



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL DA CULTURA DA  
SOJA E DO FEIJOEIRO PELO MÉTODO DA RAZÃO DE BOWEN E  
PELO MODELO SSEBop**

**ADRIANO CESAR PEREIRA DE PAULA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM AGRONOMIA**

**BRASÍLIA/DF**

**MARÇO/2018**



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL DA CULTURA DA  
SOJA E DO FEIJOEIRO PELO MÉTODO DA RAZÃO DE BOWEN E  
PELO MODELO SSEBop**

**ADRIANO CESAR PEREIRA DE PAULA**

**ORIENTADOR: Dr. CÍCERO LOPES DA SILVA**

**COORIENTADOR: Dr. LINEU NEIVA RODRIGUES**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM AGRONOMIA**

**PUBLICAÇÃO: 143/2018**

**BRASÍLIA/DF**

**MARÇO/2018**



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL DA CULTURA DA  
SOJA E DO FEIJOEIRO PELO MÉTODO DA RAZÃO DE BOWEN E  
PELO MODELO SSEBop**

**ADRIANO CESAR PEREIRA DE PAULA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM AGRONOMIA.**

**APROVADA POR:**

---

**CÍCERO LOPES DA SILVA, Doutor, Professor Associado IV.**

**Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária – Universidade de Brasília.**

**ORIENTADOR, e-mail: cicero@unb.br**

---

**JOÃO JOSÉ DA SILVA JÚNIOR, Doutor, Professor Adjunto.**

**Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária – Universidade de Brasília.**

**EXAMINADOR INTERNO, e-mail: jjsjunior@unb.br**

---

**GUSTAVO MACEDO DE MELLO BAPTISTA, Doutor, Professor Associado I.**

**Instituto de Geociências – Universidade de Brasília.**

**EXAMINADOR EXTERNO, e-mail: gmbaptista@unb.br**

**BRASÍLIA/DF, 14 de MARÇO de 2018**

## FICHA CATALOGRÁFICA

de Paula, Adriano Cesar Pereira

Estimativa da evapotranspiração real da cultura da soja e do feijoeiro pelo método da razão de Bowen e pelo modelo SSEBop. / Adriano Cesar Pereira de Paula; orientação de Cícero Lopes da Silva. - Brasília, 2018.

88 p.: il.

Dissertação de Mestrado (M) – Universidade de Brasília, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2018.

1. Evapotranspiração real. 2. Sensoriamento remoto.
  3. Recursos hídricos. 4. Razão de Bowen. I. Silva, C. L.
- II. Título.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

de Paula, A. C. P. **Estimativa da evapotranspiração real da cultura da soja e do feijoeiro pelo método da razão de Bowen e pelo modelo SSEBop.** Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2018, 88 p. Dissertação de Mestrado.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Adriano Cesar Pereira de Paula

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: **Estimativa da evapotranspiração real da cultura da soja e do feijoeiro pelo método da razão de Bowen e pelo modelo SSEBop.**

GRAU: Mestre      ANO: 2018

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado para única e exclusivamente propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva para si os outros direitos autorais, de publicação. Nenhuma parte desta dissertação de Mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor. Citações são estimuladas, desde que citada à fonte.

---

ADRIANO CESAR PEREIRA DE PAULA

CPF: 082.290.376-80

Endereço: SCLRN 713 Bloco “C”, Entrada 47, Apt. 101. Asa Norte - Brasília, DF.

Tel.: (61) 9 9949-6762

cesar.adriano087@gmail.com

*A toda minha família e amigos!*

## AGRADECIMENTOS

*Primeiramente a Deus, pelo dom da vida e por me permitir chegar até aqui.*

*Aos meus pais Adão Bispo e Maria Aparecida, por não medirem esforços para garantir que eu pudesse alcançar meus objetivos.*

*Aos meus irmãos, Leandro, Janaína, Jaciara e Leonardo, que de alguma maneira contribuíram para essa conquista.*

*Ao colega de graduação, grande amigo e também meu compadre, Adailton Guimarães, pela amizade verdadeira e imprescindível.*

*Ao amigo de longa data, Antônio Souza, que jamais deixou de acreditar em minha capacidade e sempre foi um de meus maiores incentivadores.*

*A uma pessoa muito especial em minha vida, Angélica Brandão, por todo amor, carinho, apoio e confiança em todos os momentos.*

*A Agência Nacional de Águas, pela oportunidade de estágio durante a graduação, possibilitando a conclusão deste trabalho em nível de Mestrado.*

*Ao Especialista em Geoprocessamento da Agência Nacional de Águas, Morris Scherer-Warren, pelos ensinamentos, apoio, confiança e amizade durante a orientação no trabalho de campo e análise dos dados.*

*Ao Professor Dr. Cícero Lopes da Silva, pela orientação acadêmica, paciência e ensinamentos.*

*Aos Professores da Universidade de Brasília, Dr. João José da Silva Júnior e Dr. Gustavo Macedo de Mello Baptista, pela participação na banca examinadora.*

*Ao Pesquisador da Embrapa Cerrados, Lineu Neiva Rodrigues, pela orientação acadêmica.*

*A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela disponibilização da bolsa de estudos.*

## ÍNDICE GERAL

1. INTRODUÇÃO GERAL.....	1
2. OBJETIVOS .....	4
2.1 Objetivo geral.....	4
2.2 Objetivos específicos .....	4
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	5
3.1 Definição e importância da evapotranspiração .....	5
3.2 Fatores que afetam a evapotranspiração .....	6
3.3 Estimativas da evapotranspiração .....	8
3.4 Balanço de energia pela Razão de Bowen .....	11
3.5 Aplicação do sensoriamento remoto em estimativas da evapotranspiração .....	13
4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	18
5. DESEMPENHO DO MODELO SSEBop NA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL DA CULTURA DA SOJA NO DISTRITO FEDERAL .....	29
5.1 RESUMO.....	29
5.2 ABSTRACT.....	30
5.3 INTRODUÇÃO .....	31
5.4 MATERIAL E MÉTODOS .....	33
5.4.1 Área de estudo.....	33
5.4.2 Dados necessários para execução do modelo SSEBop.....	34
5.4.3 Dados meteorológicos necessários ao método da razão de Bowen .....	35
5.4.4 Modelo SSEBop.....	37
5.4.5 Critério de avaliação das estimativas do modelo SSEBop .....	40
5.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	42
5.5.1 Variáveis do modelo SSEBop.....	42
5.5.2 Evapotranspiração real estimada pelo modelo SSEBop .....	44
5.6 CONCLUSÕES .....	49
5.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50
6. DESEMPENHO DO MODELO SSEBop NA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL DA CULTURA DO FEIJÃO NO DISTRITO FEDERAL .....	54
6.1 RESUMO.....	54
6.2 ABSTRACT.....	55
6.3 INTRODUÇÃO .....	56

6.4 MATERIAL E MÉTODOS .....	59
6.4.1 Área de estudo.....	59
6.4.2 Dados necessários para execução do modelo SSEBop.....	59
6.4.3 Dados meteorológicos necessários ao método da razão de Bowen .....	60
6.4.4 Modelo SSEBop.....	61
6.4.5 Critério de avaliação das estimativas do modelo SSEBop .....	64
6.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	65
6.5.1 Variáveis do modelo SSEBop.....	65
6.5.2 Evapotranspiração real estimada pelo modelo SSEBop .....	67
6.6 CONCLUSÕES .....	71
6.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72

## ÍNDICE DE FIGURAS

### Capítulo I

- Figura 1.** Localização da bacia hidrográfica do Rio Preto e posicionamento das estações micrometeorológicas (EST1 e EST2) utilizadas na obtenção dos dados necessários ao método da razão de Bowen nas duas áreas irrigadas (A e B) com soja. .... 33
- Figura 2.** Ferramenta *ModelBuilder* do software ArcGIS 10.4.1, utilizada na implementação e execução do modelo SSEBop..... 34
- Figura 3.** Estação micrometeorológica utilizada na obtenção dos dados para aplicação do método da razão de Bowen, com respectivos sensores instalados no interior da área irrigada. .... 35
- Figura 4.** Distribuição espacial e temporal da temperatura de superfície nas imagens adquiridas durante os dois ciclos da cultura da soja, em que as cores em azul e vermelho representam respectivamente pontos com menor e maior temperatura. .... 43
- Figura 5.** Variação espacial e distribuição temporal da ETr-SSEBop no interior da área irrigada nas imagens referentes aos dois períodos de cultivo da soja, em que as cores em azul e laranja escuro representam respectivamente pontos de maior e menor ETr. .... 44
- Figura 6.** ETr-RB obtida a partir dos dados micrometeorológicos de cada estação durante os ciclos da soja e ETr-SSEBop estimada pelo modelo nas datas de aquisição das imagens..... 46
- Figura 7.** Dispersão entre a ETr-SSEBop e a ETr-RB ao redor da linha 1:1, coeficientes de correlação (r) e concordância (dr), índices estatísticos RMSE e MBE relativos aos dois períodos de desenvolvimento da cultura da soja nas duas áreas irrigadas. .... 48

### Capítulo II

- Figura 8.** Localização da bacia hidrográfica do Rio Preto e disposição das estações micrometeorológicas (EST1, EST2 e EST3) no interior do pivô central cultivado com feijão. .... 59
- Figura 9.** Distribuição espacial e temporal da temperatura de superfície nas imagens adquiridas durante o desenvolvimento do feijão, em que as cores em azul e vermelho representam respectivamente pontos com menor e maior temperatura. .... 66
- Figura 10.** Distribuição espacial e temporal da ETr-SSEBop no interior da área irrigada durante o desenvolvimento do feijão, em que os pontos em azul e laranja escuro representam respectivamente pontos de maior e menor ETr. .... 67

<b>Figura 11.</b> ETr-RB obtida pelos dados micrometeorológicos das três estações (EST1, EST2 e EST3) durante o ciclo da cultura do feijão e ETr-SSEBop estimada nos pixels correspondentes nas datas de aquisição das imagens. ....	68
<b>Figura 12.</b> Dispersão entre a ETr-SSEBop e a ETr-RB ao redor da linha 1:1, coeficientes de correlação ( $r$ ) e concordância ( $dr$ ) e índices estatísticos RMSE e MBE relativos ao período de desenvolvimento da cultura do feijão. ....	70

## ÍNDICE DE TABELAS

### Capítulo I

<b>Tabela 1.</b> Condições necessárias para aceitação dos valores da razão de Bowen. ....	36
<b>Tabela 2.</b> Classes de erro e condições para rejeição dos valores da razão de Bowen. ....	36
<b>Tabela 3.</b> Classificação do índice de desempenho (Pi) proposto por Alvares et al. (2013a)...	40
<b>Tabela 4.</b> Variáveis requeridas pelo modelo SSEBop na estimativa da evapotranspiração. ....	42
<b>Tabela 5.</b> ETr-RB diária obtida a partir dos dados micrometeorológicos de cada estação (EST1 e EST2) e ETr-SSEBop estimada pelo modelo nos pixels correspondentes, em cada data de aquisição das imagens referentes aos ciclos da soja nas duas áreas irrigadas. ....	46

### Capítulo II

<b>Tabela 6.</b> Variáveis requeridas pelo modelo SSEBop na estimativa da evapotranspiração. ....	65
<b>Tabela 7.</b> ETr-RB diária obtida a partir dos dados micrometeorológicos de cada estação (EST1, EST2 e EST3) e ETr-SSEBop estimada pelo modelo nos pixels correspondentes, em cada data de aquisição das imagens referentes ao período de cultivo do feijão. ....	69

## **ABREVIATURAS E SIGLAS**

ANA	Agência Nacional de Águas
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ET	Evapotranspiração
ETo	Evapotranspiração de referência
ETc	Evapotranspiração de cultura
ETf	Fração evapotranspirativa
ETr	Evapotranspiração real
ETp	Evapotranspiração potencial
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
G	Fluxo de calor no solo
H	Fluxo de calor sensível
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
Kc	Coefficiente de cultivo
LE	Fluxo de calor latente
METRIC	Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
PAD-DF	Programa de Assentamento Dirigido do Distrito Federal
SAFER	Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving
SEBAL	Surface Energy Balance Algorithm for Land
SSEB	Simplified Surface Energy Balance
SSEBop	Operational Simplified Surface Energy Balance
USGS	United States Geological Survey

# ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL DA CULTURA DA SOJA E DO FEIJOEIRO PELO MÉTODO DA RAZÃO DE BOWEN E PELO MODELO SSEBop

## RESUMO GERAL

A evapotranspiração é uma das variáveis mais ativas do ciclo hidrológico e principal componente do balanço hídrico em ecossistemas agrícolas. O monitoramento da sua distribuição espacial e temporal tem relevante importância no gerenciamento da água demandada pelas culturas, seja para fins de irrigação ou em estudos de avaliação ambiental e manejo de bacias hidrográficas. O método da razão de Bowen é fundamentado no balanço de energia para a estimativa da evapotranspiração real (ET<sub>r</sub>) com alta precisão, frequentemente utilizado como critério no teste de outros métodos. Nas últimas décadas, modelos de sensoriamento remoto têm se mostrado promissores na determinação da ET<sub>r</sub>, principalmente pela possibilidade de estimativas em escalas regionais. Dessa forma, o propósito deste trabalho foi avaliar o desempenho do modelo SSEBop na estimativa da ET<sub>r</sub> das culturas de soja e de feijão, ambas irrigadas por pivô central na região da bacia hidrográfica do Rio Preto, subafluente do Rio São Francisco. As estimativas do modelo foram obtidas a partir de imagens digitais dos satélites Landsat 7 e 8 correspondentes aos períodos de cultivo das referidas culturas e comparadas à ET<sub>r</sub> obtida pelo método da razão de Bowen, provinda de estações micrometeorológicas instaladas no interior das áreas irrigadas. As estimativas do modelo foram avaliadas pelo coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) e pelos índices estatísticos de Willmott ( $dr$ ), raiz do erro médio quadrático (RMSE) e erro absoluto médio (MBE). O desempenho do modelo foi classificado pelo índice de desempenho ( $P_i$ ). As estimativas de ET<sub>r</sub> pelo modelo SSEBop para a cultura da soja apresentaram boa correlação ( $r = 0,87$ ) e concordância ( $dr = 0,72$ ) com o método da razão de Bowen, com erro médio quadrático de  $0,82 \text{ mm d}^{-1}$ . O índice MBE apontou uma sobrestimativa do modelo SSEBop de  $0,33 \text{ mm}$  na escala diária. As estimativas da ET<sub>r</sub> na cultura do feijão também apresentaram boa correlação ( $r = 0,85$ ) e concordância ( $dr = 0,71$ ) com o método da razão de Bowen, além de um erro médio quadrático de  $0,48 \text{ mm d}^{-1}$ . No entanto, o índice MBE apontou uma subestimativa de  $0,25 \text{ mm}$  na escala diária. Apesar das pequenas sobrestimativas e subestimativas, o desempenho do modelo SSEBop nas estimativas da ET<sub>r</sub> foi classificado como “muito bom” para as culturas de soja ( $P_i = 0,63$ ) e de feijão ( $P_i = 0,60$ ), comprovando sua utilidade no monitoramento da necessidade hídrica das referidas culturas e no gerenciamento dos recursos hídricos da região.

**Palavras-chave:** sensoriamento remoto, recursos hídricos, pivô central, irrigação.

## ESTIMATION OF SOYBEAN AND BEAN ACTUAL EVAPOTRANSPIRATION BY BOWEN RATIO METHOD AND SSEBop MODEL

### ABSTRACT

Evapotranspiration is one of the more active variables of the hydrological cycle and major component of the water balance in agricultural ecosystems. The monitoring of its spatial and temporal distribution have relevant importance in management of the crop water demand, either for irrigation purposes or in environmental assessment studies and watershed management. The Bowen ratio method is based on energy balance for estimating actual evapotranspiration (ET<sub>r</sub>) with high accuracy, often used as a criterion for test other methods. In the last decades, remote sensing models have been shown to be promising in the determination of ET<sub>r</sub>, mainly due the possibility of estimates in regional scales. Thus, the purpose of this work was to evaluate SSEBop model performance in estimating ET<sub>r</sub> of soybean and bean crops, both irrigated by center pivot in the Rio Preto basin, sub basin of the São Francisco river. The estimates of the model were obtained from digital images of Landsat 7 and 8 satellites corresponding to periods of growing crops and compared to the ET<sub>r</sub> obtained by the Bowen ratio method, provided by micrometeorological stations installed within the irrigated areas. The model estimates were evaluated by the Pearson correlation coefficient ( $r$ ) and by statistical indexes of Willmott ( $dr$ ), root mean squared error (RMSE) and mean bias error (MBE). The model performance was rated by performance index ( $Pi$ ). In the soybean crop, the SSEBop model estimates showed good correlation ( $r = 0.87$ ) and concordance ( $dr = 0.72$ ) to the Bowen ratio method, with root mean squared error of  $0.82 \text{ mm day}^{-1}$ . The MBE index pointed an overestimate of the SSEBop model of  $0.33 \text{ mm}$  in daily scale. ET<sub>r</sub> estimates for bean crop also showed good correlation ( $r = 0.85$ ) and concordance ( $dr = 0.71$ ) to the Bowen ratio method, in addition to a root mean squared error of  $0.48 \text{ mm day}^{-1}$ . However, the MBE index pointed an underestimate of  $0.25 \text{ mm}$  in daily scale. Despite the slight overestimates and underestimates, the performance of SSEBop model estimates was classified as "very good" for soybean ( $Pi = 0.63$ ) and bean crop ( $Pi = 0.60$ ), proving its usefulness in monitoring water needs of the irrigated crops and in the management of water resources in the region.

**Key Words:** remote sensing, water resources, center pivot, irrigation.

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

Nas últimas décadas, o ritmo acelerado do crescimento populacional aumentou a demanda mundial por alimentos. Conseqüentemente, a demanda por água na produção agrícola também aumentou e agravou a crise hídrica em diversas regiões do mundo. Em 2050, a produção mundial de alimentos deverá ser o dobro da atual para que sejam atendidas as demandas populacionais (RAGAB, 2015), apesar de as mudanças climáticas, as alterações no uso da terra e a poluição da água comprometerem a disponibilidade hídrica futura (DAVIES & SIMONOVIC, 2011). No último século, o total anual de água captada pela agricultura, indústria e grandes centros aumentou de 580 para mais de 3.900 km<sup>3</sup> (FAO, 2015) e, atualmente, cerca de 80% da população mundial está exposta a altos níveis de ameaça à segurança hídrica, sobretudo países menos desenvolvidos (VÖRÖSMARTY et al., 2010).

A irrigação, atividade que garante maior produtividade e rentabilidade agrícola em regiões onde a distribuição das chuvas não é uniforme, é responsável por mais de 70% das captações de água no mundo (FAO, 2015). Nos últimos 50 anos, a área irrigada praticamente dobrou e atualmente 23% das áreas cultivadas no mundo são irrigadas, representando mais de 40% da produção mundial de cereais (PORTMANN et al., 2010; SINGH, 2014). Estima-se que a retirada total de água para a atividade de irrigação em todo o mundo esteja aproximadamente entre 2.100 e 2.700 km<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup> (HOOGEVEEN et al., 2015). No Brasil, o volume anual captado e destinado à irrigação é de 31,7 km<sup>3</sup> (FRENKEN & GILLET, 2012). Embora o uso criterioso dos recursos hídricos seja preocupação recorrente, o manejo da irrigação é frequentemente realizado de maneira inadequada, pois a maioria dos produtores irrigam em excesso e vão contra os princípios das boas práticas agrícolas (MONTORO et al., 2011).

A rentabilidade da produção agrícola e a sustentabilidade dos recursos hídricos dependem do correto manejo da água na agricultura, o qual é determinado pela precisão nas estimativas das necessidades hídricas dos cultivos (MAJIDI et al., 2015). Portanto, para gerir adequadamente a água e obter maior retorno, os produtores devem ter a compreensão de como os cultivos respondem à água, como as rotações das culturas podem melhorar a gestão da irrigação e como as mudanças nas práticas agronômicas podem influenciar as necessidades hídricas (NIKOLIDAKIS et al., 2015). A necessidade hídrica dos cultivos irrigados pode ser obtida por meio da evapotranspiração, uma das variáveis mais ativas no ciclo hidrológico e principal componente do balanço hídrico em ecossistemas agrícolas (CARVALHO et al., 2015). A evapotranspiração é um parâmetro chave em estudos de avaliação ambiental e de

manejo de bacias hidrográficas (RAZIEI & PEREIRA, 2013). Portanto, o monitoramento da sua distribuição espacial e temporal tem fundamental importância no gerenciamento da água e nas demandas hídricas das culturas, especialmente em regiões que apresentam escassez hídrica (GEBREMICHAEL et al., 2010).

A evapotranspiração pode ser determinada diretamente por meio de lisímetros que monitoram o armazenamento da água no solo (ALBLEWI et al., 2015) e indiretamente em menores escalas utilizando técnicas convencionais de balanço de energia, como a covariância de vórtices turbulentos e a razão de Bowen (CONSOLI & VANELLA, 2014). O método da razão de Bowen (BOWEN, 1926) é um método micrometeorológico frequentemente utilizado na determinação dos fluxos de calor sensível e latente, capaz de oferecer boa precisão nas estimativas da evapotranspiração. Há ainda equações baseadas em princípios físicos a partir de dados climatológicos, entre as quais uma das mais conhecidas e utilizadas é a de Penman-Monteith, recomendada como método padrão para a estimativa da evapotranspiração de referência (ALLEN et al., 1998). No entanto, a maioria dos métodos de determinação da evapotranspiração tem limitação para utilização em escalas regionais porque não fornecem grande distribuição espacial (CONSOLI & VANELLA, 2014).

Conforme Ferreira & Dantas (2014), o desenvolvimento de modelos agrometeorológicos baseados em dados de sensoriamento remoto tanto em escala regional quanto local tem se mostrado promissor nas estimativas da evapotranspiração, em razão de ser o único meio viável de estimá-la espacialmente em grandes regiões ou continentes. De acordo com Gebremichael et al. (2010), a evapotranspiração não pode ser medida diretamente por sensores orbitais, porém pode ser estimada a partir da radiação da superfície por meio de modelos semi-empíricos de sensoriamento remoto.

De acordo com Peng et al. (2016), os métodos desenvolvidos para a determinação da evapotranspiração por técnicas de sensoriamento remoto são divididos em princípios que se baseiam em: 1) No cálculo do fluxo de calor latente como termo residual do balanço de energia na superfície (BASTIAANSSEN et al., 1998; SU, 2002; ALLEN et al., 2007); 2) Na equação de Penman-Monteith (MU et al., 2011; CHEN et al., 2013); 3) Na temperatura de superfície e índice de vegetação (SENAY et al., 2013; YANG & SHANG, 2013); 4) Na equação de Priestley-Taylor (FISHER et al., 2008; YAO et al., 2013); 5) Em métodos empíricos ou estatísticos (YEBRA et al., 2013; XU et al., 2015). Entre os modelos fundamentados na temperatura de superfície e no índice de vegetação, o SSEBop (*Operational Simplified Surface Energy Balance*) se destaca pela relativa simplicidade e boa precisão nas estimativas da

evapotranspiração real em escalas regionais. Desenvolvido por Senay et al. (2013), o modelo estima a evapotranspiração real a partir da evapotranspiração de referência local e da fração evapotranspirativa, calculada por condições de contorno predefinidas para a temperatura de superfície nos pixels em que o fluxo de calor latente é considerado máximo e mínimo. Embora pouco estudado no Brasil, o modelo SSEBop apresentou boa precisão na determinação da evapotranspiração real nos locais testados (SENAY et al., 2014; SINGH et al., 2014; SENAY et al., 2016).

Dada a importância da evapotranspiração real no ciclo hidrológico das bacias hidrográficas com presença significativa de áreas irrigadas, o seu monitoramento por meio de modelos como o SSEBop possibilita estimativas em grandes áreas cultivadas, favorecendo planejamentos futuros no uso dos recursos hídricos. No entanto, é necessária a verificação da precisão das estimativas de evapotranspiração real fornecidas por esses modelos de sensoriamento remoto em regiões diferentes das quais foram desenvolvidos.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Avaliar o desempenho do modelo SSEBop em estimativas da evapotranspiração real da cultura da soja e do feijoeiro irrigadas por dois pivôs centrais na bacia hidrográfica do Rio Preto, na região do Cerrado do Distrito Federal e do estado de Goiás.

