CGEE, 2016).

As componentes PRECP e WYLD são responsáveis por fornecer água suprindo a demanda de ET, analisando a distribuição dessas componentes em conjunto com a ET é possível observar que para as áreas com maiores registros médios dos acumulados de precipitação e produção de água também foram obtidos os maiores valores de ET, principalmente nas regiões norte e sul da bacia.

Silva et al. (2017) ao analisar as condições médias mensais das componentes do balanço hidrossedimentológico geradas por modelagem para a BHSRSF para o ano de 2010 nas condições atuais de uso e ocupação do solo verificou que grande parte da precipitação é removida principalmente por meio da evapotranspiração ET com a segunda parcela mais significativa atribuída ao escoamento superficial.

O ciclo hidrológico pode ser modificado principalmente pela alteração na relação entre precipitação e evapotranspiração, e como consequência resultando em modificações no regime hidrológico de uma bacia (COSTA et al., 2003).

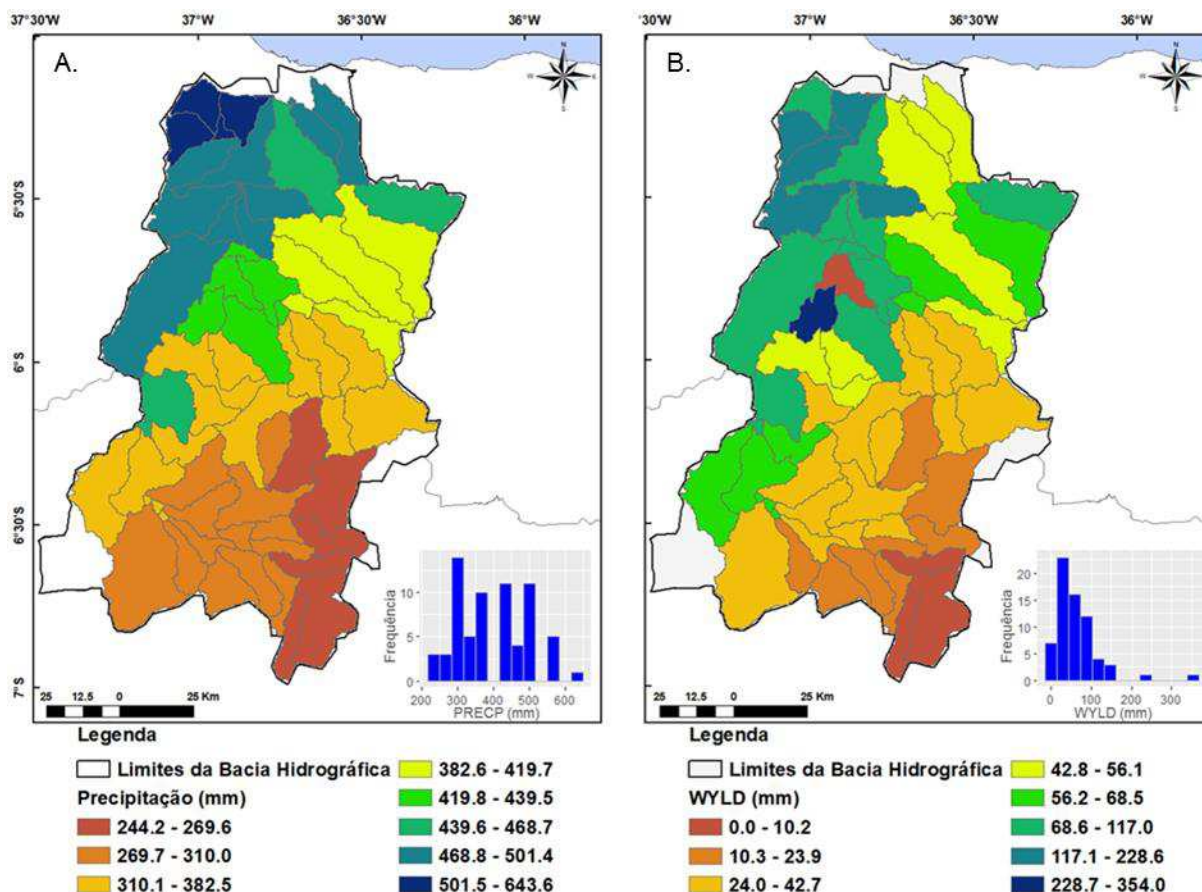


Figura 5 - Distribuição espacial média dos totais acumulados anuais das componentes hidrológicas PRECP (A) e WYLD (B) na região da Bacia do rio Piranhas-Açu, trecho Rio Grande do Norte.