### **2.2 Objetivos específicos**

1. Determinar a evapotranspiração real da cultura da soja e do feijoeiro pelo método da razão de Bowen.
2. Estimar a evapotranspiração real das referidas culturas por meio do modelo SSEBop.
3. Avaliar e classificar o desempenho das estimativas do modelo SSEBop em comparação ao método da razão de Bowen.

### 3. REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 Definição e importância da evapotranspiração

Evapotranspiração (ET) é um processo físico que engloba a transpiração da planta e a evaporação da água presente no solo e na superfície vegetada, representando a perda total de água para a atmosfera (RÁCZ et al., 2013; SAWANO et al., 2015; PETKOVIĆ et al., 2015). A ET é parâmetro fundamental do ciclo hidrológico em áreas agrícolas (MARTÍ et al., 2015) e desempenha papel fundamental na concepção e operação de projetos de irrigação (ABDULLAH et al., 2015), uma vez que é responsável pela maior perda de água em sistemas vegetados e mais de 90% da água utilizada na agricultura é perdida pelo processo de evapotranspiração (RANA & KATERJI, 2000; HOOGEVEEN et al., 2015).

Para Payero & Irmak (2013), o conhecimento das necessidades hídricas diárias das culturas irrigadas permite aos produtores uma decisão mais precisa de quando e quanto irrigar, mantendo assim a produtividade no mais alto nível. A quantificação da ET para fins de irrigação depende previamente da determinação da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), definida por Doorenbos & Pruitt (1977) como a evapotranspiração de uma extensa área uniforme coberta por grama com altura de 8 a 15 cm, crescimento ativo, adequada disponibilidade de água e completa cobertura do solo. Posteriormente, Allen et al. (1998) elaboraram um novo conceito de ET<sub>o</sub>, introduzido para estudar o poder evaporativo da atmosfera em uma localidade específica independentemente do tipo de cultura, fase de desenvolvimento ou práticas de manejo. A superfície de referência é uma cultura de grama sem restrição hídrica, com altura de 12 cm, resistência superficial de 70 s m<sup>-1</sup> e coeficiente de reflexão de 0,23.

O termo evapotranspiração potencial (ET<sub>p</sub>) foi por algumas vezes utilizado para representar a perda máxima possível de água para a atmosfera de uma superfície vegetada sem restrição hídrica, causando confusão em relação à ET<sub>o</sub> em razão da definição imprecisa de “superfície vegetada” (ALLEN, 2006; KATERJI & RANA, 2011). Para superar esse problema, o termo ET<sub>p</sub> foi gradualmente substituído por “evapotranspiração potencial de referência”, para o qual as características da superfície vegetada foram padronizadas (XYSTRAKIS & MATZARAKIS, 2011). Entretanto, o uso do termo ET<sub>p</sub> ainda é comum em estudos hidrológicos, principalmente em comparações com precipitação na determinação do déficit hídrico em algum local específico (KATERJI & RANA, 2011).

A evapotranspiração de uma cultura em condições padrões (ET<sub>c</sub>) é definida por Allen et al. (1998) como uma variável semelhante à ET<sub>o</sub>, porém atribuída a uma cultura qualquer em

desenvolvimento e sem limitações de disponibilidade de água no solo, sem restrições nutricionais e livre de pragas e doenças, representando a quantidade de água que deve ser reposta para manter o seu crescimento e produção em condições ideais. De maneira análoga, Lewis & Allen (2017) definem  $ET_c$  como potencial uso da água pela cultura, representando a quantidade de água que seria evaporada do solo e transpirada pela cultura em perfeitas condições hídricas e sem qualquer estresse, frequentemente utilizada na execução de projetos e manejo da irrigação. A  $ET_c$  é obtida a partir do produto da  $ET_o$  pelo coeficiente de cultivo ( $K_c$ ), que leva em conta as exigências hídricas da cultura em cada fase de desenvolvimento e é governado pelo tipo, distribuição das plantas na área e condição da vegetação. Como as características da vegetação são mais consistentes para uma cultura agrícola do que para vegetação natural, o  $K_c$  é geralmente considerado fixo entre regiões para cultivos idênticos, visto que a  $ET_o$ , por definição, representa as variações climáticas entre locais diferentes (ALLEN & PEREIRA, 2009).

Há ainda a definição de evapotranspiração real ou, conforme Allen et al. (1998), evapotranspiração de uma cultura em condições não padrão, nas quais o adequado desenvolvimento da cultura pode ser prejudicado. Lewis & Allen (2017) afirmam que a evapotranspiração real é geralmente menor que a  $ET_c$  e inclui fatores que reduzem a eficiência no uso da água pela cultura, como o conteúdo limitado de água no solo, baixa fertilidade do solo, ocorrência de doenças e danos causados por pragas agrícolas. Para Camargo & Camargo (2000), evapotranspiração real é a perda de água de uma superfície natural, em qualquer condição de umidade e cobertura vegetal.

### **3.2 Fatores que afetam a evapotranspiração**

A evapotranspiração é influenciada por variáveis meteorológicas, características da cultura, manejo e fatores ambientais (ALLEN et al., 1998). As variáveis meteorológicas que afetam a evapotranspiração são radiação solar, velocidade do vento, temperatura e umidade relativa do ar (ALLEN et al., 1998; DARSHANA et al., 2013). De acordo com Vicente-Serrano et al. (2014), essas variáveis determinam o componente radiativo (energia solar disponível) e o componente aerodinâmico (poder de secagem do ar devido à velocidade do vento e à umidade atmosférica) da  $ET_o$ . De maneira geral, quanto maior a disponibilidade de energia solar, temperatura do ar, velocidade do vento e menor a umidade relativa, maior deverá ser a demanda evaporativa da atmosfera, ocasionando aumento na taxa de evapotranspiração quando a umidade do solo não for fator restritivo (TAGLIAFERRE et al., 2015).

A radiação solar é a variável que exige maior precisão nas medidas em razão da maior influência na evapotranspiração de referência (LEMOS FILHO et al., 2010). A energia disponível ou saldo de radiação é a fonte principal de energia para processos naturais como o metabolismo biológico, perda de água por superfícies vegetativas, variações de temperatura no sistema solo-planta-atmosfera e decomposição orgânica (PEREIRA et al., 2014). A radiação solar que chega à superfície evaporante depende do local, da época do ano e das condições atmosféricas reinantes no momento (ALLEN et al., 1998).

A radiação solar absorvida pela atmosfera e o calor emitido pelo solo elevam a temperatura do ar, aumentando o poder evaporativo e exercendo papel fundamental no processo evapotranspirativo. Enquanto a energia solar e o ar circunvizinho são as principais forças motrizes para a vaporização da água, a diferença na pressão de vapor de água acima da superfície evapotranspirante e a velocidade do vento são os fatores determinantes para a remoção do vapor (ALLEN et al., 1998). Ao vaporizar a água, o ar acima da superfície de evaporação torna-se gradualmente saturado com vapor de água, e se este ar não for continuamente substituído por um ar mais seco, a força motriz para a remoção do vapor de água e a taxa de evapotranspiração diminuem.

Além das variáveis meteorológicas, o tipo de cultura, a variedade, o estágio de desenvolvimento e a densidade de plantio também afetam a evapotranspiração da cultura, pois as diferenças de resistência à transpiração, a altura da cultura, a rugosidade do dossel, a reflexão, a cobertura do solo e as características de enraizamento resultam em níveis diferentes de evapotranspiração para diferentes culturas em mesmo clima e condições de solo. Fatores como a salinidade e fertilidade do solo, aplicação limitada de fertilizantes, presença de horizontes impenetráveis e ausência de controle de doenças e pragas podem limitar o desenvolvimento da cultura e reduzir a evapotranspiração (ALLEN et al., 1998). Tanny (2013) afirma que além das variações meteorológicas, a dinâmica da ET depende também das características específicas de cada cultura, visto que algumas plantas são caracterizadas por possuírem estômatos que não respondem às alterações na umidade do ar. Quando a cultura não cobre ainda totalmente a superfície em um campo agrícola, a água é predominantemente perdida por evaporação do solo, porém quando o dossel cobre completamente a superfície, a transpiração se torna o principal processo de perda de água (ALLEN et al., 1998; SENTELHAS et al., 2010).

### 3.3 Estimativas da evapotranspiração

Em razão da sua importância no ciclo hidrológico e em sistemas agrícolas, estimativas precisas da evapotranspiração são imprescindíveis no planejamento e no uso eficiente dos recursos hídricos. A evapotranspiração de referência pode ser obtida por dispositivos específicos, através de medidas de vários parâmetros físicos ou com base no balanço hídrico do solo por meio de lisímetros (XYSTRAKIS & MATZARAKIS, 2011). Conforme Allen et al. (2011), a evapotranspiração ainda pode ser estimada usando dados meteorológicos e algoritmos que descrevem a energia disponível na superfície vegetada e características aerodinâmicas da vegetação, como também estimada usando sistemas que requerem o emprego de princípios físicos relativamente complexos.

Em sistemas agrícolas, a aplicação de algoritmos de estimativa e medição da ET pode ser relativamente simples, já que a densidade de plantas, a altura, o vigor e a disponibilidade de água são geralmente uniformes. Por outro lado, em sistemas florestais, desérticos e ribeirinhos, a natureza heterogênea da vegetação, do terreno, dos solos e da disponibilidade hídrica torna a energia superficial e os processos aerodinâmicos altamente variáveis e mal definidos (ALLEN et al., 2011). Rojas & Sheffield (2013) afirmam que é basicamente improvável o desenvolvimento de um modelo que atenda plenamente as diversas coberturas vegetais sob diferentes condições, em razão da interdependência dos fatores atmosféricos e da superfície, além da variabilidade espacial e temporal das condições climáticas inerentes ao processo.

Os lisímetros constituem o método direto mais comum em estimativas da evapotranspiração e são amplamente utilizados para calibração e validação de outros métodos. Entre os modelos disponíveis, o lisímetro de pesagem é considerado o mais preciso, uma vez que mede as variações da massa de solo e plantas contidas no equipamento (ALLEN et al., 1998). Desprezando as alterações de massa devido ao crescimento da planta, a diferença entre duas medidas dividida pelo produto do tempo decorrido e a área efetiva do lisímetro se aproxima da taxa evapotranspirativa (VAUGHAN & AYARS, 2009). Para que as medidas do lisímetro de pesagem possam ser consideradas representativas, as condições do solo dentro dos lisímetros devem ser essencialmente iguais às externas para garantir que a densidade da vegetação, a disponibilidade de água, a evaporação da superfície do solo e, portanto, a evapotranspiração sejam as mesmas (ALLEN et al., 2011). Em razão das dificuldades e custos em sua construção e das exigências de cuidados especiais com sua operação e manutenção, o uso dos lisímetros é limitado a objetivos de pesquisa específicos (ALLEN et al., 1998).

Os meios indiretos de estimativas da evapotranspiração envolvem uma série de equações que podem ser baseadas na temperatura do ar, radiação solar, transferência de massa ou combinações entre os métodos (XYSTRAKIS & MATZARAKIS, 2011; ROJAS & SHEFFIELD, 2013), podendo variar suas performances de acordo com os ambientes nos quais são utilizados (GOCIC & TRAJKOVIC, 2010). Vários desses modelos envolvem o uso de dados meteorológicos que podem não estar amplamente disponíveis. Parâmetros como radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento estão frequentemente indisponíveis, exigindo o uso de modelos mais simples (ALBLEWI et al., 2015). Em regiões semiáridas, pequenos produtores irrigantes podem utilizar métodos mais simples na obtenção da ETo para fins de manejo de irrigação, a exemplo da equação de Hargreaves-Samani (HARGREAVES & SAMANI, 1985). Em razão de depender apenas da temperatura do ar, a equação de Hargreaves-Samani se apresentou uma alternativa viável e de baixo custo a produtores do semiárido brasileiro (IDE & SILVA, 2017).

Com embasamento em variáveis climáticas, o método de Penman-Monteith é capaz de fornecer valores consistentes de evapotranspiração em diferentes regiões e climas. É reconhecido mundialmente como método padrão em estimativas da evapotranspiração de referência desde a publicação 56 da FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*) (ALLEN et al., 1998). É um método predominantemente fundamentado em princípios físicos, podendo ser usado globalmente sem a necessidade de estimativas de parâmetros adicionais. Além disso, o método foi testado e calibrado por valores de ETo provenientes de vários lisímetros de drenagem, tornando-se bastante consolidado na comunidade acadêmica e implementado em uma ampla gama de softwares (DROOGERS & ALLEN, 2002; GOCIC & TRAJKOVIC, 2010).

Por outro lado, o método de Penman-Monteith requer vários dados meteorológicos que nem sempre estão disponíveis em todos os locais, principalmente nos países em desenvolvimento onde conjuntos de dados confiáveis de radiação, umidade relativa e velocidade do vento são limitados (GOCIC & TRAJKOVIC, 2010). Dessa forma, Allen et al. (1998) mostram procedimentos para estimar os parâmetros da equação de Penman-Monteith quando alguns dados meteorológicos não estão disponíveis. A ausência de dados meteorológicos também pode ser superada pelo uso de equações menos exigentes em variáveis climáticas. Quando somente os dados de temperatura do ar estão disponíveis, Allen et al. (1998) sugerem o uso da equação de Hargreaves-Samani como alternativa para a estimativa da evapotranspiração de referência.

No Brasil, Alencar et al. (2015) analisaram o desempenho da equação de Penman-Monteith na ausência de alguns dados climáticos no estado de Minas Gerais. Conforme os autores, na ausência de dados de umidade relativa e velocidade do vento o método de Penman-Monteith apresenta pequenos erros de estimativa, enquanto que na falta de dados de radiação os erros são maiores em relação a outras variáveis. Em estudo semelhante na região Sudeste do Brasil, Carvalho et al. (2015) verificaram que as melhores estimativas da ETo foram realizadas com a pressão de vapor estimada pelas temperaturas máxima e mínima e pela umidade relativa do ar. Os autores constataram ainda que a equação de Hargreaves-Samani sobrestimou a ETo para a maioria das estações avaliadas.

A aplicação de métodos micrometeorológicos também garante bons resultados nas estimativas da evapotranspiração. O método da razão de Bowen (BOWEN, 1926) permite a solução da equação do balanço de energia, medindo gradientes de temperatura do ar e pressão de vapor na camada acima da superfície de evaporação (ALLEN et al., 2011). Os gradientes são obtidos por meio da instalação de dois sensores em diferentes alturas ou por sensores de alta resolução capazes de realizar medições de temperatura e pressão real de vapor em diversos pontos (EUSER et al., 2014). A correlação de vórtices turbulentos (*Eddy correlation*) é uma técnica micrometeorológica que mede diretamente os fluxos de calor latente e CO<sub>2</sub>, amparada em medidas de alta frequência da velocidade do vento por anemômetros sônicos e concentrações de vapor de água e CO<sub>2</sub> por analisadores de gases ópticos. Tem sido intensamente utilizado em vários locais do mundo para monitorar as trocas de massa e energia no sistema solo-planta-atmosfera, mesmo em locais remotos e por longos intervalos de tempo (CONSOLI & BARBAGALLO, 2012).

Os métodos micrometeorológicos apresentam resultados válidos para áreas com culturas de mesmas condições fenológicas, hídricas, de configuração de plantio e, quando irrigadas, sujeitas a um mesmo sistema de irrigação, não sendo capazes, portanto, de realizar estimativas em áreas de grandes dimensões (BEZERRA et al., 2008). Nesse sentido, as técnicas de sensoriamento remoto são ferramentas poderosas em estimativas da evapotranspiração real em várias escalas espaciais, variando de pixels individuais a uma imagem inteira que pode abranger toda uma bacia hidrográfica. Os dados de sensoriamento remoto podem ser usados para estimar a evapotranspiração real instantânea no momento da passagem do satélite. No entanto, para estudos de balanço hídrico, dados diários de evapotranspiração são mais úteis do que dados instantâneos, sendo necessária a conversão para a escala diária (CHÁVEZ et al., 2008; LIU et al., 2012; CAMMALLERI et al., 2014).

### 3.4 Balanço de energia pela Razão de Bowen

A razão de Bowen (BOWEN, 1926) é um método indireto, não requer informações a respeito das características aerodinâmicas da superfície de interesse, pode integrar fluxos de calor latente sobre grandes áreas e é capaz de estimar fluxos em pequenas escalas de tempo, fornecendo medições contínuas (TODD et al., 2000). O método é relativamente simples, possui alta precisão e é frequentemente utilizado como referência para avaliação de outros métodos usados no cálculo da evapotranspiração real (HU et al., 2014).

A razão de Bowen ( $\beta$ ) é obtida a partir do produto da constante psicométrica ( $\gamma$ ) pela razão entre os gradientes verticais de temperatura ( $\Delta T$ ) e pressão real de vapor do ar ( $\Delta e$ ) (BOWEN, 1926; EUSER et al., 2014). Em geral, se  $\beta$  for maior que 1, mais fluxo de energia é retornado à atmosfera como calor sensível, indicando clima seco. Por outro lado, a situação inversa ( $\beta < 1$ ) caracteriza ambiente mais úmido, no qual o fluxo de energia é retornado à atmosfera em maior parte como calor latente (IRMAK et al., 2014). Além disso, o método pressupõe que a superfície considerada seja homogênea em relação à dissipação de calor e que o transporte acontece apenas na direção vertical, sem ocorrência de gradientes horizontais (TODD et al., 2000).

Euser et al. (2014) apresentaram um novo método de determinação da razão de Bowen com fundamentação no uso de perfis verticais de temperatura de bulbo seco e úmido de alta resolução espacial, constituído por cabos de fibra óptica com 13 pontos de medida e espaçados 20 cm entre si. De acordo com os autores, esta nova técnica garante resultados confiáveis e permite maior precisão dos gradientes de temperatura e pressão real de vapor em relação ao método constituído por apenas dois níveis. Contudo, o método dos dois pontos pode ser usado em aparatos mais simples de serem montados em campo e também garante bons resultados na determinação do fluxo de calor latente, desde que não ocorra fluxo horizontal de massa e calor.

A precisão dos fluxos de calor latente e sensível dependem da precisão da razão  $\beta$ , que por sua vez depende da exatidão das medidas dos equipamentos utilizados. Portanto, é imprescindível a análise dos possíveis erros associados ao método e o conhecimento de como eles podem afetar os resultados (PEREZ et al., 1999). Dados errôneos podem ser consequência da precisão limitada dos equipamentos, da variabilidade dos fatores meteorológicos, de problemas na instalação e operação dos instrumentos, de limitações do próprio método em determinadas condições atmosféricas e de falhas humanas na análise ou armazenamento dos dados (PAYERO et al., 2003; HU et al., 2014).

Conforme Irmak et al. (2014), o método é inviável quando a razão  $\beta$  se aproxima de -1, visto que as estimativas dos fluxos de calor latente se tornam excessivamente inconsistentes, o que normalmente ocorre ao amanhecer e ao anoitecer, quando os calores latente e sensível são de magnitudes aproximadas, porém em direções opostas. Para contornar esse problema, alguns autores sugerem a eliminação das razões menores que -0,75 ou aquelas no intervalo  $-1,3 < \beta < -0,7$ , dependendo do grau de precisão das medidas que os sensores oferecem (ORTEGA-FARIAS et al., 1996; UNLAND et al., 1996). Unland et al. (1996) recomendam ainda a exclusão dos gradientes menores que a resolução dos sensores, a fim de eliminar o erro instrumental.

A razão  $\beta$  é frequentemente diferente entre os períodos diurno e noturno (LIN et al., 2016). Segundo os autores, essas diferenças estão relacionadas às fortes variações no saldo de radiação durante o dia e seus efeitos associados aos fluxos de calor latente e sensível, visto que o fluxo de calor latente é maior durante o dia e favorece valores de  $\beta$  mais estáveis. Por outro lado, no período noturno o saldo de radiação é negativo, levando a fluxos de calor latente e sensível muito menores e provocando grandes variações em  $\beta$ .

Gomide et al. (2012) realizaram o monitoramento automático da necessidade hídrica dos cultivos de milho e feijão nas condições climáticas de Sete Lagoas/MG por meio do balanço de energia associado à razão de Bowen. De acordo com os autores, baixos valores da razão  $\beta$  ocorreram nas duas culturas quando o solo estava bem umedecido, favorecendo a dissipação da maior parte da radiação líquida em forma de calor latente. Em contrapartida, os valores se elevaram ao decorrer do tempo após uma irrigação ou chuva, condição em que a umidade do solo foi se reduzindo e favorecendo o uso da maior parte da radiação líquida no aquecimento diário do ar.

Em comparação ao método de Penman-Monteith e lisímetro de pesagem, Silva et al. (2016) avaliaram o desempenho da razão de Bowen no cálculo da evapotranspiração de referência em Piracicaba/SP. Os autores encontraram uma sobrestimativa de até 5% pelo método da razão de Bowen em relação ao lisímetro de pesagem, principalmente nos períodos diurnos. No entanto, as estimativas obtidas pela razão de Bowen apresentaram desempenho satisfatório quando comparadas à evapotranspiração de referência diária obtida pelo método de Penman-Monteith. Em clima semiárido da região leste do Mediterrâneo, Ünlü et al. (2010) analisaram o desempenho da razão de Bowen na cultura da soja em comparação com dados de evapotranspiração diária obtida por lisímetro de pesagem. Os autores concluíram que os valores de evapotranspiração obtida pelo método da razão Bowen sobestimaram em 15 e 14%

respectivamente os valores das medidas diárias e horárias obtidas no lisímetro, e que essas diferenças foram consequências do melhor suprimento de água no solo nas situações em que foi empregado o método da razão de Bowen.

### 3.5 Aplicação do sensoriamento remoto em estimativas da evapotranspiração

Estimativas precisas da evapotranspiração em grandes escalas são de relevante importância em estudos de mudanças climáticas e avaliação dos recursos hídricos, bem como na previsão e monitoramento de secas (SANTOS et al., 2010; CHEN et al., 2016). Apesar da grande disponibilidade de métodos diretos e indiretos para estimativas ou medidas da evapotranspiração, a maioria tem uso limitado em escalas regionais (CONSOLI & VANELLA, 2014). Desde o lançamento dos primeiros satélites de observação meteorológica e terrestre, as técnicas de sensoriamento remoto foram vistas como uma possibilidade de se obter informações sobre evapotranspiração em diferentes escalas espaciais e temporais (CHIESI et al., 2013).

Nas últimas décadas, a aplicação de algoritmos baseados no balanço de energia e em modelos agrometeorológicos tem se comprovado uma excelente ferramenta nas estimativas da evapotranspiração (FERREIRA & DANTAS, 2014). De acordo com Consoli & Vanella (2014), os modelos utilizados são capazes de converter as radiâncias detectadas por sensoriamento remoto em características de superfície como albedo, índice de área foliar, índice de vegetação, emissividade e temperatura, possibilitando a estimativa da evapotranspiração como resíduo da equação do balanço de energia.

Entre os modelos mais conhecidos e aplicados no Brasil, o *Surface Energy Balance Algorithm for Land* - SEBAL (BASTIAANSEN et al., 1998) se baseia na radiância espectral registrada por sensores de satélites orbitais e dados meteorológicos como velocidade do vento e temperatura do ar para obter o balanço energético de uma superfície. Trata-se de um modelo que, por meio de rotinas computacionais, calcula o completo balanço de energia ao longo de uma superfície da terra, gerando diversos dados sobre radiação para extensas áreas (BASTIAANSEN, 2000). A estimativa da evapotranspiração é realizada pixel a pixel para o momento exato da passagem do satélite, a partir do fluxo de calor latente calculado como resíduo da Equação 1.

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

em que:  $R_n$  é o saldo de radiação;  $LE$  é o fluxo de calor latente;  $H$  é o fluxo de calor sensível;  $G$  é o fluxo de calor no solo.

A aplicação do SEBAL exige imagens digitais que apresentem as bandas do visível, infravermelho termal e infravermelho próximo. O saldo de radiação (Equação 2) é obtido a partir das radiações de ondas curtas e ondas longas emitidas pela atmosfera e pela superfície terrestre, dependentes da emissividade e do albedo da superfície.

$$R_n = R_{S\downarrow} - \alpha R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_s) \times R_{L\downarrow} \quad (2)$$

em que:  $R_{S\downarrow}$  é a radiação de onda curta incidente em cada pixel;  $\alpha$  é o albedo corrigido de cada pixel;  $R_{L\downarrow}$  é a radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção do pixel;  $R_{L\uparrow}$  é a radiação de onda longa emitida por cada pixel;  $\varepsilon_s$  é a emissividade de cada pixel da imagem.

O fluxo de calor no solo pode ser obtido por equação empírica (BASTIAANSSEN, 2000) que leva em consideração variáveis como o saldo de radiação, o índice de vegetação (NDVI), a temperatura de superfície ( $T_s$ ) e o albedo. A determinação do fluxo de calor sensível é a etapa mais importante e complexa do SEBAL, pois sua estimativa (Equação 3) requer uma série de suposições e é realizada a partir da velocidade do vento, da resistência aerodinâmica e da diferença de temperatura do ar entre dois níveis próximos à superfície ( $dT$ ) (BASTIAANSSEN et al., 1998). O SEBAL calcula  $dT$  para cada pixel por meio de uma relação linear entre  $dT$  e  $T_s$ , dada pelos coeficientes “a” e “b” que são obtidos pelos pixels denominados “âncoras” (Equação 4). Esses pixels, também denominados de “quente” e “frio”, ficam situados na área de estudo e representam respectivamente as áreas nas quais o fluxo de calor sensível é considerado máximo e mínimo.

$$H = \frac{\rho_a \times C_p \times dT}{r_a} \quad (3)$$

$$dT = a + b \times T_s \quad (4)$$

em que:  $\rho_a$  é a massa específica do ar em  $\text{kg m}^{-3}$ ;  $C_p$  é o calor específico à pressão constante em  $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ;  $r_a$  é a resistência aerodinâmica ao transporte em  $\text{s m}^{-1}$ .

Oliveira et al. (2014) avaliaram a aplicação do SEBAL em estimativa da evapotranspiração real diária na bacia hidrográfica do Rio Tapacurá no estado de Pernambuco e concluíram que o nível de precisão dessas estimativas foi satisfatório quando comparadas com dados de campo obtidos pelo método da razão de Bowen. Em estudo semelhante no mesmo estado, Machado et al. (2014) encontraram boa concordância das estimativas do SEBAL com a evapotranspiração obtida pelo método de Penman-Monteith, em cultura de cana-de-açúcar.

Os autores justificam as variações de até 10% entre os métodos analisados pelo limitado conjunto de dados coletados. Na região das bacias do ribeirão Entre Ribeiros e Rio Preto, ambos afluentes do Rio Paracatu em Minas Gerais, Lima et al. (2014) avaliaram a evapotranspiração da cultura do feijão cultivar “Pérola” estimada pelo SEBAL e verificaram erros médios relativos variando de 6,9 a 31,5%, quando em comparação com o método e Penman-Monteith.

Outro modelo bastante utilizado em estimativas da evapotranspiração, o *Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration* - METRIC (ALLEN et al. (2007) também é fundamentado no balanço de energia da superfície terrestre e tem em sua concepção os princípios e técnicas utilizadas pelo SEBAL. O modelo METRIC difere das aplicações do SEBAL principalmente na maneira em que o fluxo de calor sensível é calibrado para cada imagem. De maneira similar ao SEBAL, o METRIC também determina o fluxo de calor sensível, porém o cálculo da resistência aerodinâmica é realizada utilizando a velocidade do vento extrapolada acima da superfície do solo em um processo de correção iterativa, por meio da formulação de Monin & Obukhov (1954). Assim como o SEBAL, o METRIC também tem sido bastante utilizado no Brasil em estudos de evapotranspiração real (FOLHES et al., 2009; SCHERER-WARREN, 2012; GIONGO & VETTORAZZI, 2014), garantindo resultados satisfatórios e se consolidando como importante ferramenta no gerenciamento dos recursos hídricos.

O SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*) é um modelo que estima a evapotranspiração através de parâmetros biofísicos obtidos pelo uso de sensoriamento remoto associado a dados climáticos diários de estações meteorológicas, apresentando a vantagem de não utilizar informações de classificação das culturas nem de condições extremas de seca, podendo realizar análises de tendências históricas (TEIXEIRA, 2012). O modelo é baseado na equação de Penman-Monteith e utiliza a relação  $ET/ET_0$  em conjunto com dados de sensoriamento remoto, obtendo a evapotranspiração a partir de dados de  $ET_0$  (TEIXEIRA, 2010). Em aplicação do SAFER na região do PAD-DF no Distrito Federal, Sales et al. (2016) estimaram a evapotranspiração real da cultura de feijão comum irrigado por pivô central e concluíram que, em média, as estimativas do modelo foram 4% menores do que a evapotranspiração da cultura obtida pelo método de Penman-Monteith ( $ET_0 \times K_c$ ). De acordo com os autores, o modelo pode ser recomendado para estimativas da evapotranspiração real em culturas irrigadas.

O SSEBop é um modelo de concepção mais recente que se baseia na temperatura de superfície para estimar a fração evapotranspirativa ( $ET_f$ ), determinando a evapotranspiração

real a partir da ETo obtida por estações de referência local (SENAY et al., 2013). É uma nova parametrização do SSEB (SENAY et al., 2007), na qual é necessário somente especificar a temperatura da superfície obtida por sensores orbitais para estimar as frações evapotranspirativas, uma vez que as condições de referência para pixel quente e frio são predefinidas para cada local e período por meio de um procedimento que calcula o balanço de energia climatológico de maneira simplificada.

O modelo relaciona a temperatura do ar no horário da passagem do satélite com a temperatura da superfície obtida por sensores orbitais em condições assumidas para pixel frio, isto é, vegetação em pleno desenvolvimento e em condições ideais de evapotranspiração, onde o fluxo de calor latente é máximo. A relação entre as temperaturas é obtida por um coeficiente de correção para cada pixel da imagem nos quais o NDVI seja maior que 0,80 e a temperatura da superfície maior que 270 K, condições comuns em áreas de vegetação em pleno desenvolvimento e ausência de nuvens. A partir da definição da temperatura de pixel frio para cada imagem, a temperatura de pixel quente é obtida pela adição da diferença constante ( $dT$ ) obtida por meio dos princípios do balanço de energia em condições de céu claro (ALLEN et al., 1998), condição necessária para o sensoriamento remoto da região do infravermelho termal. Embora a nova parametrização do SSEBop tenha sido realizada para reduzir possíveis erros que podem ser cometidos pelo usuário do modelo, o erro mais significativo na utilização do SSEBop pode ser devido ao uso da diferença constante como valor único para todos os pixels da imagem (SENAY et al., 2013). No entanto, os autores afirmam que qualquer alteração no padrão espacial e temporal da evapotranspiração é devido apenas às alterações na temperatura da superfície e dificilmente de diferenças na seleção dos pixels âncora ou na configuração do modelo.

Apesar de ainda não existirem estudos relevantes no Brasil, o modelo SSEBop apresentou estimativas satisfatórias nos Estados Unidos. Singh et al. (2014) avaliaram o desempenho do modelo SSEBop na estimativa da evapotranspiração anual na bacia do Rio Colorado e observaram boa concordância com a evapotranspiração obtida pelo método da covariância de vórtices turbulentos (*Eddy Covariance*), com erro médio de 10%. Em estudo semelhante na mesma bacia, Senay et al. (2016) também relataram boa precisão, com erros quadráticos médios variando de 13 a 22% nas datas de passagem do satélite. Em clima semiárido do Texas, Senay et al. (2014) avaliaram estimativas do modelo SSEBop em áreas ocupadas com culturas irrigadas e não irrigadas e relataram forte relação linear entre a evapotranspiração real estimada pelo modelo e a observada por lisímetros, apesar de ter

subestimado a evapotranspiração em 8 e 14% respectivamente nas áreas irrigadas e não irrigadas.

Embora os modelos baseados em sensoriamento remoto possibilitem estimativas em grandes escalas, a complexidade dos processos físicos envolvidos pode gerar incertezas na modelagem hidrológica. O processo da evapotranspiração é complexo porque envolve os princípios do balanço hídrico e balanço de energia, os quais são influenciados por condições meteorológicas, tipos de cobertura do solo, padrões de uso da terra e propriedades do solo (CHEN et al., 2016). Para fins práticos de operacionalização, várias simplificações devem ser feitas nos modelos de evapotranspiração, as quais podem levar a erros de estimativa. De acordo com Chen et al. (2016), imprecisões nos modelos podem ser decorrentes de uma estrutura inadequada, erros nos dados de entrada ou parâmetros mal definidos.

#### 4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDULLAH, S. S.; MALEK, M. A.; ABDULLAH, S. N.; KISI, O.; YAP, K. S. Extreme learning machines: A new approach for prediction of reference evapotranspiration. **Journal of Hydrology**, v. 527, p. 184-195, 2015.
- ALBLEWI, B.; GHARABAGHI, B.; ALAZBA, A. A.; MAHBOUBI, A. A. Evapotranspiration models assessment under hyper-arid environment. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 8, p. 9905-9912, 2015.
- ALENCAR, L. P. D.; SEDIYAMA, G. C.; MANTOVANI, E. C. Estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub> padrão FAO), para Minas Gerais, na ausência de alguns dados climáticos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 35, n. 1, p. 39-50, 2015.
- ALLEN, R. G. Evaporation modeling: Potential. **Encyclopedia of Hydrological Sciences**, v. 41, p. 1-11, 2006.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300p. FAO Irrigation and Drainage Paper 56.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; HOWELL, T. A.; JENSEN, M. E. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. **Agricultural Water Management**, v. 98, p. 899-920, 2011.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S. Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height. **Irrigation Science**, v. 28, p. 17-34, 2009.
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-based energy balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC) - Model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 133, n. 4, p. 380-394, 2007.
- BASTIAANSEN, W. G. M. SEBAL - based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, v. 229, p. 87-100, 2000.
- BASTIAANSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, v. 212-213, p. 198-212, 1998.

- BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B. da; FERREIRA, N. J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM-Landsat 5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, n. 3, p. 305-317, 2008.
- BOWEN, S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. **Physical Review**, Ithaca, v. 27, p. 779-787, 1926.
- CAMARGO, A. P. de; CAMARGO, M. B. P. de. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. **Bragantia**, Campinas, v. 59, n. 2, p. 125-137, 2000.
- CAMMALLERI, C.; ANDERSON, M. C.; KUSTAS, W. P. Upscaling of evapotranspiration fluxes from instantaneous to daytime scales for thermal remote sensing applications. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 18, p. 1885-1894, 2014.
- CARVALHO, D. F. de; ROCHA, H. S. da; BONOMO, R.; SOUZA, A. P. de. Estimativa da evapotranspiração de referência a partir de dados meteorológicos limitados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v. 50, n. 1, p. 1-11, 2015.
- CHÁVEZ, J. L.; NEALE, C. M. U.; PRUEGER, J. H.; KUSTAS, W. P. Daily evapotranspiration estimates from extrapolating instantaneous airborne remote sensing ET values. **Irrigation Science**, v. 27, p. 67-81, 2008.
- CHEN, J.; CHEN, B.; BLACK, T. A.; INNES, J. L.; WANG, G.; KIELY, G.; HIRANO, T.; WOHLFAHRT, G. Comparison of terrestrial evapotranspiration estimates using the mass transfer and Penman-Monteith equations in land surface models. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 118, p. 1715-1731, 2013.
- CHEN, M.; SENAY, G. B.; SINGH, R. K.; VERDIN, J. P. Uncertainty analysis of the Operational Simplified Surface Energy Balance (SSEBop) model at multiple flux tower sites. **Journal of Hydrology**, v. 536, p. 384-399, 2016.
- CHIESI, M.; RAPI, B.; BATTISTA, P.; FIBBI, L.; GOZZINI, B.; MAGNO, R.; RASCHI, A.; MASELLI, F. Combination of ground and satellite data for the operational estimation of daily evapotranspiration. **European Journal of Remote Sensing**, v. 46, p. 675-688, 2013.
- CONSOLI, S.; BARBAGALLO, S. Estimating water requirements of an irrigated Mediterranean vineyard using a satellite-based approach. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 138, n. 10, p. 896-904, 2012.

CONSOLI, S.; VANELLA, D. Comparisons of satellite-based models for estimating evapotranspiration fluxes. **Journal of Hydrology**, v. 513, p. 475-489, 2014.

DARSHANA; PANDEY, A.; PANDEY, R. P. Analysing trends in reference evapotranspiration and weather variables in the Tons River Basin in Central India. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 27, p. 1407-1421, 2013.

DAVIES, E. G. R.; SIMONOVIC, S. P. Global water resources modeling with an integrated model of the social-economic-environmental system. **Advances in Water Resources**, v. 34, p. 684-700, 2011.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome: FAO, 1977. 144p. FAO Irrigation and Drainage Paper 24.

DROOGERS, P.; ALLEN, R. G. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. **Irrigation and Drainage Systems**, v. 16, p. 33-45, 2002.

EUSER, T.; LUXEMBURG, W. M. J.; EVERSON, C. S.; MENGISTU, M. G.; CLULOW, A. D.; BASTIAANSEN, W. G. M. A new method to measure Bowen ratios using high-resolution vertical dry and wet bulb temperature profiles. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 18, p. 2021-2032, 2014.

FAO. FAO statistical pocketbook world food and agriculture 2015. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome: FAO, p.231, 2015. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-i4691e.pdf>>. Acesso em: 15 de agosto, 2017.

FERREIRA, E.; DANTAS, A. A. A. Estimativa da evapotranspiração atual a partir de produtos de sensoriamento remoto usando o método do triângulo. **Irriga**, Botucatu, v. 19, n. 1, p. 73-81, 2014.

FISHER, J. B.; TU, K. P.; BALDOCCHI, D. D. Global estimates of the land-atmosphere water flux based on monthly AVHRR and ISLSCP-II data, validated at 16 FLUXNET sites. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 901-919, 2008.

FOLHES, M. T.; RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. Remote sensing for irrigation water management in the semi-arid Northeast of Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 96, p. 1398-1408, 2009.

FRENKEN, K.; GILLET, V. Irrigation water requirement and water withdrawal by country. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome: FAO, p.263, 2012. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-bc824e.pdf>>. Acesso em: 10 de agosto, 2017.

GEBREMICHAEL, M.; WANG, J.; SAMMIS, T. W. Dependence of remote sensing evapotranspiration algorithm on spatial resolution. **Atmospheric Research**, v. 96, p. 489-495, 2010.

GIONGO, P. R.; VETTORAZZI, C. A. Albedo da superfície por meio de imagens TM-Landsat 5 e modelo numérico do terreno. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 8, p. 833-838, 2014.

GOCIC, M.; TRAJKOVIC, S. Software for estimating reference evapotranspiration using limited weather data. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 71, p. 158-162, 2010.

GOMIDE, R. L.; KOBAYASHI, M. K.; BORATTO, I. M. D. P. Monitoramento automático da necessidade hídrica das culturas do feijoeiro e milho por meio do balanço de energia/razão de Bowen. **Irriga**, Botucatu, n. Edição Especial, p. 453-466, 2012.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied Engineering in Agriculture**, St Joseph, v. 1, n. 2, p. 96-99, 1985.

HOOGEVEEN, J.; FAURÈS, J. M.; PEISER, L.; BURKE, J.; VAN DE GIESEN, N. GlobWat - a global water balance model to assess water use in irrigated agriculture. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 19, p. 3829-3844, 2015.

HU, S.; ZHAO, C.; LI, J.; WANG, F.; CHEN, Y. Discussion and reassessment of the method used for accepting or rejecting data observed by a Bowen ratio system. **Hydrological Processes**, v. 28, p. 4506-4510, 2014.

IDE, A. K.; SILVA, C. L. da. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência na área de influência dos canais da transposição do Rio São Francisco. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 25, n. 6, p. 526-539, 2017.

IRMAK, S.; SKAGGS, K. E.; CHATTERJEE, S. A review of the Bowen ratio surface energy balance method for quantifying evapotranspiration and other energy fluxes. **Transactions of the ASABE**, v. 57, n. 6, p. 1657-1674, 2014.

KATERJI, N.; RANA, G. Crop reference evapotranspiration: A discussion of the concept, analysis of the process and validation. **Water Resources Management**, v. 25, p. 1581-1600, 2011.

LEMOS FILHO, L. C. A.; CARVALHO, L. G.; EVANGELISTA, A. W. P.; JÚNIOR, J. A. Análise espacial da influência dos elementos meteorológicos sobre a evapotranspiração de referência em Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 12, p. 1294-1303, 2010.

LEWIS, C. S.; ALLEN, N. L. Potential crop evapotranspiration and surface evaporation estimates via a gridded weather forcing dataset. **Journal of Hydrology**, v. 546, p. 450-463, 2017.

LIMA, E. de P.; SEDIYAMA, G. C.; ANDRADE, R. G.; LOPES, V. D.; SILVA, B. B. da. Evapotranspiração real diária em sub-bacias do Paracatu, utilizando produtos do sensor Modis. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 61, n. 1, p. 17-27, 2014.

LIN, K. M.; JUANG, J. Y.; SHIU, Y. W.; CHANG, L. F. W. Estimating the Bowen ratio for application in air quality models by integrating a simplified analytical expression with measurement data. **Journal of Applied Meteorology & Climatology**, v. 55, p. 1041-1048, 2016.

LIU, G.; HAFEEZ, M.; LIU, Y.; XU, D.; VOTE, C. A novel method to convert daytime evapotranspiration into daily evapotranspiration based on variable canopy resistance. **Journal of Hydrology**, v. 414-415, p. 278-283, 2012.

MACHADO, C. C.; SILVA, B. B. da; ALBUQUERQUE, M. B. de; GALVÍNCIO, J. D. Estimativa do balanço de energia utilizando imagens TM-Landsat 5 e o algoritmo SEBAL no litoral Sul de Pernambuco. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 1, p. 55-67, 2014.

MAJIDI, M.; ALIZADEH, A.; VAZIFEDOUST, M.; FARID, A.; AHMADI, T. Analysis of the effect of missing weather data on estimating daily reference evapotranspiration under different climatic conditions. **Water Resources Management**, v. 29, p. 2107-2124, 2015.

MARTÍ, P.; ZARZO, M.; VANDERLINDEN, K.; GIRONA, J. Parametric expressions for the adjusted Hargreaves coefficient in Eastern Spain. **Journal of Hydrology**, v. 529, p. 1713-1724, 2015.

- MONIN, A. S.; OBUKHOV, A. M. Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. **Contrib. Geophys. Inst. Acad. Sci. USSR**, v. 24, n. 151, p. 163-187, 1954.
- MONTORO, A.; LÓPEZ-FUSTER, P.; FERERES, E. Improving on-farm water management through an irrigation scheduling service. **Irrigation Science**, v. 29, p. 311-319, 2011.
- 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.
- NIKOLIDAKIS, S. A.; KANDRIS, D.; VERGADOS, D. D.; DOULIGERIS, C. Energy efficient automated control of irrigation in agriculture by using wireless sensor networks. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 113, p. 154-163, 2015.
- OLIVEIRA, L. M. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SILVA, B. B.; ANTONINO, A. C. D.; MOURA, A. E. S. S. Evapotranspiração real em bacia hidrográfica do Nordeste brasileiro por meio do SEBAL e produtos MODIS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 10, p. 1039-1046, 2014.
- ORTEGA-FARIAS, S. O.; CUENCA, R. H.; EK, M. Daytime variation of sensible heat flux estimated by the bulk aerodynamic method over a grass canopy. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 81, n. 1-2, p. 131-143, 1996.
- PAYERO, J. O.; NEALE, C. M. U.; WRIGHT, J. L.; ALLEN, R. G. Guidelines for validating Bowen ratio data. **Transactions of the ASAE**, v. 46, n. 4, p. 1051-1060, 2003.
- PAYERO, J. O.; IRMAK, S. Daily energy fluxes, evapotranspiration and crop coefficient of soybean. **Agricultural Water Management**, v. 129, p. 31-43, 2013.
- PENG, Z. Q.; XIN, X.; JIAO, J. J.; ZHOU, T.; LIU, Q. Remote sensing algorithm for surface evapotranspiration considering landscape and statistical effects on mixed pixels. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 20, p. 4409-4438, 2016.
- PEREIRA, A. B.; VILLA NOVA, N. A.; PIRES, L. F.; ANGELOCCI, L. R.; BERUSKI, G. C. Estimation method of grass net radiation on the determination of potential evapotranspiration. **Meteorological Applications**, v. 21, p. 369-375, 2014.
- PEREZ, P. J.; CASTELLVI, F.; IBÁÑEZ, M.; ROSELL, J. I. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 97, p. 141-150, 1999.

PETKOVIĆ, D.; GOCIC, M.; TRAJKOVIC, S.; SHAMSHIRBAND, S.; MOTAMEDI, S.; HASHIM, R.; BONAKDARI, H. Determination of the most influential weather parameters on reference evapotranspiration by adaptive neuro-fuzzy methodology. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 114, p. 277-284, 2015.

PORTMANN, F. T.; SIEBERT, S.; DÖLL, P. MIRCA2000 - Global monthly irrigated and rainfed crop areas around the year 2000: A new high-resolution data set for agricultural and hydrological modeling. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 24, p. 1-24, 2010.

RÁCZ, C.; NAGY, J.; DOBOS, A. C. Comparison of several methods for calculation of reference evapotranspiration. **Acta Silvatica & Lignaria Hungarica**, v. 9, p. 9-24, 2013.

RAGAB, R. Integrated management tool for water, crop, soil and N-fertilizers: The SALTMED model. **Irrigation and Drainage**, v. 64, p. 1-12, 2015.

RANA, G.; KATERJI, N. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. **European Journal of Agronomy**, v. 13, p. 125-153, 2000.

RAZIELI, 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**, v. 121, p. 1-18, 2013.

ROJAS, J. P.; SHEFFIELD, R. E. Evaluation of daily reference evapotranspiration methods as compared with the ASCE-EWRI Penman-Monteith equation using limited weather data in Northeast Louisiana. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 139, n. 4, p. 285-292, 2013.

SALES, D. L. A.; JÚNIOR, J. A.; SOUZA, J. M. F.; CASAROLI, D.; EVANGELISTA, A. W. P.; PEREIRA, R. M. Common bean evapotranspiration estimated by orbital images. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 10, p. 867-872, 2016.

SANTOS, C. A. C. dos; BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B. da; RAO, T. V. R. Assessment of daily actual evapotranspiration with SEBAL and S-SEBI algorithms in cotton crop. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 3, p. 383-392, 2010.

SAWANO, S.; HOTTA, N.; TANAKA, N.; TSUBOYAMA, Y.; SUZUKI, M. Development of a simple forest evapotranspiration model using a process-oriented model as a reference to

parameterize data from a wide range of environmental conditions. **Ecological Modelling**, v. 309-310, p. 93-109, 2015.

SCHERER-WARREN, M. Desmembramento de estimativas de evapotranspiração obtidas por sensoriamento remoto nas componentes de evaporação e transpiração vegetal. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 2, p. 361-373, 2012.

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

SENAY, G. B.; BOHMS, S.; SINGH, R. K.; GOWDA, P. H.; VELPURI, N. M.; ALEMU, H.; VERDIN, J. P. Operational evapotranspiration mapping using remote sensing and weather datasets: A new parameterization for the SSEB approach. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 49, n. 3, p. 577-591, 2013.

SENAY, G. B.; FRIEDRICHS, M.; SINGH, R. K.; VELPURI, N. M. Evaluating Landsat 8 evapotranspiration for water use mapping in the Colorado River basin. **Remote Sensing of Environment**, v. 185, p. 171-185, 2016.

SENAY, G. B.; GOWDA, P. H.; BOHMS, S.; HOWELL, T. A.; FRIEDRICHS, M.; MAREK, T. H.; VERDIN, J. P. Evaluating the SSEBop approach for evapotranspiration mapping with Landsat data using lysimetric observations in the semi-arid Texas High Plains. **Hydrology and Earth Systems Science**, v. 11, p. 723-756, 2014.

SENTELHAS, P. C.; GILLESPIE, T. J.; SANTOS, E. A. Evaluation of FAO Penman-Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada. **Agricultural Water Management**, v. 97, p. 635-644, 2010.

SILVA, L. D. B. da; LYRA, G. B.; SILVA, J. B. G.; PINHO, C. F. de; NASCENTES, L. A.; ALMEIDA, G. V. de; FOLEGATTI, M. V. Desempenho do método do balanço de energia - razão de Bowen na estimativa da evapotranspiração de referência. **Irriga**, Botucatu, v. 21, n. 3, p. 516-529, 2016.

SINGH, A. Conjunctive use of water resources for sustainable irrigated agriculture. **Journal of Hydrology**, v. 519, p. 1688-1697, 2014.