Com relação a distribuição espacial da ETP e ET (Figura 6A e 6B) respectivamente, é possível observar que não necessariamente as regiões da bacia com maior potencial de perdas de água para a atmosfera apresentam maiores valores de ET. É possível verificar altos valores de evapotranspiração potencial (ETP) simulada na BHRPA, sendo que as áreas nas regiões sudoeste e norte apresentaram menores valores de ETP. Ao analisar a evapotranspiração potencial para a Bacia hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF) região semiárida do NE brasileiro, Silva (2014), verificou que a área possui elevada taxa de ETP quando comparada as demais regiões do Brasil.

Na região semiárida brasileira as características climáticas, a proximidade da linha do Equador, pois as baixas latitudes condicionam à elevada disponibilidade energética, resultam em elevadas demandas evapotranspiratórias, que reduzem a umidade do solo e a quantidade de água, o que em conjunto com a precipitação reduzida e irregular durante o ano promovem menor disponibilidade hídrica (CORREIA et al., 2011; SILVA, 2014).



Demandas elevadas de ET são verificadas ao Norte da bacia em áreas com predominância de uso e ocupação do solo classificadas como agrícolas e corpo d'Água Continental e que abrangem todos os tipos de solo presentes na região da bacia. As áreas com predominância dos solos dos tipos Neossolo Litólico e Luvisolo Crômico apresentaram menores valores de ET.

Analisando a distribuição de frequência das médias dos acumulados anuais, observa-se para a ETP maior ocorrência de estimativas variando de 2700 a 2900 mm, com exceção das maiores estimativas de ETP que se apresentaram concentradas apenas para duas sub-bacias na região Norte da bacia, verifica-se ausência de padrão de distribuição para regiões específicas. Quanto a distribuição da frequência para a ET, nota-se ausência de valores acumulados entre 500 e 1800 mm, maior ocorrência de valores na faixa de 250 a 375 mm.