SINGH, R. K.; SENAY, G. B.; VELPURI, N. M.; BOHMS, S.; SCOTT, R. L.; VERDIN, J. P. Actual evapotranspiration (water use) assessment of the Colorado River basin at the Landsat

resolution using the Operational Simplified Surface Energy Balance Model. **Remote Sensing**, v. 6, p. 233-256, 2014.

SU, Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 6, n. 1, p. 85-99, 2002.

TAGLIAFERRE, C.; de PAULA, A.; ROCHA, F. A.; CAMPOS, W. V.; GUIMARÃES, D. U. Influência dos elementos meteorológicos na evapotranspiração de referência estimada utilizando-se o irrigâmetro no município de Guanambi-BA. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 23, n. 3, p. 251-260, 2015.

TANNY, J. Microclimate and evapotranspiration of crops covered by agricultural screens: A review. **Biosystems Engineering**, v. 114, p. 26-43, 2013.

TEIXEIRA, A. H. C. Determining regional actual evapotranspiration of irrigated crops and natural vegetation in the São Francisco river basin (Brazil) using remote sensing and Penman-Monteith equation. **Remote Sensing**, v. 2, p. 1287-1319, 2010.

TEIXEIRA, A. H. C. Modelling evapotranspiration by remote sensing parameters and agrometeorological stations. In: NEALE, C. M. U.; COSH, M. H. **Remote Sensing and Hydrology**. Wallingford, UK. v. 352, p. 154-157, 2012.

TODD, R. W.; EVETT, S. R.; HOWELL, T. A. The Bowen ratio-energy balance method for estimating latent heat flux of irrigated alfalfa evaluated in a semi-arid, advective environment. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 103, n. 3, p. 335-348, 2000.

UNLAND, H. E.; HOUSER, P. R.; SHUTTLEWORTH, W. J.; YANG, Z. Surface flux measurement and modeling at a semi-arid Sonoran Desert site. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 82, p. 119-153, 1996.

ÜNLÜ, M.; KANBER, R.; KAPUR, B. Comparison of soybean evapotranspirations measured by weighing lysimeter and Bowen ratio-energy balance methods. **African Journal of Biotechnology**, v. 9, n. 30, p. 4700-4713, 2010.

VAUGHAN, P. J.; AYARS, J. E. Noise reduction methods for weighing lysimeters. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 135, p. 235-240, 2009.

VICENTE-SERRANO, S. M.; AZORIN-MOLINA, C.; SANCHEZ-LORENZO, A.; REVUELTO, J.; MORÁN-TEJEDA, E.; LÓPEZ-MORENO, J. I.; ESPEJO, F. Sensitivity of

reference evapotranspiration to changes in meteorological parameters in Spain (1961-2011). **Water Resources Research**, v. 50, p. 1-23, 2014.

VÖRÖSMARTY, C. J.; MCINTYRE, P. B.; GESSNER, M. O.; DUDGEON, D.; PRUSEVICH, A.; GREEN, P.; GLIDDEN, S.; BUNN, S. E.; SULLIVAN, C. A.; LIERMANN, C. R.; DAVIES, P. M. Global threats to human water security and river biodiversity. **Nature**, v. 467, p. 555-561, 2010.

XU, T.; MOHYDDIN B., S.; LIANG, S. Estimating turbulent heat fluxes with a weak-constraint data assimilation scheme: A case study (HiWATER-MUSOEXE). **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 12, n. 1, p. 68-72, 2015.

XYSTRAKIS, F.; MATZARAKIS, A. Evaluation of 13 empirical reference potential evapotranspiration equations on the island of Crete in Southern Greece. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 137, p. 211-222, 2011.

YANG, Y.; SHANG, S. A hybrid dual-source scheme and trapezoid framework-based evapotranspiration model (HTEM) using satellite images: Algorithm and model test. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 118, p. 2284-2300, 2013.

YAO, Y.; LIANG, S.; CHENG, J.; LIU, S.; FISHER, J. B.; ZHANG, X.; JIA, K.; ZHAO, X.; QIN, Q.; ZHAO, B.; HAN, S.; ZHOU, G.; ZHOU, G.; LI, Y.; ZHAO, S. MODIS-driven estimation of terrestrial latent heat flux in China based on a modified Priestley-Taylor algorithm. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 171-172, p. 187-202, 2013.

YEBRA, M.; DIJK, A. V.; LEUNING, R.; HUETE, A.; GUERSCHMAN, J. P. Evaluation of optical remote sensing to estimate actual evapotranspiration and canopy conductance. **Remote Sensing of Environment**, v. 129, p. 250-261, 2013.

## **CAPÍTULO I**

### **DESEMPENHO DO MODELO SSEB<sub>op</sub> NA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL DA CULTURA DA SOJA NO DISTRITO FEDERAL**

## 5. DESEMPENHO DO MODELO SSEBop NA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL DA CULTURA DA SOJA NO DISTRITO FEDERAL

### 5.1 RESUMO

A região de Cerrado é considerada a principal fronteira agrícola do Brasil e tem sofrido com sérios problemas hídricos, gerando conflitos pelo uso da água que podem se agravar com a expansão da agricultura irrigada. Visando o aprimoramento da gestão hídrica, é importante melhorar o manejo de irrigação e avaliar o desempenho de ferramentas que possibilitem estimativas da evapotranspiração nas bacias hidrográficas. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho do modelo SSEBop na estimativa da evapotranspiração real (ETr) de uma cultura da soja irrigada por pivô central na bacia hidrográfica do Rio Preto, região de Cerrado do Centro-Oeste brasileiro. A ETr foi estimada por sensoriamento remoto com a aplicação do modelo SSEBop (ETr-SSEBop) em imagens digitais do satélite Landsat 7 e comparada com a ETr obtida pelo método da razão de Bowen (ETr-RB) por meio de estações micrometeorológicas instaladas no interior da área irrigada. O modelo foi avaliado pelo coeficiente de correlação ( $r$ ) e pelos índices estatísticos de Willmott ( $dr$ ), raiz do erro médio quadrático (RMSE) e erro médio absoluto (MBE). O desempenho do modelo nas estimativas da ETr foi classificado conforme o índice de desempenho ( $P_i$ ). A relação entre os métodos apresentou excelente correlação ( $r = 0,87$ ) e concordância ( $dr = 0,72$ ), com erro médio quadrático de  $0,82 \text{ mm d}^{-1}$  e erro médio absoluto de  $0,33 \text{ mm}$  na escala diária. Apesar da pequena sobrestimativa do modelo SSEBop apontada pelo índice MBE, as estimativas apresentaram desempenho muito bom ( $P_i = 0,63$ ) em relação ao método da razão de Bowen, comprovando sua utilidade em estimativas da ETr para a cultura da soja e potencial uso no gerenciamento dos recursos hídricos da região.

**Palavras-chave:** *Glycine max*, razão de Bowen, sensoriamento remoto, recursos hídricos, irrigação.

## PERFORMANCE OF SSEBop MODEL IN ESTIMATING SOYBEAN ACTUAL EVAPOTRANSPIRATION IN DISTRITO FEDERAL

### 5.2 ABSTRACT

Savanna region is considered the main agricultural frontier of Brazil and has been suffering from serious problems causing conflicts over water use, which may worsen with the expansion of the irrigated areas. Searching the enhancement of water management, it is important to improve irrigation management and evaluate the performance of tools that enable to estimate evapotranspiration on rivers basins. Thus, the objective of this work was to evaluate the SSEBop model performance in estimating actual evapotranspiration (ET<sub>r</sub>) of a soybean crop irrigated by center pivot in the Rio Preto basin, Savanna region of Brazilian Midwest. ET<sub>r</sub> was estimated by remote sensing in application of SSEBop model (ET<sub>r</sub>-SSEBop) in digital images from Landsat 7 satellite and compared against ET<sub>r</sub> obtained by Bowen ratio method (ET<sub>r</sub>-RB) provided by micrometeorological stations installed within the irrigated area. The model was evaluated by correlation coefficient ( $r$ ) and statistical indexes of Willmott ( $dr$ ), root mean squared error (RMSE) and mean bias error (MBE). The model performance in estimating ET<sub>r</sub> was classified as the performance index ( $P_i$ ). The relationship between the methods presented excellent correlation ( $r = 0.87$ ) and concordance ( $dr = 0.72$ ), with root mean squared error of  $0.82 \text{ mm day}^{-1}$  and mean bias error of  $0.33 \text{ mm}$  in daily scale. Despite the slight overestimate of the SSEBop model presented by MBE index, the estimates showed very good performance ( $P_i = 0.63$ ) in relation to Bowen ratio method, showing that it can be used to estimate soybean crop ET<sub>r</sub> and in the management of water resources in the region.

**Key Words:** *Glycine max*, Bowen ratio, remote sensing, water resources, irrigation.

### 5.3 INTRODUÇÃO

Situado em sua maior parte no planalto central brasileiro, o Cerrado é o segundo maior bioma do país em extensão. Ocupando uma área aproximada de 204 milhões de hectares, é considerado a principal fronteira agrícola do Brasil e nos últimos 30 anos tem passado por um expressivo e contínuo crescimento da agricultura na região, que atualmente é responsável por mais de 50% de toda a produção de cereais, leguminosas e oleaginosas produzidas no país (IBGE, 2017). A cultura da soja representa 90% (15,6 milhões de hectares) da agricultura do bioma e na safra 2013/14 essa área representou mais da metade (52%) da soja cultivada no Brasil (FILHO & COSTA, 2016). Embora seja uma cultura tipicamente de sequeiro, a soja tem sido cada vez mais cultivada em sistemas irrigados, o que tem contribuído para aumentar a demanda de água na região, que já enfrenta problemas hídricos em algumas de suas bacias hidrográficas. Entre as outorgas emitidas para pivôs centrais, 14,7% foram destinadas à irrigação da soja (ANA, 2016). O crescimento do cultivo da soja irrigada na região indica a necessidade do aperfeiçoamento de critérios para o manejo de irrigação desta cultura.

Considerando o atual cenário do uso da água na região e o surgimento de conflitos pelo recurso, é fundamental avaliar e aperfeiçoar ferramentas que possam auxiliar na gestão de recursos hídricos na escala de bacia hidrográfica. Dentre as variáveis hidrológicas de interesse para o manejo da água em áreas irrigadas, a evapotranspiração real da cultura (ETr) é componente muito importante dentro do balanço hídrico dos ecossistemas agrícolas (CARVALHO et al., 2015) e parâmetro chave em estudos de avaliação ambiental e manejo de bacias hidrográficas (RAZIEI & PEREIRA, 2013). O monitoramento da sua distribuição espacial e temporal tem relevante importância no gerenciamento da água e demanda das culturas, sobretudo em regiões de escassez hídrica (GEBREMICHAEL et al., 2010).

Nas últimas duas décadas, estimativas da ETr em grandes áreas por meio de métodos de sensoriamento remoto baseados em dados do infravermelho termal têm se tornado cada vez mais disponíveis a partir de uma variedade de sistemas satélites (ALLEN et al., 2011; CAMMALLERI et al., 2014a). Embora a ETr não possa ser medida diretamente por sensores orbitais, ela pode ser estimada com base na radiação da superfície por meio de algoritmos semi-empíricos de sensoriamento remoto (GEBREMICHAEL et al., 2010). As principais vantagens da utilização deste tipo de metodologia consistem na obtenção de informações sobre a ETr sem a necessidade de dados de solo ou da cultura, além de permitir uma ampla cobertura espacial e temporal na escala desejada a um custo relativamente baixo (BASTIAANSEN et al., 2005). Existem diversos modelos que podem ser utilizados para essa finalidade, a exemplo dos mais

consolidados, porém mais complexos *Surface Energy Balance Algorithm for Land* - SEBAL (BASTIAANSEN et al., 1998) e *Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration* - METRIC (ALLEN et al., 2007), que buscam a solução completa do balanço de energia da superfície.

Entre os modelos mais recentes, o *Operational Simplified Surface Energy Balance* - SSEBop (SENAY et al., 2013) se apresenta como uma opção promissora, principalmente pela sua simplicidade e facilidade de operacionalização para obtenção da evapotranspiração a partir de imagens orbitais. O modelo estima a  $E_{Tr}$  em função da evapotranspiração de referência local e da fração evapotranspirativa, calculada a partir da temperatura da superfície obtida por sensoriamento remoto e das condições de contorno predefinidas para o fluxo de calor latente máximo e mínimo. Diferentemente dos modelos METRIC e SEBAL, a parametrização do SSEBop garante a eliminação da subjetividade na seleção das condições de contorno para o fluxo de calor latente (SENAY et al., 2013; SINGH & SENAY, 2016).

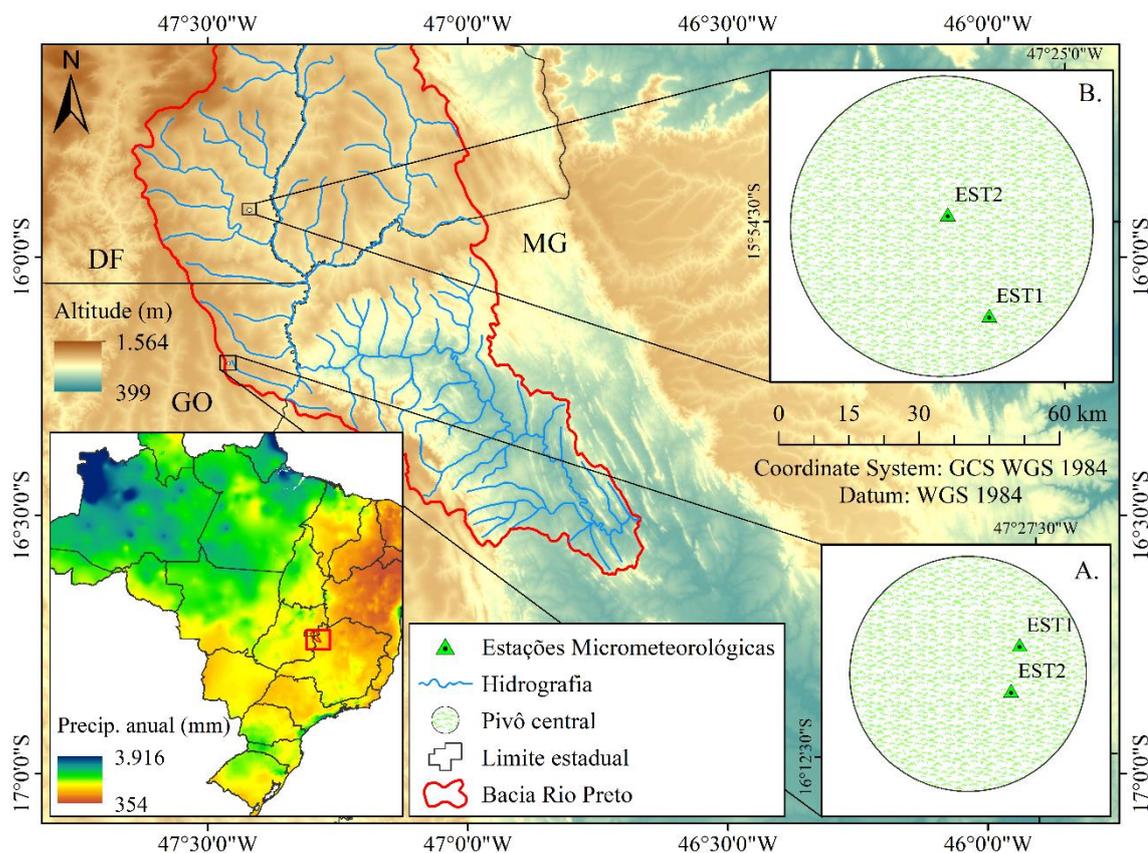
Além da evapotranspiração de referência e da temperatura da superfície, a estimativa da  $E_{Tr}$  pelo modelo SSEBop exige apenas a temperatura do ar no momento da passagem do satélite. Além disso, o modelo é fundamentado no conhecimento científico de que o processo de balanço de energia da superfície é impulsionado principalmente pela radiação líquida disponível (SENAY et al., 2013). Apesar de suas simplificações, o modelo SSEBop mantém as aproximações de modelos como SEBAL e METRIC. Singh et al. (2014) avaliaram o desempenho do modelo SSEBop na estimativa da  $E_{Tr}$  anual na bacia do Rio Colorado e observaram boa concordância com a  $E_{Tr}$  obtida pelo método da covariância de vórtices turbulentos, apresentando erro médio de 10%. Em estudo semelhante na mesma bacia, Senay et al. (2016) também relataram boa precisão, com erros médios variando de 13 a 22% nas datas de passagem do satélite. Em Nebraska, Singh & Senay (2016) observaram erro relativo de 7,1% entre as estimativas do modelo SSEBop e a  $E_{Tr}$  obtida pelo método da covariância de vórtices turbulentos em pivô cultivado com soja.

Embora tenha se mostrado adequado para simulação da  $E_{Tr}$  em outras localidades, o modelo SSEBop precisa ser melhor avaliado em regiões diferentes das quais foi desenvolvido, como na região de Cerrado do Centro-Oeste brasileiro. Dessa forma, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o desempenho do modelo SSEBop na estimativa da evapotranspiração real da cultura da soja irrigada por dois pivôs centrais localizados na bacia hidrográfica do Rio Preto, na região de Cerrado do Leste do Distrito Federal e do estado de Goiás.

## 5.4 MATERIAL E MÉTODOS

### 5.4.1 Área de estudo

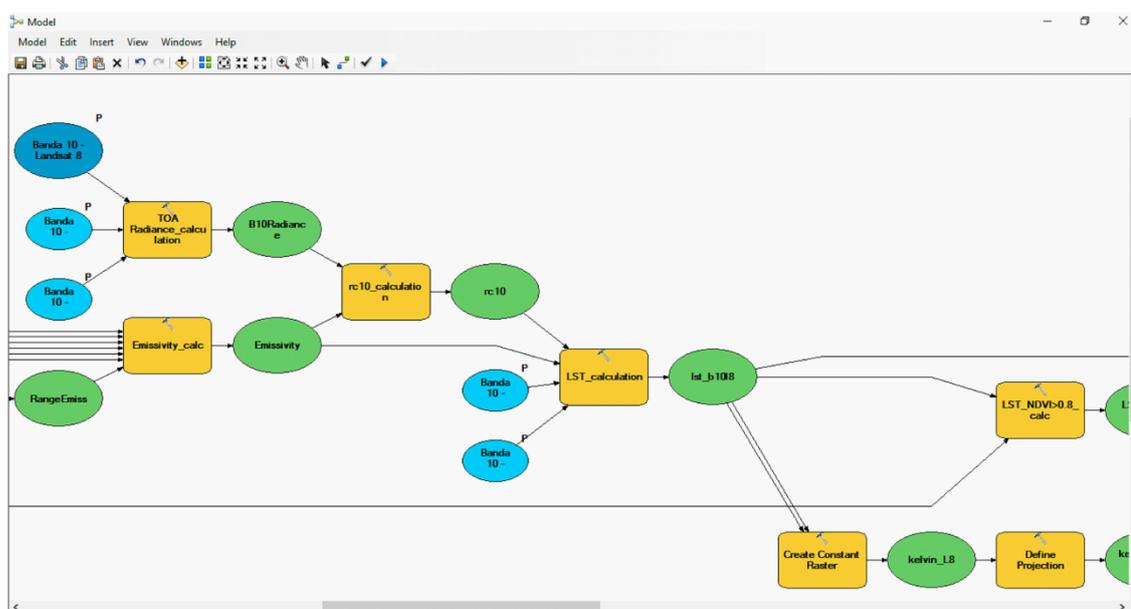
Os cultivos de soja foram conduzidos em duas áreas irrigadas (A e B) de dois pivôs centrais localizados na região da bacia hidrográfica do Rio Preto, na região de Cerrado a Leste do Distrito Federal e do estado de Goiás (Figura 1). Segundo a classificação climática de Köppen a região apresenta clima do tipo Aw, definido como tropical de savana com precipitação anual média de 1.400 mm (ALVARES et al., 2013b). A área irrigada A (Figura 1A) consistia de pivô central com capacidade para irrigar 51,2 hectares, localizado na posição geográfica  $16^{\circ} 12' 22''$  S e  $47^{\circ} 27' 37''$  W e altitude média de 990 m, onde a cultura da soja foi semeada em 29/11/2014 e colhida em 15/03/2015. A área irrigada B (Figura 1B) consistia de pivô central com capacidade para irrigar 90,6 hectares, localizado na posição geográfica  $15^{\circ} 54' 31''$  S e  $47^{\circ} 25' 12''$  W e altitude média de 940 m, onde a semeadura ocorreu em 26/10/2015 e a colheita em 12/02/2016.



**Figura 1.** Localização da bacia hidrográfica do Rio Preto e posicionamento das estações micrometeorológicas (EST1 e EST2) utilizadas na obtenção dos dados necessários ao método da razão de Bowen nas duas áreas irrigadas (A e B) com soja.

## 5.4.2 Dados necessários para execução do modelo SSEBop

O modelo SSEBop foi implementado na ferramenta *ModelBuilder* do software ArcGIS versão 10.4.1 (Figura 2) e executado em imagens digitais referentes aos dois períodos de cultivo da soja. As imagens foram adquiridas na página do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), correspondentes à órbita/ponto 221/71 e escolhidas aquelas com ausência de nuvens no local de interesse. Em razão da constante presença de nuvens, somente cenas do satélite Landsat 7 puderam ser utilizadas no processamento do modelo SSEBop. Para o primeiro cultivo (área A) foi possível a aquisição das imagens de 16/01/2015 e 01/02/2015, enquanto que para o segundo cultivo (área B) foi possível a utilização das imagens de 02/12/2015, 18/12/2015 e 04/02/2016. Para contornar o problema do SLC nas imagens Landsat 7 adquiridas a partir de 2003, foi aplicado um algoritmo de correção (*Fix Landsat 7 Scanline Errors*) para preenchimento das falhas nas imagens.



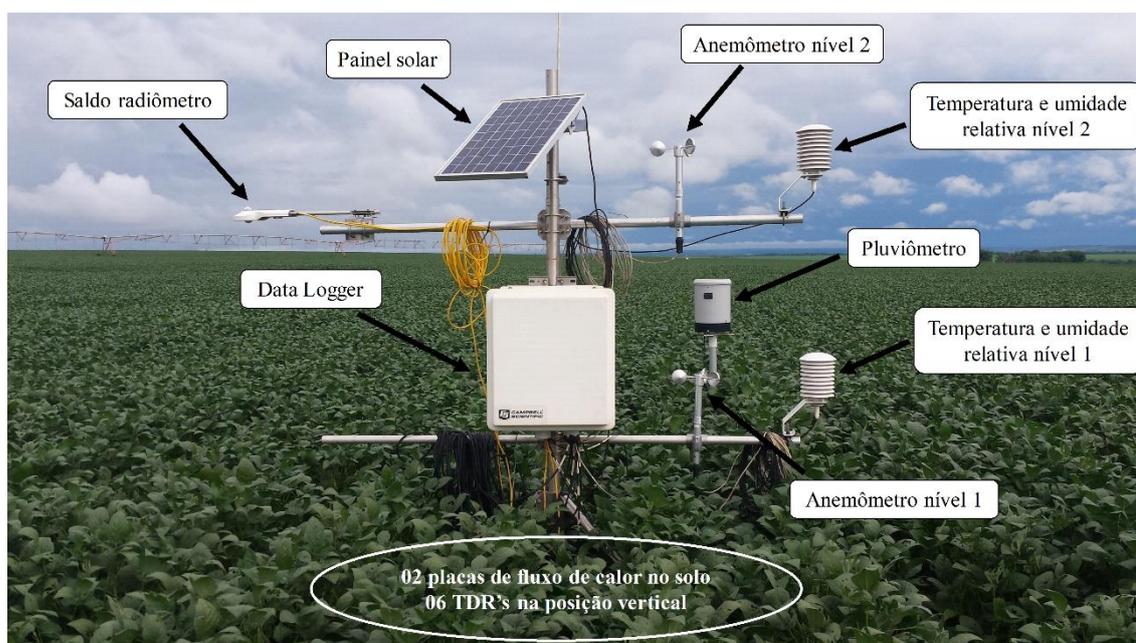
**Figura 2.** Ferramenta *ModelBuilder* do software ArcGIS 10.4.1, utilizada na implementação e execução do modelo SSEBop.

Os dados necessários ao cálculo do balanço de energia sob condições de céu claro e da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith FAO 56 (ALLEN et al., 1998) para o primeiro cultivo de soja foram obtidos da estação meteorológica de Luziânia, de responsabilidade do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e localizada a 50 km da área irrigada. Para o segundo cultivo de soja, os dados meteorológicos utilizados no processamento do modelo foram obtidos da estação meteorológica da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA-CPAC), localizada a 45 km da área irrigada.

### 5.4.3 Dados meteorológicos necessários ao método da razão de Bowen

Na área irrigada A (Figura 1A) foram instaladas duas estações micrometeorológicas (EST1 e EST2) para fornecimento dos dados necessários ao método da razão de Bowen, respectivamente posicionadas a 210 e 250 m de distância da borda da área do pivô. Na área irrigada B (Figura 1B) também foram instaladas duas estações micrometeorológicas, posicionadas a 225 e 450 m de distância da borda. Em ambas as áreas com soja, as estações micrometeorológicas permaneceram no interior da área irrigada por 100 dias, garantido o monitoramento da ETr em praticamente todo o ciclo da cultura.

As estações foram equipadas com sensores de umidade relativa e temperatura do ar (083E Relative Humidity and Temperature Sensor), velocidade do vento (Met One 014A Wind Speed Sensor), saldo de radiação (CNR4 Net Radiometer), fluxo de calor no solo (HFP01 Soil Heat Flux Plate), conteúdo volumétrico de água no solo (CS650 Water Content Reflectometers) e pluviômetros (TB4 Rain Gage). Os sensores de umidade relativa, temperatura do ar e velocidade do vento foram instalados a uma altura de 1,0 e 2,0 m da superfície do solo, correspondendo respectivamente aos níveis 1 e 2. O saldo radiômetro foi instalado a 1,80 m de altura e as placas de fluxo de calor no solo foram enterradas a 2,0 cm de profundidade. Os sensores foram conectados a um sistema automático de aquisição de dados (CR3000) e programado para o armazenamento dos dados médios a cada intervalo de dez minutos.



**Figura 3.** Estação micrometeorológica utilizada na obtenção dos dados para aplicação do método da razão de Bowen, com respectivos sensores instalados no interior da área irrigada.

Todos os cálculos foram realizados para cada período de uma hora com o auxílio de planilhas eletrônicas. As pressões de vapor do ar foram calculadas pelas Equações 5 e 6, e a razão de Bowen (Equação 7) foi obtida a partir das diferenças de temperatura ( $\Delta T$ ) e de pressão real de vapor ( $\Delta e$ ) entre os níveis 1 e 2 de instalação dos sensores.

$$e_s = 0,6108 \times \exp\left[\frac{17,27 \times T}{T + 237,3}\right] \quad (5)$$

$$e_a = e_s \times \frac{UR}{100} \quad (6)$$

$$\beta = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (7)$$

em que:  $e_s$  é a pressão de saturação do vapor do ar em kPa;  $T$  é a temperatura do ar nos níveis de medida em °C;  $UR$  é a umidade relativa do ar em %;  $e_a$  é a pressão real de vapor do ar em kPa;  $\gamma$  é o coeficiente psicométrico, considerado igual a  $0,060 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$  para a altitude média da região.

Para evitar possíveis inconsistências nos valores da razão  $\beta$ , foram adotados critérios de rejeição de dados conforme Perez et al. (1999), os quais eliminam gradientes menores que a resolução dos sensores e estabelecem classes de erro para os valores de  $\beta$  que se aproximam de -1 (Tabelas 1 e 2).

**Tabela 1.** Condições necessárias para aceitação dos valores da razão de Bowen.

Energia disponível	Diferença de pressão de vapor	Razão de Bowen	Fluxos de calor latente e sensível
$R_n - G > 0$	$\Delta e > 0$	$\beta > -1$	$LE > 0$ e $H \leq 0$ para $-1 < \beta \leq 0$ ou $H > 0$ para $\beta > 0$
	$\Delta e < 0$	$\beta < -1$	$LE < 0$ e $H > 0$
$R_n - G < 0$	$\Delta e > 0$	$\beta < -1$	$LE > 0$ e $H < 0$
	$\Delta e < 0$	$\beta > -1$	$LE < 0$ e $H \geq 0$ para $-1 < \beta \leq 0$ ou $H < 0$ para $\beta > 0$

Fonte: Perez et al. (1999).

**Tabela 2.** Classes de erro e condições para rejeição dos valores da razão de Bowen.

Classe de erro	Condição
A	$(R_n - G) > 0, \Delta e > 0$ e $\beta < -1 +  \epsilon $
B	$(R_n - G) > 0, \Delta e < 0$ e $\beta > -1 +  \epsilon $
C	$(R_n - G) < 0, \Delta e > 0$ e $\beta > -1 +  \epsilon $
D	$(R_n - G) < 0, \Delta e < 0$ e $\beta < -1 +  \epsilon $
E	Mudanças rápidas em $T$ e $e$

Fonte: Perez et al. (1999).

A partir do fluxo de calor latente (Equação 8) e do calor latente de vaporização da água ( $\lambda$ ) (Equação 9), a ETr-RB foi calculada para cada período de uma hora por meio da Equação 10. A evapotranspiração real diária foi então obtida pela acumulação dos dados horários.

$$LE = \frac{Rn - G}{1 + \beta} \quad (8)$$

$$\lambda = (2,501 - (0,00236 \times T)) \times 10^6 \quad (9)$$

$$ETr = \frac{LE \times 3600}{\lambda} \quad (10)$$

em que: Rn é o saldo de radiação em  $W m^{-2}$ ; G é o fluxo de calor no solo em  $W m^{-2}$ ; LE é o fluxo de calor latente em  $W m^{-2}$ . T é a temperatura do ar no nível 1 em  $^{\circ}C$ ; ETr é a evapotranspiração real da cultura em  $mm h^{-1}$ ; 3600 é o tempo em segundos correspondente ao intervalo de uma hora.

#### 5.4.4 Modelo SSEBop

Conforme recomendação de Senay et al. (2013), a temperatura do ar no momento da passagem do satélite foi substituída pela temperatura máxima diária em razão da ausência de dados horários. O modelo SSEBop relaciona a temperatura máxima diária do ar com a temperatura da superfície obtida por sensoriamento remoto por meio do coeficiente de correção “c”, obtido para cada pixel na imagem em que o NDVI (Equação 11) é maior que 0,80 e a temperatura da superfície maior que 270 K, condições comuns em áreas de vegetação em pleno desenvolvimento e ausência de nuvens. A temperatura de superfície ( $T_s$ ) foi obtida pela Equação 12, em conformidade com Allen et al. (2007).

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (11)$$

$$T_s = \frac{K_2}{\ln \left[ \left( \frac{\varepsilon \times K_1}{Rc} \right) + 1 \right]} \quad (12)$$

em que:  $\rho_{NIR}$  é a reflectância da banda do infravermelho próximo;  $\rho_{RED}$  é a reflectância da banda do vermelho;  $T_s$  é a temperatura da superfície em Kelvin;  $K_1$  e  $K_2$  são constantes relativas à banda termal do Landsat 7 (666,09 e 1.282,71  $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ , respectivamente); Rc é a radiância termal corrigida em  $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ ;  $\varepsilon$  é a emissividade da superfície.

A emissividade da superfície foi calculada a partir do NDVI, conforme sugestão de Sobrino et al. (2004). De acordo com os procedimentos sugeridos pelos autores, quando NDVI for menor que 0,20 o pixel é considerado solo exposto e a emissividade assumida é a emissividade do solo, igual a 0,97. Quando NDVI é maior que 0,50 o pixel é considerado todo preenchido com vegetação em desenvolvimento, assumindo a emissividade da vegetação igual a 0,99. Por fim, quando NDVI tem valor entre 0,20 e 0,50 é admitido que o pixel é composto por uma mistura de solo exposto e vegetação, obtendo-se a emissividade pela Equação 13.

$$\varepsilon = \varepsilon_v P_v + \varepsilon_s (1 - P_v) + d\varepsilon \quad (13)$$

em que:  $\varepsilon_v$  é a emissividade da vegetação (0,99);  $\varepsilon_s$  é a emissividade do solo (0,97);  $P_v$  é a proporção da vegetação;  $d\varepsilon$  é o efeito da distribuição geométrica das superfícies naturais e das reflexões internas (SOBRINO et al., 2004).

A proporção da vegetação foi obtida pela Equação 14 (CARLSON & RIPLEY, 1997), em que  $NDVI_{min}$  e  $NDVI_{max}$  são respectivamente o limite inferior e superior entre os quais é considerado a existência de solo exposto e vegetação em desenvolvimento no mesmo pixel. Embora os limites sugeridos pelos autores sejam de 0,20 e 0,50, os limites adotados foram 0,20 e 0,80 respectivamente, em razão da vegetação na região de estudo abranger áreas irrigadas que normalmente apresentam valores mais elevados de NDVI. O termo  $d\varepsilon$  foi obtido pela Equação 15, em que “F” é considerado igual a 0,55 para diferentes distribuições geométricas (SOBRINO et al., 2004). A radiância corrigida foi calculada pela Equação 16, em conformidade com Allen et al. (2007).

$$P_v = \left[ \frac{NDVI - NDVI_{MIN}}{NDVI_{MAX} - NDVI_{MIN}} \right]^2 \quad (14)$$

$$d\varepsilon = (1 - \varepsilon_s) \times (1 - P_v) \times F \times \varepsilon_v \quad (15)$$

$$R_c = \frac{L_t - R_p}{\tau_{NB}} - (1 - \varepsilon) \times R_{sky} \quad (16)$$

em que:  $L_t$  é a radiância espectral da banda termal em  $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ ;  $R_p$  é a radiância na banda 10,4 - 12,5  $\mu m$  ( $0,91 W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ );  $R_{sky}$  é a radiação térmica descendente em condições de céu claro ( $1,32 W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ );  $\tau_{NB}$  é a transmissividade do ar obtida na banda 10,4 - 12,5  $\mu m$  (0,866). Os valores de  $R_p$ ,  $R_{sky}$  e  $\tau_{NB}$  foram adotados conforme Allen et al. (2007).

O fator de correção da temperatura foi calculado para cada pixel na imagem (aqueles com NDVI > 0,80 e  $T_s > 270$  K) pela Equação 17, em que  $T_{s_{cold}}$  é a temperatura da superfície nos pixels referidos e  $T_a$  é a temperatura máxima do ar obtida na data de passagem do satélite pelas estações meteorológicas utilizadas como referência (EMBRAPA-CPAC e INMET).

$$c_{\text{pixel}} = \frac{T_{s_{\text{cold}}}}{T_a} \quad (17)$$

O fator de correção para cada imagem (c) foi obtido a partir da média dos valores de “ $c_{\text{pixel}}$ ” e a temperatura de pixel frio ( $T_c$ ) foi obtida pela Equação 18.

$$T_c = c \times T_a \quad (18)$$

A temperatura de pixel quente ( $T_h$ ) foi obtida pela Equação 19 a partir da temperatura de pixel frio e da diferença constante de temperatura do ar entre dois níveis acima da superfície ( $dT$ ), calculada pela Equação 20 por meio dos princípios do balanço de energia sob condições de céu claro (ALLEN et al., 1998) e de máximo fluxo de calor sensível (BASTIAANSEN et al., 1998; ALLEN et al., 2007).

$$T_h = T_c + dT \quad (19)$$

$$dT = \frac{R_n \times r_a}{\rho_a \times C_p} \quad (20)$$

em que:  $R_n$  é o saldo de radiação em condições de céu claro em  $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ;  $\rho_a$  é a densidade do ar em  $\text{kg m}^{-3}$ ;  $C_p$  é o calor específico do ar à pressão constante ( $\sim 1013 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ );  $r_a$  é a resistência aerodinâmica do ar ao transporte de calor assumida como  $110 \text{ s m}^{-1}$  conforme recomendação de Senay et al. (2013), embora seja dependente da altura do cultivo e da velocidade do vento.

A fração evapotranspirativa ( $ET_f$ ) e a evapotranspiração real ( $ET_r$ ) foram calculadas respectivamente pelas Equações 21 e 22, em que “ $k$ ” é um coeficiente que expressa a máxima evapotranspiração da cultura em relação à evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ), adotado como 1,2 conforme recomendação de Senay et al. (2013). A fração evapotranspirativa é considerada constante ao longo do dia da passagem do satélite e, portanto, pode ser utilizada para o cálculo da evapotranspiração real na escala diária (CHÁVEZ et al., 2008; CAMMALLERI et al., 2014b).

$$ETf = \frac{Th - Ts}{dT} \quad (21)$$

$$ETr = ETo \times ETf \times k \quad (22)$$

#### 5.4.5 Critério de avaliação das estimativas do modelo SSEBop

A ETr diária obtida pelo método da razão de Bowen (ETr-RB) a partir dos dados de cada estação micrometeorológica foi adotada como referência. As estimativas do modelo SSEBop (ETr-SSEBop) nos pixels correspondentes foram confrontadas com a ETr-RB pelo coeficiente de correlação de Pearson (r) e pelos índices estatísticos de Willmott (dr) (WILLMOTT et al., 2012), RMSE (raiz do erro médio quadrático) e MBE (erro médio absoluto). O desempenho do modelo foi classificado conforme índice de desempenho (Pi) proposto por Alvares et al. (2013a), de acordo com a Tabela 3.

**Tabela 3.** Classificação do índice de desempenho (Pi) proposto por Alvares et al. (2013a).

Índice Pi	Desempenho
$Pi \geq 0,75$	Ótimo
$0,60 \leq Pi < 0,75$	Muito Bom
$0,45 \leq Pi < 0,60$	Bom
$0,30 \leq Pi < 0,45$	Tolerável
$0,15 \leq Pi < 0,3$	Pobre
$0 \leq Pi < 0,15$	Ruim
$Pi < 0$	Muito Ruim

O coeficiente de correlação e o índice dr (Equação 23) representam respectivamente o grau de associação linear e concordância entre as estimativas do modelo e os dados observados. O RMSE (Equação 24) fornece informações sobre o desempenho do modelo a curto prazo e indica o valor real do erro produzido pelas estimativas, embora não diferencie sobrestimativa de subestimativa. Quanto menor o valor obtido para RMSE, melhor o desempenho do modelo. O indicador MBE (Equação 25) representa o desvio das médias e fornece informações quanto ao desempenho do modelo a longo prazo, com valores negativos indicando subestimativa e vice-versa. Quanto menor o valor absoluto de MBE, melhor é o desempenho do modelo (STONE, 1993). O índice de desempenho Pi (Equação 26) combina a precisão fornecida pelo coeficiente de correlação e a concordância fornecida pelo índice dr de Willmott (ALVARES et al., 2013a).

$$dr = \begin{cases} 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^N |y_i - x_i|}{2 \sum_{i=1}^N |x_i - \bar{x}|} \right], & \text{quando } \sum_{i=1}^N |y_i - x_i| \leq 2 \sum_{i=1}^N |x_i - \bar{x}| \\ \left[ \frac{2 \sum_{i=1}^N |x_i - \bar{x}|}{\sum_{i=1}^N |y_i - x_i|} \right] - 1, & \text{quando } \sum_{i=1}^N |y_i - x_i| > 2 \sum_{i=1}^N |x_i - \bar{x}| \end{cases} \quad (23)$$

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (24)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)}{N} \quad (25)$$

$$Pi = dr \times r \quad (26)$$

em que:  $y_i$  é a evapotranspiração real diária estimada pelo modelo SSEBop;  $x_i$  é a evapotranspiração real diária obtida pelo método da razão de Bowen;  $\bar{x}$  é a média da evapotranspiração real diária obtida pelo método da razão de Bowen; N é o número de observações; Pi é o índice de desempenho do modelo SSEBop.

## 5.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.5.1 Variáveis do modelo SSEBop

As variáveis requeridas no processamento do modelo SSEBop (ETo, Ta e dT), os coeficientes de correção da temperatura e as temperaturas calculadas para condições de fluxo de calor latente máximo (Tc) e mínimo (Th) para cada imagem utilizada estão apresentados na Tabela 4. Como as estimativas do modelo SSEBop foram realizadas em imagens digitais correspondentes à estação do verão, a temperatura máxima (Ta) nas datas referentes aos dois cultivos de soja não apresentou grandes variações. Observou-se média de 304,8 K (31,6 °C), com maior temperatura em 02/12/2015 (305,6 K) e menor em 04/02/2016 (303,8 K). A variável dT por sua vez apresentou valores semelhantes (26,1 e 26,0 K) nas datas em que a cultura ficou em campo na área irrigada A (16/01/2015 e 01/02/2015), enquanto que para a área irrigada B dT apresentou variações ao longo do ciclo da cultura, diminuindo os valores à medida que se aproximava o fim do ciclo da soja, no mês de fevereiro.

**Tabela 4.** Variáveis requeridas pelo modelo SSEBop na estimativa da evapotranspiração.

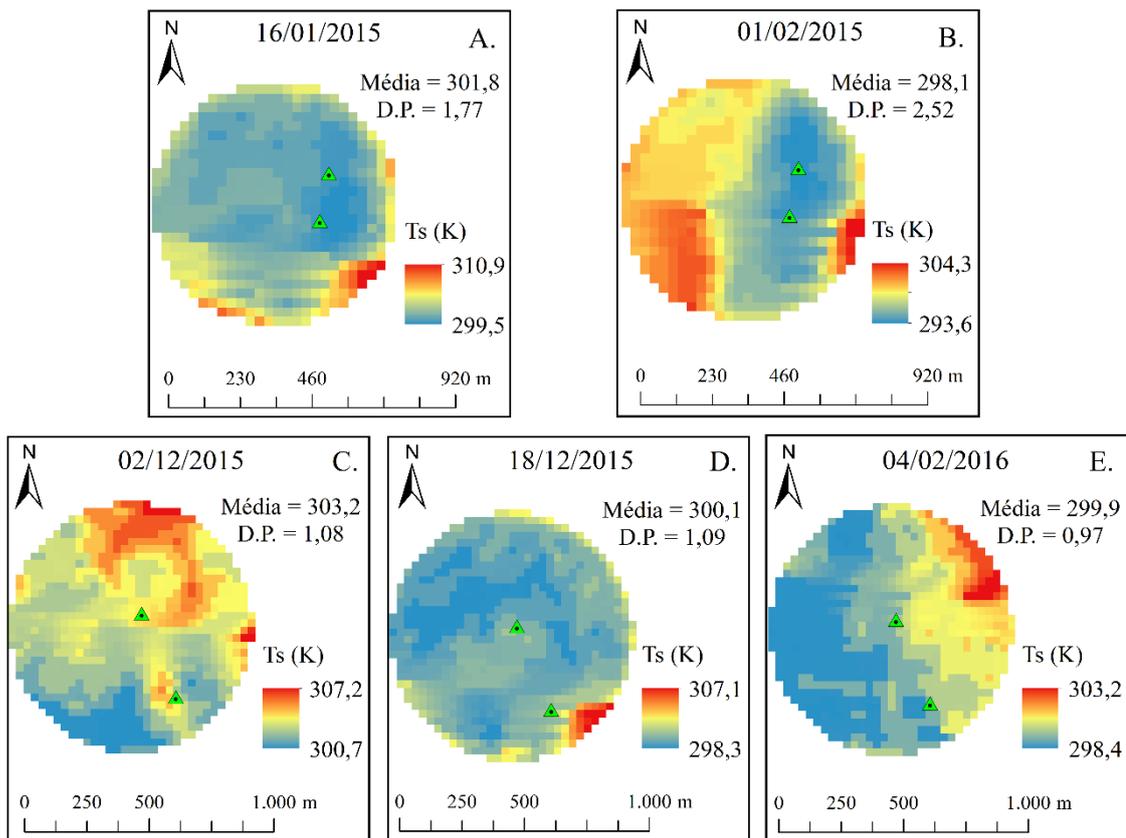
Data	Área	NDA	Satélite	ETo (mm)	Ta (K)	dT (K)	"c"	Tc (K)	Th (K)
16/01/2015	A	16	Landsat 7	5,80	304,5	26,1	0,9848	299,8	325,9
01/02/2015	A	32	Landsat 7	6,50	305,0	26,0	0,9781	298,3	324,3
02/12/2015	B	336	Landsat 7	5,50	305,6	26,6	0,9794	298,8	325,4
18/12/2015	B	352	Landsat 7	5,90	305,3	26,4	0,9845	299,6	326,0
04/02/2016	B	35	Landsat 7	5,50	303,8	24,9	0,9816	297,5	322,4

NDA = número do dia do ano; ETo = evapotranspiração de referência; Ta = temperatura máxima diária do ar na data de passagem do satélite; dT = diferença constante; c = coeficiente de correção da temperatura; Tc = Temperatura de pixel frio; Th = temperatura de pixel quente.

De acordo com Senay et al. (2013), a faixa de variação de dT depende do local, porém no pico do verão é esperado que seu valor permaneça entre 20 e 25 K. Por se tratar de um estudo realizado no planalto central do Brasil, era esperado que os valores de dT se apresentassem um pouco acima do observado pelo autor, em razão das altas temperaturas frequentemente observadas nessa região do país. É importante notar que em razão dos princípios envolvidos em seu cálculo, é assumido que dT não varia de ano para ano no mesmo local e período. O coeficiente “c” representa a relação média entre Ta obtida por estações meteorológicas da região e a temperatura da superfície nos pixels em que LE é considerado máximo. Embora o valor de “c” tenha sido calculado para cada imagem, a Tabela 4 indica que os valores foram aproximados para as imagens referentes aos dois períodos de cultivo da soja nas duas áreas,

indicando que durante um mesmo período do ano a relação entre as temperaturas não sofre grandes variações, conforme observado por Senay et al. (2013).

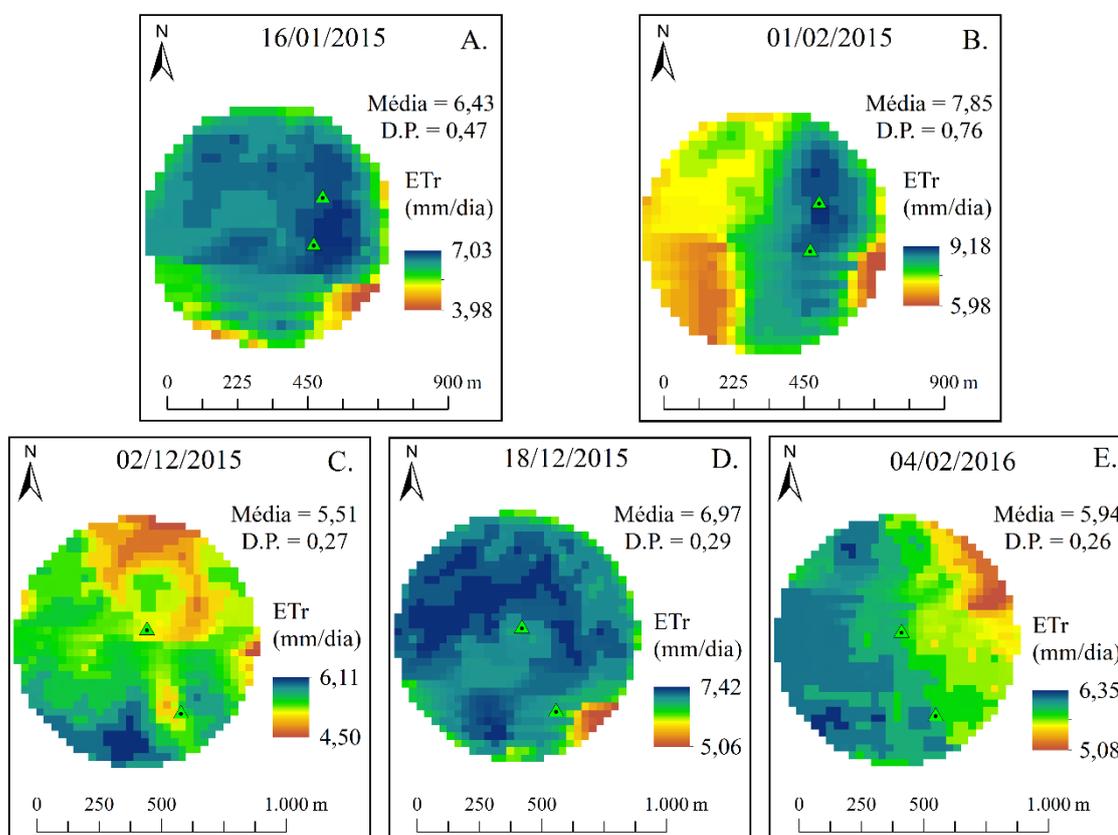
A temperatura da superfície calculada pelo modelo SSEBop é ilustrada na Figura 4 e indica que áreas mais frias foram observadas nos pixels mais úmidos e preenchidos com vegetação em desenvolvimento (cor azul). Embora a temperatura média calculada pelo modelo tenha apresentado valores próximos a 300 K (26,8 °C), em todas as imagens é perceptível variações de temperatura no interior da área irrigada devido a possíveis diferenças de umidade em razão do parcelamento da área na ocasião das irrigações. Na Figura 4B visualiza-se a diferença de temperatura (azul e vermelho) entre dois lados da área irrigada A devido ao giro incompleto do pivô no momento da passagem do satélite na data em questão. Nas imagens referentes à área irrigada B, a maior variação da temperatura foi observada em 02/12/2015 (Figura 4C).