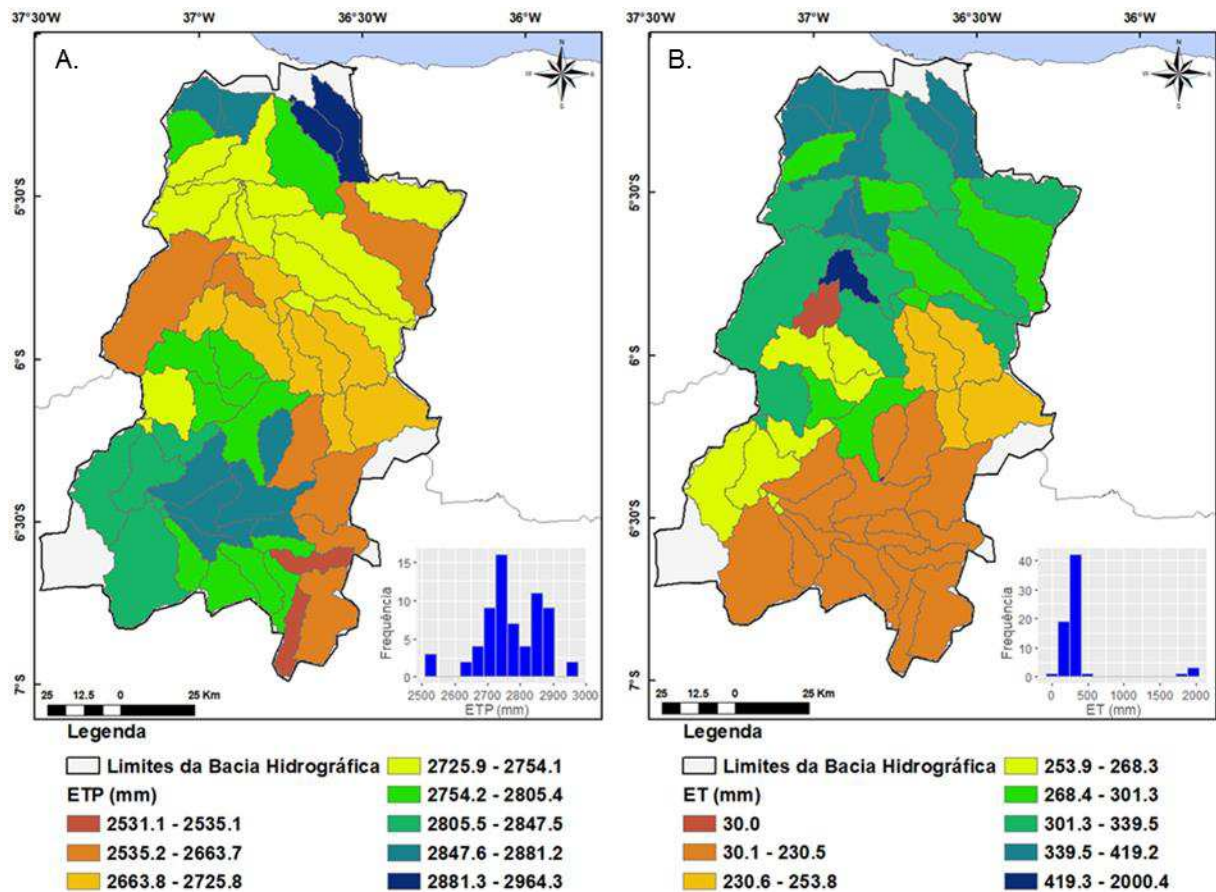


Figura 6 – Distribuição espacial média dos totais acumulados anuais das componentes hidrológicas ETP (A) e ET (B) na região da Bacia do rio Piranhas-Açu, trecho Rio Grande do Norte.

Assim como para a ET e a PRECP (Figuras 6A e 6B) respectivamente, as áreas com maiores registros de acumulados médios anuais para o escoamento subterrâneo (Figura 7B) são observadas no norte da bacia. A frequência de ocorrência de escoamento subterrâneo elevado é baixa, maiores frequências das médias acumuladas na faixa de 0 a 100 (mm).

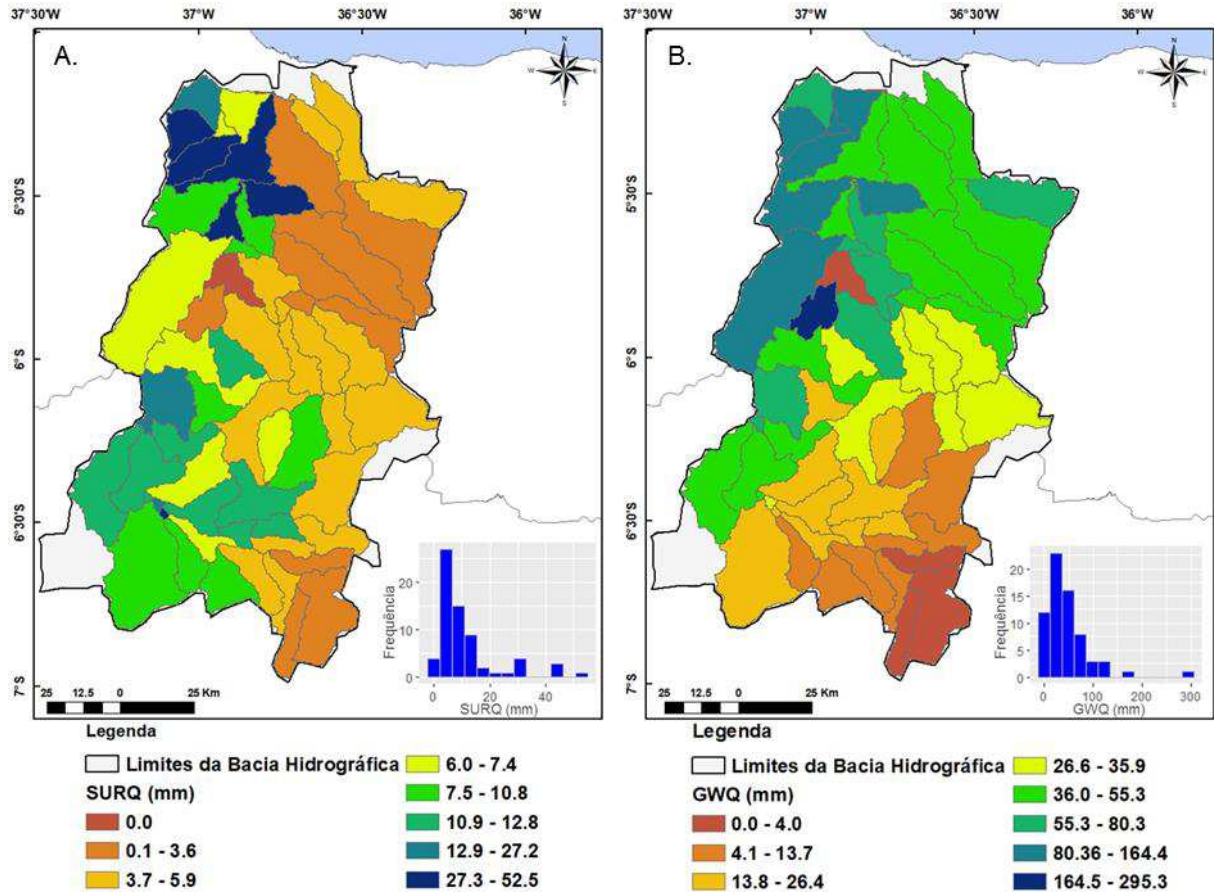


Figura 7 – Distribuição espacial média dos totais acumulados anuais das componentes hidrológicas SURQ (A) e GWQ (B) na região da Bacia do rio Piranhas-Açu, trecho Rio Grande do Norte.

Menores valores de quantidade de água no solo (SW) e percolada (PERC) (Figura 8) foram verificados na região sudeste da bacia, que possui trechos mais elevados. Para grande parte das áreas com maiores valores de SW e PERC correspondem a distribuição dos menores registros de escoamento superficial (SURQ) (Figura 7 A), a redução do escoamento favorece alterações nas componentes do balanço hídrico, sendo possível verificar por meio da distribuição da ET (Figura 6B) que para essas áreas a ET apresentou-se elevada, sendo assim, é possível que o aumento nas taxas de infiltração seja responsável pelo acréscimo na

evapotranspiração. Os valores de escoamento para a área da bacia são baixos, pode-se verificar menor frequência de ocorrência de valores acima de 20 mm.