**Figura 4.** Distribuição espacial e temporal da temperatura de superfície nas imagens adquiridas durante os dois ciclos da cultura da soja, em que as cores em azul e vermelho representam respectivamente pontos com menor e maior temperatura.

### 5.5.2 Evapotranspiração real estimada pelo modelo SSEBop

A variação espacial e temporal da ETr-SSEBop estimada nas duas áreas irrigadas são apresentadas na Figura 5. Nas imagens referentes à área irrigada A (Figuras 5A e 5B), a ETo mais elevada (Tabela 4) e a diferença de temperatura em razão da irrigação incompleta da área, no momento da passagem do satélite em 01/02/2015, contribuíram respectivamente para que a ETr-SSEBop apresentasse maior valor médio (7,85 mm d<sup>-1</sup>) e maior variação espacial no interior da área irrigada (desvio padrão = 0,76 mm d<sup>-1</sup>). A ETr-SSEBop estimada para a imagem de 16/01/2015 apresentou, por sua vez, menor valor médio (6,43 mm d<sup>-1</sup>) e menor variação no interior da área irrigada (desvio padrão = 0,47 mm d<sup>-1</sup>).

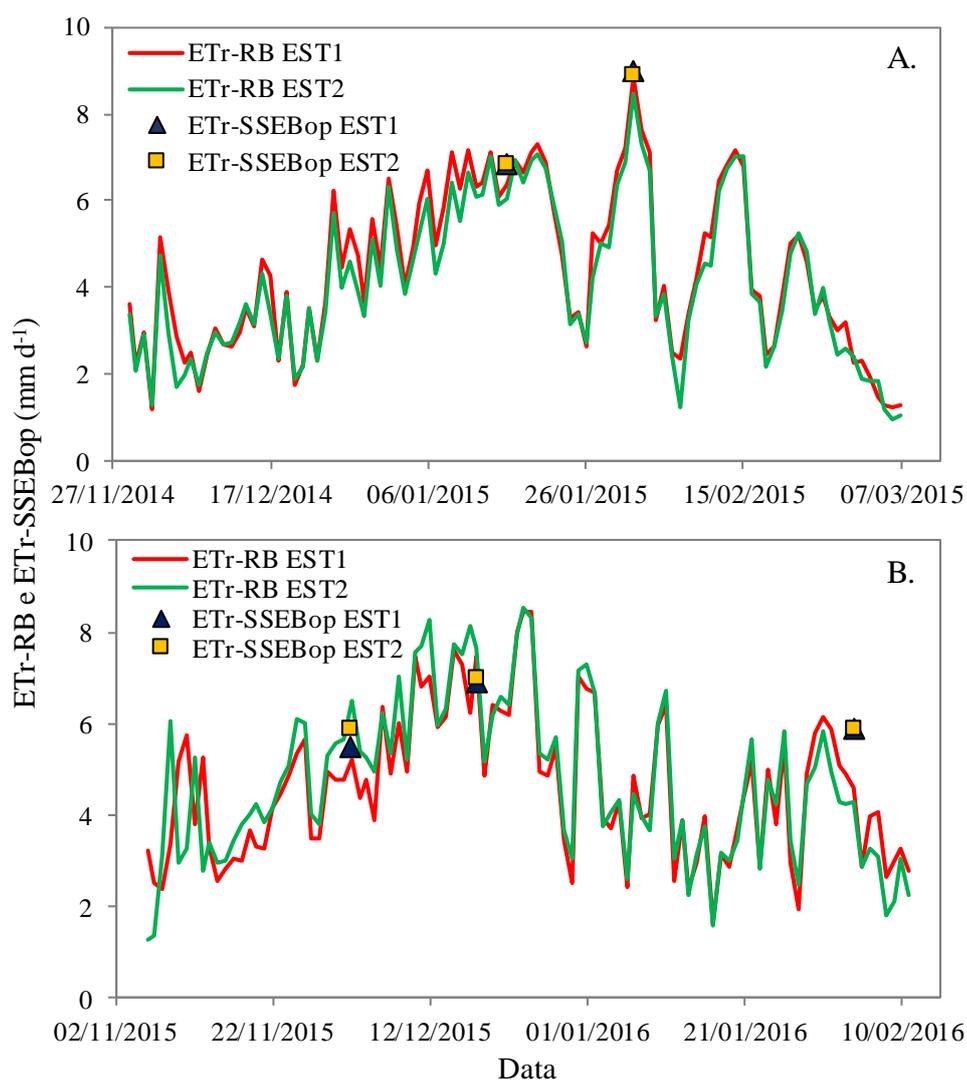


**Figura 5.** Variação espacial e distribuição temporal da ETr-SSEBop no interior da área irrigada nas imagens referentes aos dois períodos de cultivo da soja, em que as cores em azul e laranja escuro representam respectivamente pontos de maior e menor ETr.

Nas datas referentes à área irrigada B (Figuras 5C, 5D e 5E), a ETr-SSEBop estimada na imagem de 02/12/2015 apresentou maior variação em razão da cobertura incompleta do solo pela cultura, visto que na data em questão a cultura ainda não apresentava completo desenvolvimento vegetativo. Como no início do desenvolvimento a cobertura vegetal é incompleta e a evaporação do solo prevalece sobre a transpiração, uma menor estimativa da

ETr-SSEBop foi observada na imagem referente ao período inicial. Na imagem de 18/12/2015, a ETr-SSEBop apresentou maiores valores (média de  $6,97 \text{ mm d}^{-1}$ ) em relação à imagem anterior, visto que a maior umidade do solo, a ETo mais elevada e o início da fase reprodutiva da cultura favoreceram maior ETr. Em 04/02/2016 (Figura 5E) a cultura iniciava sua maturação fisiológica e apresentou pequenas variações na ETr-SSEBop no interior da área irrigada, além de menor ETr média ( $5,94 \text{ mm d}^{-1}$ ) em relação à imagem anterior.

A Figura 6 apresenta a ETr-RB diária obtida com os dados meteorológicos oriundos das estações EST1 e EST2 das áreas irrigadas A e B e a ETr-SSEBop diária estimada nos pixels correspondentes a cada estação durante os períodos de desenvolvimento da soja. Ao final dos dois ciclos da soja, a média diária da ETr-RB obtida na área irrigada A foi de  $4,30 \text{ mm d}^{-1}$  e  $4,70 \text{ mm d}^{-1}$  na área irrigada B. Pela Figura 6A é possível perceber que na área irrigada A as estimativas da ETr-SSEBop foram similares, principalmente pela proximidade das estações e pela resolução espacial de 30 m das imagens adquiridas. A comparação entre a ETr estimada pelo modelo SSEBop e a obtida pela razão de Bowen no pixel correspondente à estação EST1 da área irrigada A apresentou pequenos erros relativos de 8,0% em 16/01/2015 e 1,9% em 01/02/2015 (Tabela 5). No pixel referente à estação EST2, o erro relativo percentual entre ETr-SSEBop e ETr-RB foi de respectivamente 13,7 e 5,20% nas datas em questão. Os altos valores de ETr-RB e ETr-SSEBop nas datas referentes ao ciclo da soja na área irrigada A podem ser justificadas pela maior umidade da superfície ocasionada por eventos de precipitação ou irrigação ocorridos na data analisada e no dia anterior.



**Figura 6.** ETr-RB obtida a partir dos dados micrometeorológicos de cada estação durante os ciclos da soja e ETr-SSEBop estimada pelo modelo nas datas de aquisição das imagens.

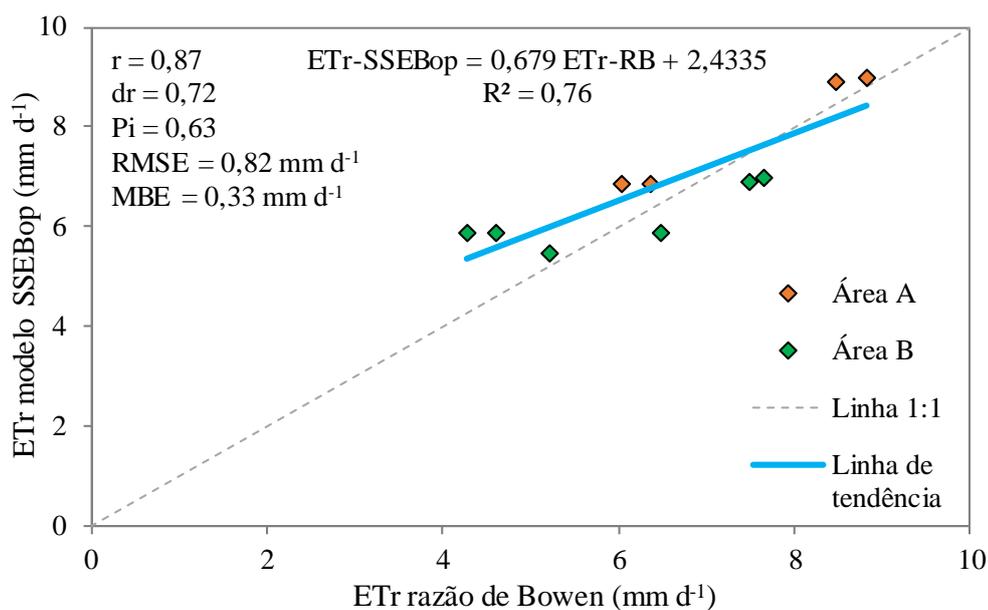
**Tabela 5.** ETr-RB diária obtida a partir dos dados micrometeorológicos de cada estação (EST1 e EST2) e ETr-SSEBop estimada pelo modelo nos pixels correspondentes, em cada data de aquisição das imagens referentes aos ciclos da soja nas duas áreas irrigadas.

	Área irrigada A		Área irrigada B		
	16/01/2015	01/02/2015	02/12/2015	18/12/2015	04/02/2016
ETr-RB EST1 (mm d <sup>-1</sup> )	6,40	8,80	5,20	7,50	4,60
ETr-SSEBop EST1 (mm d <sup>-1</sup> )	6,90	9,00	5,50	6,90	5,90
Erro relativo (%)	8,00	1,90	5,50	7,80	28,0
ETr-RB EST2 (mm d <sup>-1</sup> )	6,00	8,50	6,50	7,65	4,30
ETr-SSEBop EST2 (mm d <sup>-1</sup> )	6,90	8,90	5,90	7,00	5,90
Erro relativo (%)	13,7	5,20	9,00	8,40	37,9

Assim como na área irrigada A, a proximidade das estações e a resolução espacial das imagens também contribuíram para que a ETr-SSEBop estimada nos pixels referentes às duas estações instaladas na área irrigada B fosse aproximada em todas as imagens adquiridas (Figura 6B). A maior estimativa da ETr-SSEBop no pixel correspondente à estação EST1 foi observada em 18/12/2015, período em que a cultura da soja se encontrava no estágio de pleno enchimento de grãos, justificando a ETr de 6,90 mm d<sup>-1</sup>. Por outro lado, a menor ETr-SSEBop foi observada em 04/02/2016, data correspondente à fase final de desenvolvimento da soja. Entretanto, o maior erro relativo percentual entre a ETr-SSEBop e ETr-RB no pixel correspondente à estação EST1 foi também observado na fase final de desenvolvimento da cultura (Tabela 5). No pixel correspondente à estação EST2 a ETr-SSEBop também apresentou maior e menor estimativa respectivamente em 18/12/2015 (7,00 mm d<sup>-1</sup>) e 04/02/2016 (5,90 mm d<sup>-1</sup>).

Como observado na Tabela 5, os maiores erros relativos percentuais entre a ETr-SSEBop e a ETr-RB foram registrados na imagem de 04/02/2016. Na imagem em questão, a ETr-SSEBop sobrestimou a ETr-RB em 28% no pixel referente à estação EST1 e em 37,9% no pixel referente à estação EST2. As diferenças entre ETr-SSEBop e ETr-RB em algumas datas podem ser atribuídas principalmente à ETo adotada no processamento do modelo, já que as condições das estações meteorológicas de referência, de onde foram obtidos os dados para estimativa dessa variável, em alguns casos, não atendia os padrões ideais referentes ao estado de cuidado e conservação da grama.

A relação entre as estimativas do modelo SSEBop e a ETr obtida pelo método da razão de Bowen pode ser melhor analisada pelo gráfico de dispersão ilustrado na Figura 7, na qual é possível perceber correlação positiva entre os métodos. O coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) igual a 0,87 evidencia ótima relação linear entre as estimativas do SSEBop e o método da razão de Bowen. Entretanto, a inclinação da linha de tendência indica que o modelo SSEBop sobrestimou menores valores de ETr. No estado do Texas, Senay et al. (2014) observaram correlações entre 0,93 e 0,98 para diferentes períodos de agregação da ETr estimada pelo modelo SSEBop e a obtida por lisímetros de pesagem. Em estudo sob diferentes coberturas vegetais na bacia do Rio Colorado, Singh et al. (2014) verificaram correlação semelhante ao presente trabalho ( $r = 0,88$ ) entre a ETr estimada pelo modelo SSEBop e a obtida por outro método micrometeorológico, a covariância de vórtices turbulentos (*Eddy Covariance*).



**Figura 7.** Dispersão entre a ETr-SSEBop e a ETr-RB ao redor da linha 1:1, coeficientes de correlação ( $r$ ) e concordância ( $dr$ ), índices estatísticos RMSE e MBE relativos aos dois períodos de desenvolvimento da cultura da soja nas duas áreas irrigadas.

Embora o coeficiente de correlação de Pearson tenha evidenciado ótima associação linear entre as estimativas do modelo e o método da razão de Bowen, ele não contempla a concordância entre os métodos, justificando o uso do índice  $dr$  de Willmott. Pelo índice  $dr = 0,72$  é possível afirmar que a concordância entre a ETr-SSEBop e a ETr-RB foi adequada, apesar da tendência de sobrestimativa da ETr pelo modelo SSEBop. Para representar a magnitude média do erro entre os dois métodos, o indicador estatístico RMSE apresenta o valor real do erro produzido pelo modelo e é mais sensível a variações de grande magnitude. Dessa forma, o RMSE apontou um erro quadrático médio de  $0,82 \text{ mm d}^{-1}$  nas estimativas do SSEBop, evidenciando variações entre a ETr-SSEBop e a ETr-RB na escala diária.

O erro médio absoluto (MBE) apresentou índice de  $0,33$  e indica que de modo geral as estimativas do SSEBop sobrestimaram a ETr obtida pelo método da razão de Bowen em  $0,33 \text{ mm}$  na escala diária. Em aplicação do modelo SSEBop em imagens referentes a um pivô central utilizado na irrigação da cultura da soja em Nebraska nos Estados Unidos, Singh & Senay (2016) relataram RMSE de  $0,88 \text{ mm d}^{-1}$  e MBE de  $-0,22 \text{ mm d}^{-1}$  (subestimativa de  $6,2\%$ ) quando em comparação com o método micrometeorológico da covariância de vórtices turbulentos. Em estudo semelhante na bacia do Rio Colorado, Senay et al. (2016) relataram RMSE variando de  $0,40$  a  $0,60 \text{ mm}$  ( $13\%$  a  $22\%$ ) na escala diária. Apesar da sobrestimativa da

ETr apontada pelo índice MBE, o modelo SSEBop foi classificado como “muito bom” pelo índice de desempenho ( $P_i = 0,63$ ).

Apesar da facilidade operacional do modelo SSEBop, a qualidade dos dados requeridos é fundamental para obtenção de resultados satisfatórios, já que dados imprecisos ou não representativos acarretam em resultados errôneos e inviabilizam a utilização do modelo. Ainda que a ETr seja parâmetro fundamental no manejo da irrigação, o modelo SSEBop não pode ser considerado exatamente uma ferramenta voltada a esse objetivo, pois depende da disponibilidade de imagens favoráveis em sua utilização. No entanto o modelo é uma excelente ferramenta em estimativas da ETr em culturas como a da soja e no gerenciamento dos recursos hídricos de bacias hidrográficas, permitindo planejamentos futuros em estudos hidrológicos.

## **5.6 CONCLUSÕES**

1. O modelo SSEBop sobrestimou a evapotranspiração real em 0,33 mm na escala diária em comparação com o método da razão de Bowen. Entretanto, a correlação e a concordância entre os métodos foram boas.
2. O desempenho do modelo SSEBop nas estimativas da evapotranspiração real da cultura da soja foi classificado como “muito bom” pelo índice  $P_i$ .

## 5.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil - 2014: Relatório síntese. Brasília, 2016. 33p. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/arquivos/ProjetoPivos.pdf>>. Acesso em: 17 de outubro, 2017.

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

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300p. FAO Irrigation and Drainage Paper 56.

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

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M. Modeling monthly mean air temperature for Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 113, p. 407-427, 2013a.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013b.

BASTIAANSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, v. 212-213, p. 198-212, 1998.

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, p. 85-93, 2005.

CAMMALLERI, C.; ANDERSON, M. C.; GAO, F.; HAIN, C. R.; KUSTAS, W. P. Mapping daily evapotranspiration at field scales over rainfed and irrigated agricultural areas using remote sensing data fusion. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 186, p. 1-11, 2014a.

CAMMALLERI, C.; ANDERSON, M. C.; KUSTAS, W. P. Upscaling of evapotranspiration fluxes from instantaneous to daytime scales for thermal remote sensing applications. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 18, p. 1885-1894, 2014b.

CARLSON, T. N.; RIPLEY, D. A. On the relationship between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. **Remote Sensing of Environment**, v. 62, n. 3, p. 241-252, 1997.

CARVALHO, D. F. de; ROCHA, H. S. da; BONOMO, R.; SOUZA, A. P. de. Estimativa da evapotranspiração de referência a partir de dados meteorológicos limitados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 1, p. 1-11, 2015.

CHÁVEZ, J. L.; NEALE, C. M. U.; PRUEGER, J. H.; KUSTAS, W. P. Daily evapotranspiration estimates from extrapolating instantaneous airborne remote sensing ET values. **Irrigation Science**, v. 27, p. 67-81, 2008.

FILHO, A. C.; COSTA, K. A expansão da soja no cerrado: caminhos para a ocupação territorial, uso do solo e produção sustentável. 1. ed. São Paulo: Agroicone, 2016. Disponível em: <[http://www.inputbrasil.org/wp-content/uploads/2016/11/A-Expans%C3%A3o-da-Soja-no-Cerrado\\_Agroicone\\_INPUT.pdf](http://www.inputbrasil.org/wp-content/uploads/2016/11/A-Expans%C3%A3o-da-Soja-no-Cerrado_Agroicone_INPUT.pdf)>. Acesso em: 02 de outubro, 2017.

GEBREMICHAEL, M.; WANG, J.; SAMMIS, T. W. Dependence of remote sensing evapotranspiration algorithm on spatial resolution. **Atmospheric Research**, v. 96, p. 489-495, 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Levantamento sistemático da produção agrícola. IBGE, Rio de Janeiro, v. 30, n. 2, p. 1-83, 2017. Disponível em: <[ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao\\_Agricola/Levantamento\\_Sistematico\\_da\\_Producao\\_Agricola\\_\[mensal\]/Fasciculo/lspa\\_201709.pdf](ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistematico_da_Producao_Agricola_[mensal]/Fasciculo/lspa_201709.pdf)>. Acesso em: 10 de novembro, 2017.

PEREZ, P. J.; CASTELLVI, F.; IBAÑEZ, M.; ROSELL, J. I. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 97, p. 141-150, 1999.

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**, v. 121, p. 1-18, 2013.

SENAY, G. B.; BOHMS, S.; SINGH, R. K.; GOWDA, P. H.; VELPURI, N. M.; ALEMU, H.; VERDIN, J. P. Operational evapotranspiration mapping using remote sensing and weather

datasets: a new parameterization for the SSEB approach. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 49, n. 3, p. 577-591, 2013.

SENAY, G. B.; FRIEDRICHS, M.; SINGH, R. K.; VELPURI, N. M. Evaluating Landsat 8 evapotranspiration for water use mapping in the Colorado River basin. **Remote Sensing of Environment**, v. 185, p. 171-185, 2016.

SENAY, G. B.; GOWDA, P. H.; BOHMS, S.; HOWELL, T. A.; FRIEDRICHS, M.; MAREK, T. H.; VERDIN, J. P. Evaluating the SSEBop approach for evapotranspiration mapping with Landsat data using lysimetric observations in the semi-arid Texas High Plains. **Hydrology and Earth Systems Science**, v. 11, p. 723-756, 2014.

SINGH, R. K.; SENAY, G. B. Comparison of four different energy balance models for estimating evapotranspiration in the Midwestern United States. **Water**, v. 8, n. 9, p. 1-19, 2016.

SINGH, R. K.; SENAY, G. B.; VELPURI, N. M.; BOHMS, S.; SCOTT, R. L.; VERDIN, J. P. Actual evapotranspiration (water use) assessment of the Colorado river basin at the Landsat resolution using the Operational Simplified Surface Energy Balance model. **Remote Sensing**, v. 6, p. 233-256, 2014.

SOBRINO, J. A.; JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C.; PAOLINI, L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. **Remote Sensing of Environment**, v. 90, p. 434-440, 2004.

STONE, R.J. Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models. **Solar Energy**, v. 51, n. 4, p. 289-291, 1993.

WILLMOTT, C. J.; ROBESON, S. M.; MATSUURA, K. Short communication: A refined index of model performance. **International Journal of Climatology**, v. 32, p. 2088-2094, 2012.

## **CAPÍTULO II**

### **DESEMPENHO DO MODELO SSEB<sub>op</sub> NA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL DA CULTURA DO FEIJÃO NO DISTRITO FEDERAL**

## 6. DESEMPENHO DO MODELO SSEBop NA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL DA CULTURA DO FEIJÃO NO DISTRITO FEDERAL

### 6.1 RESUMO

A região do Cerrado é local de origem de grandes regiões hidrográficas brasileiras e exerce papel fundamental na manutenção dos recursos hídricos pelo país. O bioma é a principal fronteira agrícola do Brasil e atualmente sofre com sérios problemas hídricos e conflitos pelo uso da água em razão da expansão da agricultura irrigada. Visando o aprimoramento da gestão hídrica, é importante melhorar o manejo de irrigação avaliando o desempenho de ferramentas que possibilitem estimar a evapotranspiração real (ET<sub>r</sub>) em grandes áreas. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho do modelo SSEBop na estimativa da ET<sub>r</sub> diária da cultura do feijão irrigado por um pivô central na região de Cerrado da bacia do Rio Preto. A ET<sub>r</sub> foi estimada por sensoriamento remoto aplicando o modelo SSEBop (ET<sub>r</sub>-SSEBop) em seis imagens digitais dos satélites Landsat 7 e 8 e comparada à ET<sub>r</sub> obtida pelo método da razão de Bowen (ET<sub>r</sub>-BR) a partir de dados providos de estações micrometeorológicas instaladas no interior da área irrigada pelo pivô central. O modelo foi avaliado pelo coeficiente de correlação ( $r$ ) e pelos índices estatísticos de Willmott ( $dr$ ), raiz do erro médio quadrático (RMSE) e erro absoluto médio (MBE). O desempenho do modelo SSEBop nas estimativas da ET<sub>r</sub> foi classificado conforme o índice de desempenho ( $P_i$ ). A relação entre os métodos apresentou excelente correlação ( $r = 0,85$ ) e concordância ( $dr = 0,71$ ), com erro médio quadrático de 0,48 mm d<sup>-1</sup> e erro absoluto médio de -0,25 mm d<sup>-1</sup>. Apesar de ter apontado tendências de subestimativa pelo índice MBE, as estimativas da ET<sub>r</sub> pelo modelo SSEBop apresentaram desempenho muito bom ( $P_i = 0,60$ ) em relação ao método da razão de Bowen, comprovando sua utilidade em estimativas da ET<sub>r</sub> para a cultura do feijão e no gerenciamento dos recursos hídricos da região.