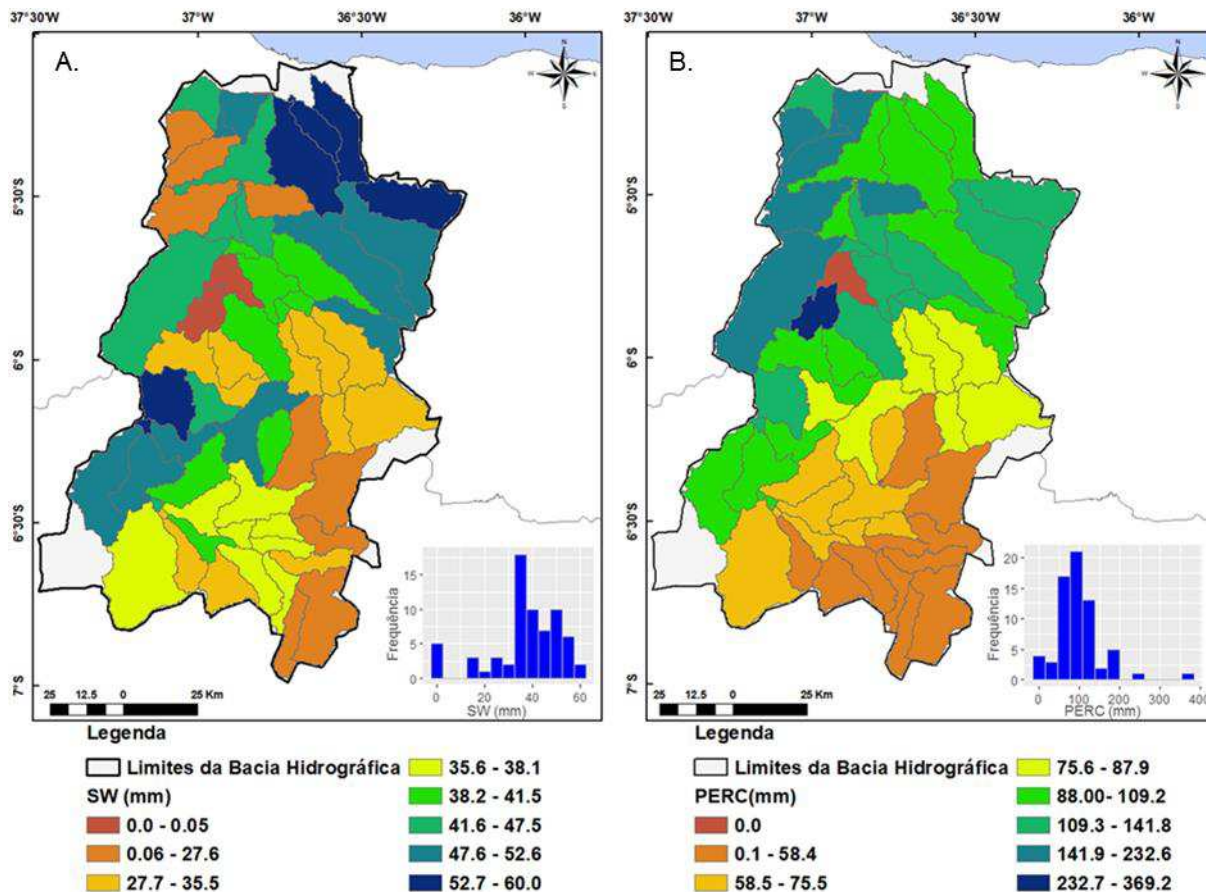


Figura 8 – Distribuição espacial média dos totais acumulados anuais das componentes hidrológicas SW (A) e PERC (B) na região da Bacia do rio Piranhas-Açu, trecho Rio Grande do Norte.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise do desempenho dos métodos consiste em estudos com potencial para o gerenciamento preciso dos recursos hídricos, bem como aplicações à simulação hidrológica e à análise climática de uma determinada região, visto que os produtos podem gerar informações em áreas onde a disponibilidade de dados é um problema.

As correlações e os desvios para os modelos MOD16 baseado em dados orbitais e GLDAS de reanálise, sugerem que esses modelos apresentam menor desempenho em relação aos demais. Entre os métodos a modelagem apresentou a melhor concordância com os valores do BH em praticamente todas as localidades. Em geral, com exceção do GLDAS, os dados dos

produtos tenderam a subestimar a ET calculada pelo método do BH, para as localidades selecionadas.

Os diagramas de Taylor evidenciam que as estimativas do SWAT e R-SSEB refletem com precisão as variações temporais, pois os modelos se assemelham muito com os valores de erro quadrado médio e do desvio padrão, bem como estão entre os melhores valores obtidos quando comparados com os demais modelos.

Com auxílio da análise da variabilidade sazonal das médias dos acumulados mensais das estimativas constatou-se que os modelos R-SSEB, MOD16 e o SWAT, de forma geral apresentam certa similaridade ao do método do BH quanto aos incrementos estimados para os períodos seco e chuvoso. Entretanto não foi possível identificar padrões de distribuição espacial da ET para os perfis ajustáveis entre os métodos e o método de referência.

Considerando a distribuição espacial das médias dos acumulados anuais resultantes da simulação com o SWAT foi possível verificar que as áreas com registros de maiores valores de precipitação apresentam maiores contribuições para propagação e produção total de água na bacia, como também maiores registros médios dos acumulados de ET e escoamento subterrâneo.

Demandas elevadas de ET são verificadas ao Norte da bacia, em áreas com coberturas arbustivas e pastagens com destaque de uso e ocupação do solo em atividades agropecuárias, e com predominância dos solos dos tipos Neossolo Litólico e Luvisolo Crômico apresentaram menores valores de ET.

## **5. 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**, v. 22, p. 2775–2794, 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DO ÁGUAS (Brasil) -ANA. **Plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açu: resumo executivo**. Brasília, 2018. 170 p.

ANDRADE, M. A.; MELLO, C. R.; BESKOW, S. Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.1, p.69–76, 2013.

ARAÚJO, A. L. **Operacionalização do balanço de energia e evapotranspiração em escala regional com dados de sensores orbitais**. Tese (Doutorado em Meteorologia). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2014. 101p.

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**, v. 32, p. 433-446, 2017.

AZEVÊDO, P. V.; SILVA, M. T. Variabilidade da precipitação pluvial na Bacia Hidrográfica do rio Piranhas-Açu no estado do Rio Grande do Norte. XX Congresso Brasileiro de Meteorologia, Maceió, 2018.

BRAUN, P.; MAURER, B.; MULLER, G.; GROSS, P.; HEINEMANN, G.; SIMMER, C. An integrated approach for the determination of regional evapotranspiration using mesoscale modelling, remote sensing and boundary layer measurements. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 76, p. 83-105, 2001.

BRITO, J. I. B. **Modelo regional de estimativa do balanço hídrico aplicado à variabilidade climática do Nordeste do Brasil**. Tese (Doutorado em Recursos Naturais). Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba-UFPB, 2000. 129 p.

CAVALCANTI, E.P.; SILVA, E.D.V. **Estimativa da temperatura do ar em função das coordenadas locais**. VIII Congresso Brasileiro de Meteorologia e II Congresso Latino-Americano e Ibérico de Meteorologia. Sociedade Brasileira de Meteorologia. Belo Horizonte, outubro de 1994. 154-157. 1994.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS – CGEE. Desertificação, degradação da terra e secas no Brasil. Brasília, 2016. 252p

CORREIA, R. C.; KIILL, L. H. P.; MOURA, M. S. B.; CUNHA, T. J. F.; JESUS JUNIOR, L. A.; ARAUJO, J. L. P. A região semiárida brasileira. Produção de caprinos e ovinos no semiárido (T. V. Voltolini, ed.). Embrapa Semiárido, Petrolina. 2011.

COSTA, M. H; BOTTA, A.; CARDILLE, J. A. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia. **Journal of Hydrology**, v. 283, (1-4), p. 206-217, 2003.

DHAR, S.; MAZUMDAR, A. Hydrological modelling of the Kangsabati river under changed climate scenario: case study in India. **Hydrological Processes: An International Journal**, v. 23, n. 16, p. 2394-2406, 2009.

FOX, D. G. **Judging Air Quality Model Performance**. Bulletin of the American Meteorological Society, v. 62, p. 599-609, 1981.

GUIMARÃES, S. O.; COSTA, A. A.; VASCONCELOS JÚNIOR, F. C.; SILVA, E. M.; SALES, D. C.; ARAÚJO JÚNIOR, L. M.; SOUZA, S. G. Projeções de Mudanças Climáticas sobre o Nordeste Brasileiro dos Modelos do CMIP5 e do CORDEX. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 3, p. 337-365, 2016.

HALLAK, R.; PEREIRA FILHO, A. J. Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo com o modelo ARPS: sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de dados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.26, n.4, p. 91 - 608, 2011.

KHAN, M. S.; LIAQAT, U. W.; BAIK, J.; CHOI, M. Stand-alone uncertainty characterization of GLEAM, GLDAS and MOD16 evapotranspiration products using an extended triple collocation approach. **Agricultural and Forest Meteorology**, 252, p.256-268, 2018.