**Palavras-chave:** *Phaseolus vulgaris*, razão de Bowen, sensoriamento remoto, gestão hídrica, irrigação.

## PERFORMANCE OF SSEBop MODEL IN ESTIMATING COMMON BEAN ACTUAL EVAPOTRANSPIRATION IN DISTRITO FEDERAL

### 6.2 ABSTRACT

Brazilian Savanna region is the birthplace of great river basins and plays key role in maintenance of water resources across the country. The biome savanna is the main agricultural frontier of Brazil and currently suffers from serious water problems and conflicts by the use of water as a result of the expansion of irrigated agriculture. Aiming at the improvement of water management, it is important to improve irrigation management assessing the performance of tools that enable to estimate actual evapotranspiration (ET<sub>r</sub>) on the watershed scale. Thus, the objective of this work was to evaluate the performance of the SSEBop model to estimate actual evapotranspiration of bean crop irrigated by a center pivot in the savanna region of the Rio Preto basin. ET<sub>r</sub> was estimated by remote sensing in application of SSEBop model (ET<sub>r</sub>-SSEBop) in six digital images from Landsat 7 and 8 satellites and compared against ET<sub>r</sub> obtained by Bowen ratio method (ET<sub>r</sub>-RB) from micrometeorological data provided by stations installed within of an irrigated area by center pivot. The model was evaluated by correlation coefficient ( $r$ ) and by statistical indexes of Willmott ( $d_r$ ), root mean squared error (RMSE) and mean bias error (MBE). The model performance in estimating ET<sub>r</sub> was classified as the performance index ( $P_i$ ). The relationship between the methods presented excellent correlation ( $r = 0.85$ ) and concordance ( $d_r = 0.71$ ), with root mean squared error of  $0.48 \text{ mm day}^{-1}$  and mean bias error of  $-0.25 \text{ mm day}^{-1}$ . Despite having pointed underestimating trends by MBE index, ET<sub>r</sub> estimates by the SSEBop model showed very good performance ( $P_i = 0.60$ ) in relation to the Bowen ratio method, proving its usefulness in ET<sub>r</sub> estimates for bean crop and the management of water resources in the region.

**Key-Words:** *Phaseolus vulgaris*, Bowen ratio, remote sensing, water management, irrigation.

### 6.3 INTRODUÇÃO

O Cerrado é o segundo maior bioma do Brasil em extensão, ocupando cerca de 24% do território nacional com uma área aproximada de 204 milhões de hectares. Sua maior parte está localizada no planalto central brasileiro, abrangendo regiões de elevadas altitudes. O Cerrado desempenha papel fundamental na distribuição dos recursos hídricos pelo país e constitui local de origem das grandes bacias hidrográficas brasileiras (LIMA, 2011). O bioma é considerado a principal fronteira agrícola do Brasil e nos últimos 30 anos tem vivenciado um expressivo e contínuo crescimento da agricultura irrigada. Atualmente a região dos cerrados é responsável por mais de 50% de toda a produção de cereais, leguminosas e oleaginosas produzidas no país (IBGE, 2017).

O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de feijão, fonte de proteína na nutrição da população brasileira. Na safra 2016/17, a produção brasileira de feijão foi de 3,4 milhões de toneladas, dos quais 24% foram produzidos nos estados da região Centro-Oeste do país, onde o bioma Cerrado é predominante (CONAB, 2017). Devido a sua rentabilidade atrativa e rápido retorno econômico, o feijão da safra de inverno está entre as culturas mais exploradas nos sistemas produtivos sob regime de irrigação por pivô central na região de Cerrado. Entre as outorgas válidas para pivôs centrais no Brasil, 20,5% são destinadas à irrigação da cultura do feijão (ANA, 2016). A expansão das áreas irrigadas nas bacias hidrográficas da região do Cerrado brasileiro tem provocado sérios problemas hídricos e conflitos pelo uso da água, exigindo critérios adequados no manejo dos recursos hídricos destinados à atividade de irrigação.

Considerando o atual cenário da irrigação no Cerrado brasileiro e a adequada gestão de recursos hídricos, é fundamental a avaliação de ferramentas que possam estimar a evapotranspiração real das culturas (ETr) em áreas que podem cobrir toda uma bacia hidrográfica. Os métodos convencionais de estimativa da ETr, em geral, permitem a sua obtenção apenas para pequenas áreas. Assim como a precipitação, a ETr é uma das variáveis mais ativas no ciclo hidrológico e principal componente do balanço hídrico em ecossistemas agrícolas (CARVALHO et al., 2015), além de parâmetro chave em estudos de avaliação ambiental e manejo de bacias hidrográficas (RAZIEI & PEREIRA, 2013). Portanto, o monitoramento da sua distribuição espacial e temporal tem relevante importância no gerenciamento da água demandada pelas culturas, sobretudo em regiões de escassez hídrica (GEBREMICHAEL et al., 2010).

Nas últimas décadas, a tecnologia do balanço de energia por sensoriamento remoto tem se mostrado uma promessa substancial na aplicação em grandes áreas e em diversos tipos de vegetação e disponibilidade hídrica, consistindo em uma maneira efetiva de estimar a evapotranspiração real (ALLEN et al., 2011; ZHANG et al., 2017). Como os modelos disponíveis são capazes de obter características da superfície como albedo, índice de área foliar, índice de vegetação, emissividade e temperatura da superfície a partir das radiâncias detectadas por sensoriamento remoto (CONSOLI & VANELLA, 2014), é possível obter informações sobre evapotranspiração real sem a necessidade de dados de solo ou da cultura (BASTIAANSSEN et al., 2005).

Entre os modelos que buscam a completa solução do balanço de energia da superfície, o *Surface Energy Balance Algorithm for Land* - SEBAL (BASTIAANSSEN et al., 1998) e *Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration* - METRIC (ALLEN et al., 2007) são os mais consolidados, porém mais complexos. Há ainda outros modelos de menor complexidade e, portanto, maior facilidade operacional. Entre os modelos mais recentes, o *Operational Simplified Surface Energy Balance* - SSEBop (SENAY et al., 2013) se apresenta como uma opção promissora, principalmente pela sua simplicidade e facilidade de operacionalização na obtenção da evapotranspiração a partir de imagens orbitais. O modelo estima a ETr em função da evapotranspiração de referência local e da fração evapotranspirativa, calculada a partir da temperatura da superfície obtida por sensoriamento remoto e das condições de contorno predefinidas para o fluxo de calor latente máximo e mínimo.

Além da evapotranspiração de referência e da temperatura da superfície, a estimativa da ETr pelo SSEBop exige apenas a temperatura do ar no momento da passagem do satélite. Além disso, o modelo é fundamentado no conhecimento científico de que o balanço de energia da superfície é impulsionado principalmente pela radiação líquida disponível (SENAY et al., 2013). Apesar de suas simplificações, o SSEBop mantém as aproximações de modelos como SEBAL e METRIC e já apresentou boas estimativas em alguns locais dos Estados Unidos. Na bacia do Rio Colorado, Singh et al. (2014) avaliaram o desempenho do modelo SSEBop na estimativa da ETr anual e observaram boa concordância com a evapotranspiração obtida pelo método da covariância de vórtices turbulentos, com erro médio de 10%. Em estudo semelhante na mesma bacia, Senay et al. (2016) também relataram boa precisão do modelo SSEBop, com erros médios variando de 13 a 22% nas datas de passagem do satélite. Em Nebraska, Singh & Senay (2016) observaram erro relativo de 7,1% entre as estimativas do modelo SSEBop e a ETr

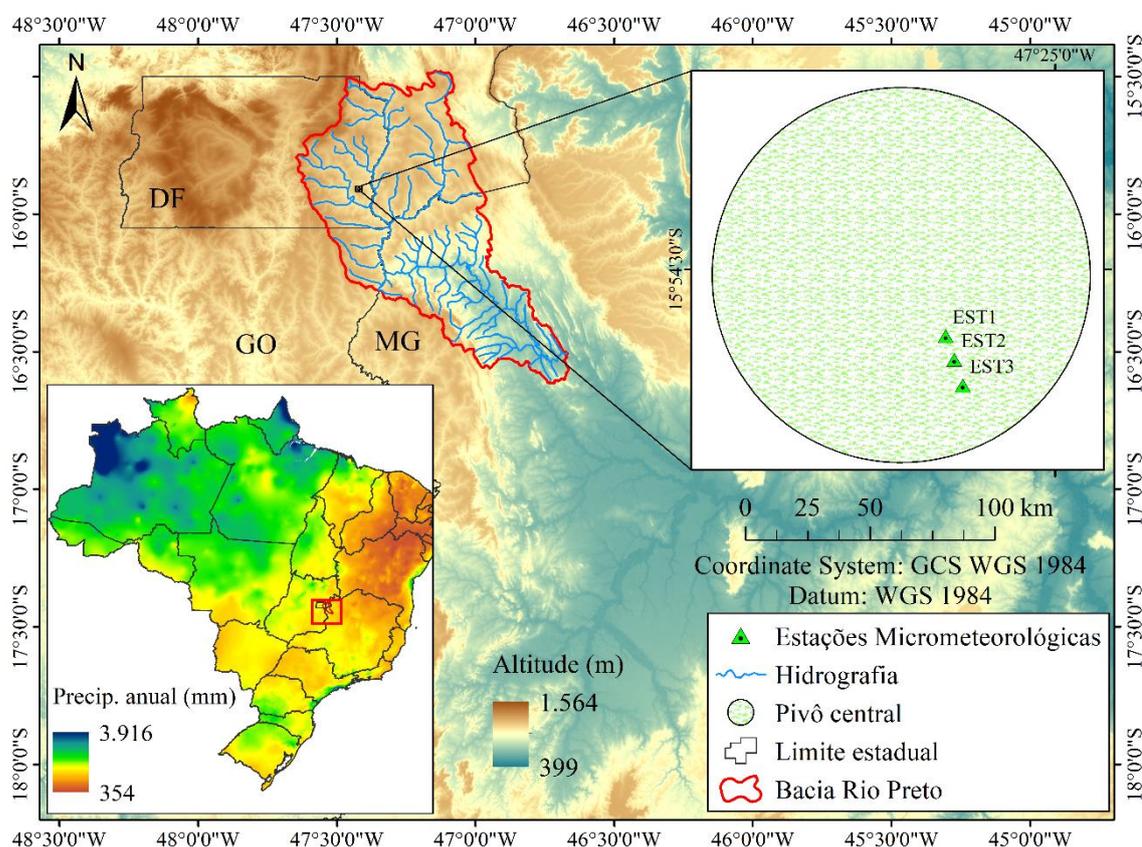
obtida pelo método da covariância de vórtices turbulentos em pivô central cultivado com soja. Em clima semiárido do Texas, Senay et al. (2014) avaliaram as estimativas diárias do SSEBop em áreas ocupadas com culturas irrigadas e não irrigadas e relataram forte relação linear entre a ETr estimada pelo modelo e a observada por lisímetros, embora o modelo tenha subestimado a ETr em 8 e 14% respectivamente nas áreas irrigadas e não irrigadas.

Embora o modelo SSEBop tenha se mostrado adequado na estimativa da ETr em regiões dos Estados Unidos, ele precisa ser melhor avaliado em locais diferentes dos quais foi desenvolvido. Dessa forma, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o desempenho do modelo SSEBop na estimativa da evapotranspiração real de uma cultura de feijão comum irrigado por um pivô central localizado na bacia hidrográfica do Rio Preto, na região de Cerrado a Leste do Distrito Federal.

## 6.4 MATERIAL E MÉTODOS

### 6.4.1 Área de estudo

O cultivo de feijão foi conduzido em área agrícola da região do Programa de Assentamento Dirigido do Distrito Federal (PAD-DF), na bacia hidrográfica do Rio Preto localizada a Leste do Distrito Federal (Figura 8). Segundo a classificação climática de Köppen a região apresenta clima do tipo Aw, definido como tropical de savana com precipitação anual média de 1.400 mm (ALVARES et al., 2013b). A área irrigada consistia de pivô central com capacidade de irrigar 90,6 hectares, localizado na posição geográfica 15°54'31" S e 47°25'12" W e altitude média de 940 m, onde a cultura do feijoeiro foi semeada em 30/04/2015 e colhida em 10/08/2015.



**Figura 8.** Localização da bacia hidrográfica do Rio Preto e disposição das estações micrometeorológicas (EST1, EST2 e EST3) no interior do pivô central cultivado com feijão.

### 6.4.2 Dados necessários para execução do modelo SSEBop

O modelo SSEBop foi implementado na ferramenta *ModelBuilder* do software ArcGIS versão 10.4.1 (Figura 2 da seção 5.4.2) e executado em quatro imagens do satélite Landsat 7

(24/05/2015, 09/06/2015, 11/07/2015 e 27/07/2015) e em duas imagens do satélite Landsat 8 (19/07/2015 e 04/08/2015), referentes ao período de cultivo do feijão em pivô central. As imagens foram adquiridas na página do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), correspondentes à órbita/ponto 221/71 e escolhidas aquelas em que não havia presença de nuvens no local de interesse. Para contornar o problema do SLC nas imagens Landsat 7 adquiridas a partir de 2003, foi aplicado um algoritmo de correção (*Fix Landsat 7 Scanline Errors*) para preenchimento das falhas nas imagens.

Os dados necessários ao cálculo do balanço de energia sob condições de céu claro e da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith FAO 56 (ALLEN et al., 1998) foram obtidos da estação meteorológica da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA-CPAC), localizada a 45 km da área irrigada com feijão.

#### **6.4.3 Dados meteorológicos necessários ao método da razão de Bowen**

Os dados necessários ao método da razão de Bowen foram obtidos por três estações micrometeorológicas (EST1, EST2 e EST3) instaladas no interior da área irrigada do pivô central (Figura 8), posicionadas respectivamente a 350, 290 e 240 m de distância da borda da área do pivô. As estações micrometeorológicas foram equipadas com sensores de umidade relativa e temperatura do ar (083E Relative Humidity and Temperature Sensor), velocidade do vento (Met One 014A Wind Speed Sensor), saldo de radiação (CNR4 Net Radiometer), fluxo de calor no solo (HFP01 Soil Heat Flux Plate), conteúdo volumétrico de água no solo (CS650 Water Content Reflectometers) e pluviômetros (TB4 Rain Gage), conforme Figura 3 da seção 5.4.3. Os sensores de umidade relativa, temperatura do ar e velocidade do vento foram instalados a uma altura de 1,0 e 2,0 m da superfície do solo, correspondendo respectivamente aos níveis 1 e 2. O saldo radiômetro foi instalado a 1,80 m de altura e as placas de fluxo de calor no solo foram enterradas a 2,0 cm de profundidade. Os sensores foram conectados a um sistema automático de aquisição de dados (CR3000) e programado para o armazenamento dos dados médios a cada intervalo de dez minutos.

Todos os cálculos foram realizados para cada período de uma hora com o auxílio de planilhas eletrônicas. As pressões de vapor do ar foram calculadas pelas Equações 27 e 28, e a razão de Bowen (Equação 29) foi obtida a partir das diferenças de temperatura ( $\Delta T$ ) e de pressão real de vapor do ar ( $\Delta e$ ) entre os níveis 1 e 2 de instalação dos sensores.

$$e_s = 0,6108 \times \exp \left[ \frac{17,27 \times T}{T + 237,3} \right] \quad (27)$$

$$e_a = e_s \times \frac{UR}{100} \quad (28)$$

$$\beta = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (29)$$

em que:  $e_s$  é a pressão de saturação do vapor do ar em kPa;  $T$  é a temperatura do ar nos níveis de medida em °C;  $UR$  é a umidade relativa do ar em %;  $e_a$  é a pressão real de vapor do ar em kPa;  $\gamma$  é o coeficiente psicométrico considerado igual a  $0,060 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$  para a altitude média da região.

Para evitar possíveis inconsistências nos resultados de  $\beta$ , foram adotados critérios de rejeição de dados conforme Perez et al. (1999), os quais eliminam gradientes menores que a resolução dos sensores e estabelecem classes de erro para os valores de  $\beta$  que se aproximam de -1 (Tabelas 1 e 2 da seção 5.4.3). A partir do fluxo de calor latente calculado pela Equação 30 e do calor latente de vaporização da água ( $\lambda$ ) (Equação 31), a  $E_{Tr}$  foi determinada para cada período de uma hora (Equação 32) e acumulada para obtenção da evapotranspiração real diária.

$$LE = \frac{R_n - G}{1 + \beta} \quad (30)$$

$$\lambda = (2,501 - (0,00236 \times T)) \times 10^6 \quad (31)$$

$$E_{Tr} = \frac{LE \times 3600}{\lambda} \quad (32)$$

em que:  $R_n$  é o saldo de radiação em  $\text{W m}^{-2}$ ;  $G$  é o fluxo de calor no solo em  $\text{W m}^{-2}$ ;  $LE$  é o fluxo de calor latente em  $\text{W m}^{-2}$ ;  $T$  é a temperatura do ar no nível 1 em °C;  $E_{Tr}$  é a evapotranspiração real da cultura em  $\text{mm h}^{-1}$ ; 3600 é o tempo em segundos correspondente ao intervalo de uma hora.

#### 6.4.4 Modelo SSEBop

Conforme recomendação de Senay et al. (2013), a temperatura do ar no momento da passagem do satélite foi substituída pela temperatura máxima diária para o caso de ausência de dados horários. O modelo relaciona a temperatura máxima diária do ar e a temperatura da superfície obtida por sensoriamento remoto por meio do coeficiente de correção “c”, obtido para cada pixel na imagem que apresente NDVI maior que 0,80 e temperatura da superfície maior que 270 K, condições comuns em áreas de vegetação em pleno desenvolvimento e

ausência de nuvens. O NDVI foi obtido pela Equação 33 e a temperatura da superfície (Ts) foi calculada pela Equação 34, em conformidade com Allen et al. (2007).

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{RED}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{RED}}} \quad (33)$$

$$T_s = \frac{K_2}{\ln \left[ \left( \frac{\varepsilon \times K_1}{R_c} \right) + 1 \right]} \quad (34)$$

em que:  $\rho_{\text{NIR}}$  é a reflectância da banda do infravermelho próximo;  $\rho_{\text{RED}}$  é a reflectância da banda do vermelho;  $T_s$  é a temperatura da superfície em Kelvin;  $K_1$  e  $K_2$  são constantes relativas à banda termal do sensor (774,88 e 1.321,08  $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$  para Landsat 8; 666,09 e 1.282,71  $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$  para Landsat 7);  $R_c$  é a radiância termal corrigida em  $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ ;  $\varepsilon$  é a emissividade da superfície.

A emissividade da superfície foi calculada em conformidade com Sobrino et al. (2004) a partir do NDVI. De acordo com os procedimentos sugeridos pelo autor, quando NDVI é menor que 0,20 o pixel é considerado como solo exposto e a emissividade assumida é a emissividade do solo, igual a 0,97. Quando NDVI é maior que 0,50 o pixel é considerado todo preenchido com vegetação em desenvolvimento, sendo assumida a emissividade da vegetação igual a 0,99. Por fim, quando NDVI tem valor entre 0,20 e 0,50 é admitido que o pixel é composto por uma mistura de solo exposto e vegetação, e a emissividade é calculada pela Equação 35.

$$\varepsilon = \varepsilon_v P_v + \varepsilon_s (1 - P_v) + d\varepsilon \quad (35)$$

em que:  $\varepsilon_v$  é a emissividade da vegetação (0,99);  $\varepsilon_s$  é a emissividade do solo (0,97);  $P_v$  é a proporção da vegetação;  $d\varepsilon$  é o efeito da distribuição geométrica das superfícies naturais e das reflexões internas (SOBRINO et al., 2004).

A proporção da vegetação foi obtida pela Equação 36 (CARLSON & RIPLEY, 1997), em que  $\text{NDVI}_{\text{min}}$  e  $\text{NDVI}_{\text{max}}$  são respectivamente o limite inferior e superior entre os quais é considerado a existência de solo exposto e vegetação em desenvolvimento no mesmo pixel. Embora os limites sugeridos pelos autores sejam de 0,20 e 0,50, os limites adotados foram 0,20 e 0,80 respectivamente, em razão da vegetação na região de estudo abranger áreas irrigadas que normalmente apresentam valores mais elevados de NDVI. O termo  $d\varepsilon$  foi obtido pela Equação 37, em que “F” é considerado igual a 0,55 para diferentes distribuições geométricas (SOBRINO

et al., 2004). A radiância corrigida foi calculada pela Equação 38, em conformidade com Allen et al. (2007).

$$P_v = \left[ \frac{NDVI - NDVI_{MIN}}{NDVI_{MAX} - NDVI_{MIN}} \right]^2 \quad (36)$$

$$d\varepsilon = (1 - \varepsilon_s) \times (1 - P_v) \times F \times \varepsilon_v \quad (37)$$

$$R_c = \frac{L_t - R_p}{\tau_{NB}} - (1 - \varepsilon) \times R_{sky} \quad (38)$$

em que:  $L_t$  é a radiância espectral da banda termal em  $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ ;  $R_p$  é a radiância na banda 10,4 - 12,5  $\mu m$  ( $0,91 W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ );  $R_{sky}$  é a radiação térmica descendente em condições de céu claro ( $1,32 W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ );  $\tau_{NB}$  é a transmissividade do ar obtida na banda 10,4 - 12,5  $\mu m$  (0,866). Os valores de  $R_p$ ,  $R_{sky}$  e  $\tau_{NB}$  foram adotados conforme Allen et al. (2007).

O fator de correção da temperatura foi calculado para cada pixel na imagem (aqueles com  $NDVI > 0,80$  e  $T_s > 270 K$ ) pela Equação 39, em que  $T_{scold}$  é a temperatura da superfície nos pixels referidos e  $T_a$  é a temperatura máxima do ar obtida na data de passagem do satélite pela estação meteorológica adotada como referência (EMBRAPA-CPAC).

$$c_{pixel} = \frac{T_{scold}}{T_a} \quad (39)$$

O fator de correção para cada imagem ( $c$ ) foi obtido a partir da média dos valores de “ $c_{pixel}$ ”, enquanto a temperatura de pixel frio ( $T_c$ ) foi obtida pela Equação 40.

$$T_c = c \times T_a \quad (40)$$

A temperatura de pixel quente ( $T_h$ ) foi obtida pela Equação 41 a partir da temperatura de pixel frio e da diferença constante de temperatura do ar entre dois níveis acima da superfície ( $dT$ ), calculada pela Equação 42 por meio dos princípios do balanço de energia sob condições de céu claro (ALLEN et al., 1998) e de máximo fluxo de calor sensível (BASTIAANSSEN et al., 1998; ALLEN et al., 2007).

$$T_h = T_c + dT \quad (41)$$

$$dT = \frac{R_n \times r_a}{\rho_a \times C_p} \quad (42)$$

em que:  $R_n$  é o saldo de radiação em condições de céu claro em  $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ;  $\rho_a$  é a densidade do ar em  $\text{kg m}^{-3}$ ;  $C_p$  é o calor específico do ar à pressão constante ( $\sim 1013 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ );  $r_a$  é a resistência aerodinâmica do ar ao transporte de calor assumida como  $110 \text{ s m}^{-1}$  (SENAY et al., 2013), embora seja dependente da altura do cultivo e da velocidade do vento.