LIAQAT, U. W.; CHOI, M. Accuracy comparison of remotely sensed evapotranspiration products and their associated water stress footprints under different land cover types in Korean peninsula. **Journal of Cleaner Production**, v. 155, p.93-104, 2017.

LIU, G.; LIU, Y.; HAFEEZ, M.; XU, D.; VOTE, C. Comparison of two methods to derive time series of actual evapotranspiration using eddy covariance measurements in the southeastern Australia. **Journal of Hydrology**, v.454-455, p. 1-6, 2012.

LIU, S. M.; XU, Z. W.; ZHU, Z. L.; JIA, Z. Z.; ZHU, M. J. Measurements of evapotranspiration from eddy-covariance systems and large aperture scintillometers in the Hai River Basin, China. **Journal of Hydrology**, v. 487, p. 24-38, 2013.

MOURA, E. M. **Avaliação da disponibilidade hídrica e da demanda hídrica no trecho do Rio Piranhas-Açu entre os Açudes Coremas-Mãe d'Água e Armando Ribeiro Gonçalves**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2007. 140 p.

MU, Q.; HEINSCH, F. A.; ZHAO, M.; RUNNING, S. W. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. **Remote Sensing of Environment**, v. 111, p. 519-536, 2007.

MU, Q.; ZHAO, M.; RUNNING, S. W. Improvements to a MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration Algorithm. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, p. 1781-1800, 2011.

NISHIDA, K.; NEMANI, R. R.; RUNNING, S. W.; GLASSY, J. M. An Operational Remote Sensing Algorithm of Land Surface Evaporation. Ecosystem and Conservation Sciences Faculty Publications. **Journal of Geophysical Research**, v.108, 2003.

PEREIRA, D. P.; LIMA, J. S. S.; XAVIER, A. C.; PASSOS, R. R.; FIEDLER, N. C. Aplicação do diagrama de Taylor para avaliação de interpoladores espaciais em atributos de solo em cultivo com eucalipto. **Revista Árvore**, v.38, n.5, p.899-905, Viçosa, 2014.

RAZIEI, T.; PEREIRA, L. S. Estimation of ETo with Hargreaves-Samani and FAO-PM temperature methods for a wide range of climates in Iran. **Agricultural Water Management**, 121, p. 1-18, 2013.

RODELL, M.; HOUSER, P. R.; JAMBOR, U.; GOTTSCHALCK, J.; MITCHELL, K.; MENG, C. J.; ARSENAULT, K.; COSGROVE, B.; RADAKOVICH, J.; BOSILOVICH, M.; ENTIN, J. K.; WALKER, J. P.; LOHMANN, D.; TOLL, D. The Global Land Data Assimilation System. **Bull. American Meteorological Society**, 85, p. 381–394. 2004.

ROLIM, G. S.; SENTELHAS, P. C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente EXCEL para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 133-137, 1998.

SALES, E. S. G. **Classificação de áreas semiáridas e subúmidas secas utilizando diferentes índices climáticos**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Campina Grande, 2019. 66 p.

SANTHI, C.; ARNOLD, J. G.; WILLIAMS, J. R.; DUGAS, W. A.; SRINIVASAN, R.; HAUCK, L. M. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. **Journal of the American Water Resources Association**, v.37, n.5, p. 1169-1188. 2001.

SANTOS, T. V. Fluxos de calor na superfície e evapotranspiração diária em áreas agrícolas e de vegetação nativa na Bacia do Jacuí por meio de imagens orbitais. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2009. 96p.

SENAY, G. B.; LEAKE, S.; NAGLER, P. L.; ARTAN, G.; DICKINSON, J.; CORDOVA, J. T.; GLENN, E. P. Estimating basin scale evapotranspiration (ET) by water balance and remote sensing methods. **Hydrological Processes**, v.25, p. 4037-4049, 2011.

SILVA, M. T. **Mudança no uso de solo e no aporte de sedimentos na Baca Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco**. Tese (Doutorado em Meteorologia). Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Campina Grande, 2014. 121 p.

SILVA, M. T.; AZEVEDO, P. V.; SILVA, V. P. R.; NOBREGA, B. K. S.; MARIANO, E. B.; AMORIM, M. R. B.; Estimativa da produção de sedimentos na bacia hidrográfica do submédio rio São Francisco. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 2, n. 3, p. 203-211, 2017.

SILVA, V. P. R.; SILVA, M. T.; SINGH, P.; SOUZA, E. P.; BRAGA, C. C.; HOLANDA, R. M.; ALMEIDA, R. S. R.; SOUSA, F. A. S.; BRAGA, A. C. R. Simulation of stream flow and hydrological response to land-cover changes in a tropical river basin. **CATENA**, 162, p. 166-176, 2018.



SIQUEIRA, M. S.; TAVARES, M. T.; ANDRADE, A. S.; LIMA, S. L.; GRANGEIRO, W. S.; BARBOSA, R. R. Aplicação do modelo SWAT na estimativa da evapotranspiração na bacia hidrográfica do rio Piranhas-Açu no estado do Rio Grande do Norte. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing* v. 9, n. 5, p. 254-268, 2019.

TAYLOR,

K. E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. **Journal of Geophysical Research**, v. 106, p. 7183–7192, 2001.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. *Publication in Climatology, Laboratory of Climatology, Centerton*, v. 8, n.1. 1955.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. K.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M.. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.

XUE, B.-L.; WANG, L.; LI, X.; YANG, K.; CHEN, D. SUN, L. Evaluation of evapotranspiration estimates for two river basins on the Tibetan Plateau by a water balance method. **Journal of Hydrology**, v. 492, p. 290–297, 2013.

ZHAO, L.; XIA, J.; XU, C.; WANG, Z.; SOBKOWIAK, L.; LONG, C. Evapotranspiration estimation methods in hydrological models. **Journal of Geographical Sciences**, v. 23, n.2, p.359-369, 2013.

## CAPÍTULO 4

### 1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através da validação constatou-se que o modelo SWAT mostrou ser eficaz na representação da variável evapotranspiração para as sub-bacias avaliadas, mesmo diante da ausência da calibração de parâmetros de sensibilidade. A diferença entre os valores de ET obtidos, além de expor a resposta dos métodos de BH e modelagem ambiental, também pode ser relacionada com efeito da variação das características das informações utilizadas e da quantidade parâmetros envolvidos.

Por meio das estatísticas avaliativas utilizadas para comparação das estimativas da simulação ambiental e dos produtos oriundos de dados orbitais e reanálise em relação com dados de evapotranspiração do método do balanço hídrico para as cinco localidades inseridas na área de estudo ressalta-se que apesar das diferenças entre a ET oriunda dos métodos avaliados e a calculada pelo método do balanço hídrico, no geral foi possível identificar que a simulação com o modelo SWAT ofereceu resultados mais coerentes de evapotranspiração, indicando um potencial expressivo para monitoramento espacial da ET de forma contínua.

Os resultados aqui descritos por meio da simulação hidrológica apontam para possíveis interferências da cobertura vegetal, uso e tipos de solo no processo de evapotranspiração, assim como influências da evapotranspiração nas componentes hidrológicas simuladas com o SWAT.

Ressalta-se que existem diversas incertezas associadas tanto à geração de estimativas de ET por meio de modelos baseados em modelagem ambiental, sensoriamento remoto, dados orbitais e de reanálise, quanto à de dados calculados por meio do BH, que podem refletir na avaliação dos produtos de ET.

### 2. RECOMENDAÇÕES

Sugere-se que a avaliação da importância das componentes hidrológicas e das variáveis climáticas envolvidas no processo de evapotranspiração seja realizada a partir das técnicas de estatística. Contudo, é necessário que sejam realizadas calibração e identificação de parâmetros que representem mais adequadamente as características da cobertura da vegetação, identificação, caracterização e inserção de reservatórios.

Considerando que os produtos de ET obtidos por sensoriamento remoto apresentaram desempenhos satisfatórios, pode-se cogitar realizar a calibração de modelos hidrológicos utilizando as informações obtidas por meio de dados orbitais.