A fração evapotranspirativa ( $ET_f$ ) e a evapotranspiração real ( $ET_r$ ) foram obtidas respectivamente pelas Equações 43 e 44, em que “ $k$ ” é um coeficiente que expressa a máxima evapotranspiração da cultura em relação à evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ), adotado como 1,2 conforme recomendação de Senay et al. (2013). A fração evapotranspirativa é considerada constante ao longo do dia da passagem do satélite, portanto pode ser utilizada para o cálculo da evapotranspiração real na escala diária (CHÁVEZ et al., 2008; CAMMALLERI et al., 2014).

$$ET_f = \frac{T_h - T_s}{dT} \quad (43)$$

$$ET_r = ET_o \times ET_f \times k \quad (44)$$

#### 6.4.5 Critério de avaliação das estimativas do modelo SSEBop

A  $ET_r$ -RB diária obtida a partir dos dados das estações micrometeorológicas foi adotada como referência e comparada à  $ET_r$ -SSEBop estimada nos pixels correspondentes pelo coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) e pelos índices estatísticos de Willmott ( $dr$ ) (WILLMOTT et al., 2012), RMSE (raiz do erro médio quadrático) e MBE (erro absoluto médio). O desempenho do modelo foi classificado conforme índice de desempenho ( $P_i$ ) proposto por Alvares et al. (2013a), de acordo com a Tabela 3 da seção 5.4.5

O coeficiente de correlação e o índice  $dr$  representam respectivamente o grau de associação linear e concordância entre as estimativas do modelo e os dados observados. O RMSE informa sobre o valor real do erro produzido pelo modelo e fornece informações a curto prazo sobre seu desempenho, porém não diferencia sobrestimativa de subestimativa. Quanto menor o valor obtido para RMSE, melhor o desempenho do modelo. O indicador MBE representa o desvio das médias e fornece informações quanto ao desempenho do modelo a longo prazo, com valores negativos indicando subestimativa e vice-versa. Quanto menor o valor absoluto de MBE, melhor é o desempenho do modelo (STONE, 1993). Os índices  $dr$ , RMSE, MBE e  $P_i$  foram calculados respectivamente pelas Equações 23, 24, 25 e 26 da seção 5.4.5.

## 6.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.5.1 Variáveis do modelo SSEBop

A Tabela 6 apresenta os dados relativos às imagens utilizadas no processamento do modelo SSEBop. A temperatura máxima do ar nas datas referentes às imagens apresentou média de 301,3 K (28,2 °C), com maior temperatura observada em 27/07/2015 (302,9 K) e menor em 19/07/2015 (298,6 K). A diferença constante (dT) se manteve próxima a 14 K para todas as datas, evidenciando o fato de que para o mesmo local e período do ano não há variações em sua magnitude devido aos princípios envolvidos no seu cálculo (balanço de energia sob condições de céu claro). Embora o local e período do ano sejam determinantes, Senay et al. (2013) afirmam que dT deve permanecer próximo a 20 K durante o período de máximo desenvolvimento das culturas e entre 20 e 25 K no período da estação verão. Entretanto, por se tratar de estudo realizado em sua maior parte no período da estação inverno, era esperado que os valores de dT se apresentassem menores em razão das típicas baixas temperaturas nessa época do ano na região.

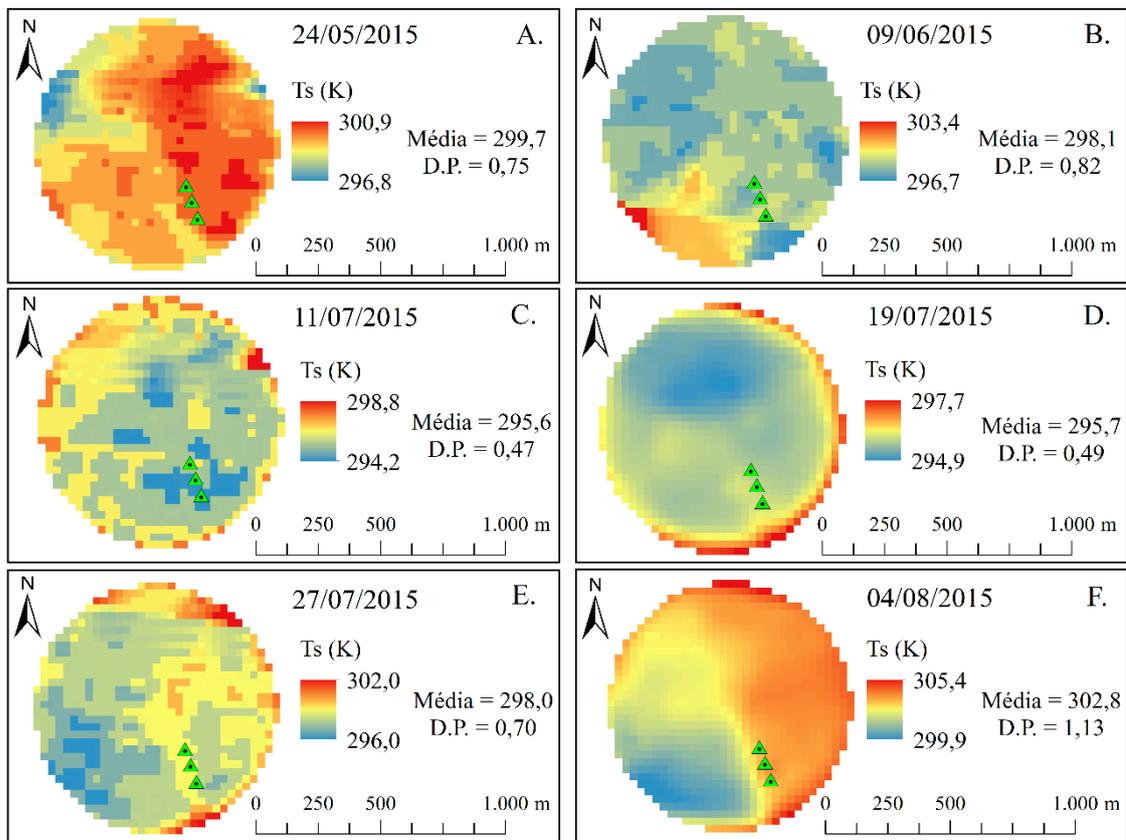
**Tabela 6.** Variáveis requeridas pelo modelo SSEBop na estimativa da evapotranspiração.

Data	NDA	Satélite	ETo (mm)	Ta (K)	dT (K)	“c”	Tc (K)	Th (K)
24/05/2015	144	Landsat 7	3,10	301,6	14,1	0,9792	295,3	309,4
09/06/2015	160	Landsat 7	3,90	300,7	14,0	0,9827	295,4	309,5
11/07/2015	192	Landsat 7	3,60	302,0	14,1	0,9780	295,3	309,4
19/07/2015	200	Landsat 8	3,40	298,6	14,3	0,9898	295,5	309,8
27/07/2015	208	Landsat 7	3,50	302,9	14,4	0,9797	296,7	311,1
04/08/2015	216	Landsat 8	4,00	302,3	14,3	0,9905	299,4	313,7

NDA = número do dia do ano; ETo = evapotranspiração de referência; Ta = temperatura máxima diária do ar na data de passagem do satélite; dT = diferença constante; c = coeficiente de correção da temperatura; Tc = Temperatura de pixel frio; Th = temperatura de pixel quente.

O coeficiente “c” em cada imagem representa a relação entre Ta obtida pela estação meteorológica de referência e a temperatura da superfície nos pixels em que a energia disponível é considerada completamente direcionada para o processo de evapotranspiração (aqueles com NDVI > 0,8). A Tabela 6 indica uma relação média de 0,983 e pequena variação entre as imagens utilizadas, confirmando sua estabilidade durante o período de desenvolvimento da cultura. A correção permite a conversão da temperatura máxima diária do ar em temperatura para condição de máximo fluxo de calor latente (Tc), eliminando a necessidade de seleção dos pixels frios da imagem (SENAY et al., 2013; SENAY et al., 2014).

A temperatura de superfície calculada pelo modelo SSEBop é apresentada pela Figura 9 e indica que os pixels mais úmidos e com vegetação melhor desenvolvida (cor azul) apresentaram menores temperaturas, com variações observadas conforme o desenvolvimento da cultura. Nas imagens de 24/05/2015, 09/06/2015 e 11/07/2015 (Figuras 9A, 9B e 9C), a temperatura média foi gradualmente menor (299,7, 298,1 e 295,6 K, respectivamente) em consequência do desenvolvimento vegetativo e do aumento do índice de área foliar da cultura, que favoreceram maior umidade e menor temperatura da superfície vegetada.



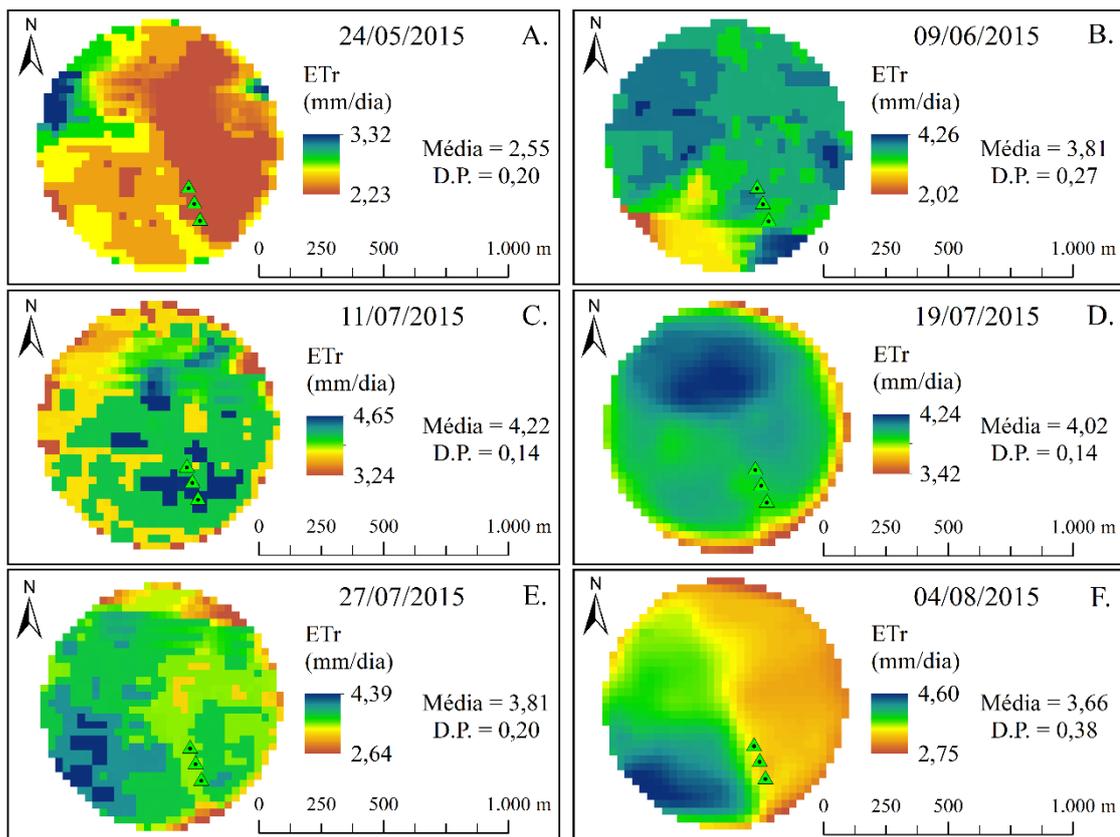
**Figura 9.** Distribuição espacial e temporal da temperatura de superfície nas imagens adquiridas durante o desenvolvimento do feijão, em que as cores em azul e vermelho representam respectivamente pontos com menor e maior temperatura.

No período médio-final da cultura (19/07/2015, 27/07/2015 e 04/08/2015), o processo inverso aconteceu e a temperatura média aumentou (295,7, 298,0 e 302,8 K, respectivamente) à medida que o feijão se aproximava da fase de senescência. A maior variação da temperatura da superfície no interior da área irrigada foi observada na imagem de 04/08/2015 (Figura 9F), que apresentou maior desvio padrão (1,13 K) e diferenças entre dois lados da área irrigada em razão da senescência da cultura. Senay et al. (2014) avaliaram o modelo SSEBop no estado do

Texas e observaram temperaturas de 302 e 308 K respectivamente em áreas irrigadas e não irrigadas.

### 6.5.2 Evapotranspiração real estimada pelo modelo SSEBop

A variação espacial e distribuição temporal da ETr-SSEBop na área irrigada é apresentada na Figura 10, na qual é perceptível a relação direta da ETr com Ts. De maneira análoga à temperatura da superfície, a ETr média estimada pelo modelo no interior da área irrigada também apresentou aumento gradual na fase de desenvolvimento vegetativo, com 2,55, 3,81 e 4,22 mm d<sup>-1</sup> respectivamente em 24/05/2015, 09/06/2015 e 11/07/2015. Como no início do desenvolvimento da cultura a cobertura vegetal é incompleta e a evaporação do solo prevalece sobre a transpiração, menores estimativas da ETr-SSEBop foram observadas nas imagens referentes ao período inicial.

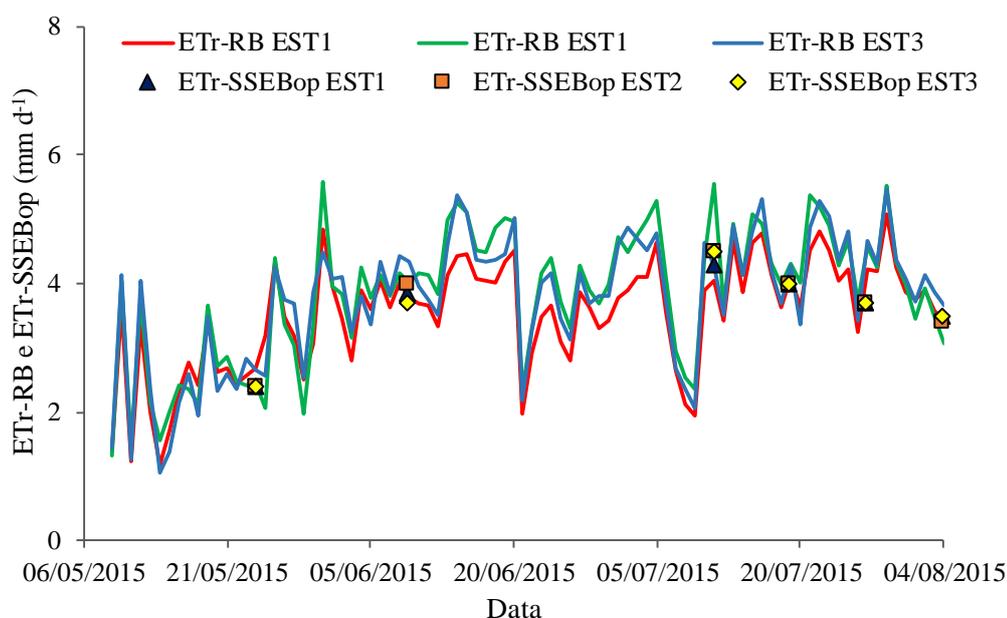


**Figura 10.** Distribuição espacial e temporal da ETr-SSEBop no interior da área irrigada durante o desenvolvimento do feijão, em que os pontos em azul e laranja escuro representam respectivamente pontos de maior e menor ETr.

Como esperado, maiores estimativas de ETr-SSEBop foram observadas nas datas correspondentes ao pleno desenvolvimento vegetativo e reprodutivo da cultura (11/07/2015 e

19/07/2015), com médias de 4,22 e 4,02 mm d<sup>-1</sup>, respectivamente. No período médio-final de desenvolvimento do feijão a ETr diminuiu à medida que se aproximava da senescência, apresentando valores médios de 3,81 e 3,66 mm d<sup>-1</sup> respectivamente nas datas de 27/07/2015 e 04/08/2015. Na imagem de 04/08/2015 é perceptível maiores variações da ETr-SSEBop também em razão da fase de senescência. A Figura 10 destaca ainda a melhor qualidade das imagens do satélite Landsat 8 (Figuras 10D e 10F), em razão do imageamento por varredura eletrônica que garante melhor qualidade das imagens.

A Figura 11 apresenta a ETr-RB diária obtida nas três estações micrometeorológicas (EST1, EST2 e EST3) e a ETr-SSEBop estimada nos pixels correspondentes a cada estação durante o período de desenvolvimento do feijão. Em razão da proximidade das estações e da resolução espacial de 30 m das imagens adquiridas, é possível perceber que a ETr-SSEBop foi aproximada ou semelhante nos pixels das estações micrometeorológicas em todas as datas referentes às imagens processadas. Embora os dados micrometeorológicos utilizados no método da razão de Bowen tenham sido obtidos em uma área irrigada por pivô central, onde as condições de umidade de solo são consideradas homogêneas, a ETr-RB apresentou ainda pequenas variações entre as três estações micrometeorológicas, o que favoreceu maiores variações entre ETr-SSEBop e ETr-RB. Ao final do ciclo do feijão, a média diária da ETr-RB foi de 3,50 mm d<sup>-1</sup> obtida pela estação EST1 e 3,80 mm d<sup>-1</sup> nas estações EST2 e EST3.



**Figura 11.** ETr-RB obtida pelos dados micrometeorológicos das três estações (EST1, EST2 e EST3) durante o ciclo da cultura do feijão e ETr-SSEBop estimada nos pixels correspondentes nas datas de aquisição das imagens.

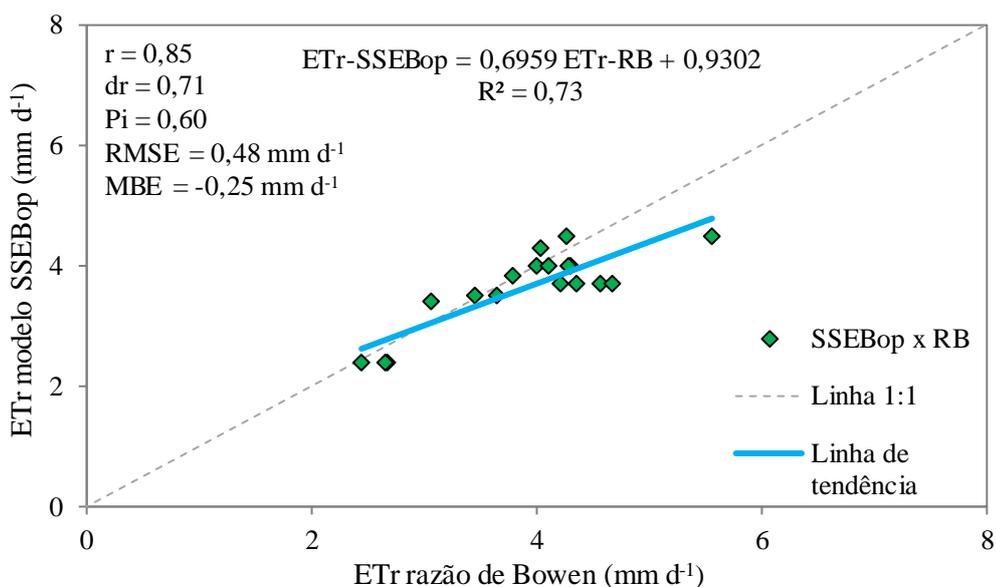
A Tabela 7 apresenta os erros relativos percentuais entre as estimativas do modelo SSEBop e a ETr obtida pelo método da razão de Bowen em cada data de aquisição das imagens. Na imagem de 27/07/2015 foram observados os maiores erros relativos percentuais entre a ETr estimada pelo modelo SSEBop e a obtida pelo método da razão de Bowen nos pixels referentes às estações EST1, EST2 e EST3, com respectivamente 12,2, 19,2 e 20,9%. As melhores estimativas (menores erros relativos percentuais) da ETr-SSEBop em relação à ETr-RB foram observadas em 04/08/2015 nos pixels das estações EST1 e EST3 (1,40 e 4,20% respectivamente) e em 09/06/2015 no pixel da estação EST2, que apresentou erro relativo percentual de 0,30%. Os maiores erros relativos entre os métodos apontaram mais de 20% de subestimativa do modelo SSEBop em relação ao método da razão de Bowen. No estado do Texas, Senay et al. (2014) avaliaram o desempenho do modelo SSEBop em comparação com dados de lisímetro de pesagem e registraram subestimativas de 8,0% e 14,0% respectivamente em áreas irrigadas e não irrigadas.

**Tabela 7.** ETr-RB diária obtida a partir dos dados micrometeorológicos de cada estação (EST1, EST2 e EST3) e ETr-SSEBop estimada pelo modelo nos pixels correspondentes, em cada data de aquisição das imagens referentes ao período de cultivo do feijão.

	24/05/2015	09/06/2015	11/07/2015	19/07/2015	27/07/2015	04/08/2015
ETr-RB EST1 (mm d <sup>-1</sup> )	2,70	3,80	4,00	4,10	4,20	3,45
ETr-SSEBop EST1 (mm d <sup>-1</sup> )	2,40	3,85	4,30	4,00	3,70	3,50
Erro relativo (%)	10,1	1,70	6,40	2,60	12,2	1,40
ETr-RB EST2 (mm d <sup>-1</sup> )	2,45	4,00	5,55	4,30	4,60	3,10
ETr-SSEBop EST2 (mm d <sup>-1</sup> )	2,40	4,00	4,50	4,00	3,70	3,40
Erro relativo (%)	1,70	0,30	19,0	7,10	19,2	11,1
ETr-RB EST3 (mm d <sup>-1</sup> )	2,70	4,35	4,25	4,30	4,70	3,65
ETr-SSEBop EST3 (mm d <sup>-1</sup> )	2,40	3,70	4,50	4,00	3,70	3,50
Erro relativo (%)	9,90	15,0	5,30	6,80	20,9	4,20

A relação entre as estimativas do modelo SSEBop e a ETr obtida pelo método da razão de Bowen pode ser melhor observada no gráfico de dispersão ilustrado na Figura 12, no qual é possível perceber relação positiva entre os métodos. O coeficiente de correlação de Pearson (r) igual a 0,85 evidencia ótima correlação entre as estimativas do modelo SSEBop e o método da razão de Bowen. Entretanto, a inclinação da linha de ajuste indica variação de diferentes magnitudes entre os métodos e uma tendência de subestimativa do modelo SSEBop. No estado

do Texas, Senay et al. (2014) observaram correlações entre 0,93 e 0,98 para diferentes períodos de agregação da ETr estimada pelo modelo SSEBop e obtida por lisímetros de pesagem. Em estudo sob diferentes coberturas vegetais na bacia do Rio Colorado, Singh et al. (2014) também verificaram boa correlação ( $r = 0,88$ ) entre a ETr estimada pelo modelo SSEBop e a obtida por outro método micrometeorológico, a covariância de vórtices turbulentos (*Eddy Covariance*).



**Figura 12.** Dispersão entre a ETr-SSEBop e a ETr-RB ao redor da linha 1:1, coeficientes de correlação ( $r$ ) e concordância ( $dr$ ) e índices estatísticos RMSE e MBE relativos ao período de desenvolvimento da cultura do feijão.

Embora o coeficiente de correlação de Pearson tenha evidenciado boa relação linear entre as estimativas do modelo e o método da razão de Bowen, ele não contempla a concordância entre os métodos, justificando a aplicação do índice  $dr$  de Willmott às estimativas do modelo. O índice  $dr = 0,71$  indica boa concordância entre as estimativas de ETr dadas pelo modelo SSEBop e o método da razão de Bowen, porém não se pode inferir que houve boa aproximação entre os valores de ETr em razão da tendência de subestimativa do modelo SSEBop apresentada pela linha de tendência. Para representar a magnitude média do erro entre os dois métodos, o indicador estatístico RMSE apresenta o valor real do erro produzido pelo modelo e é mais sensível a erros de grande magnitude. Dessa forma, o RMSE evidenciou um erro médio de  $0,48 \text{ mm d}^{-1}$  nas estimativas do modelo SSEBop, confirmando que o modelo pode ser uma boa alternativa na estimativa da ETr da cultura do feijão na escala diária.

O erro médio absoluto (MBE) apresentou índice de  $-0,25 \text{ mm d}^{-1}$  e indica que de modo geral o modelo SSEBop subestimou em  $0,25 \text{ mm}$  a ETr obtida na escala diária, quando em

comparação com o método da razão de Bowen. Aplicações do modelo SSEBop em imagens referentes a um pivô central irrigando soja em Nebraska nos Estados Unidos, Singh & Senay (2016) relataram MBE de  $-0,22 \text{ mm d}^{-1}$  (6,2% de subestimativa), erro relativo percentual de 7,1% e RMSE de  $0,88 \text{ mm d}^{-1}$  quando em comparação com o método micrometeorológico da covariância de vórtices turbulentos. Em estudo semelhante na bacia do Rio Colorado, Senay et al. (2016) relataram RMSE variando de 0,48 a  $0,60 \text{ mm d}^{-1}$  (13 a 22% de erro médio) também na escala diária. Apesar da subestimativa da ETr apontada pelo índice MBE, o desempenho do modelo SSEBop foi classificado como “muito bom” pelo índice de desempenho ( $P_i = 0,60$ ), confirmando sua utilidade na estimativa da cultura irrigada do feijoeiro.

Apesar da facilidade operacional do modelo SSEBop, a qualidade dos dados requeridos na sua execução é fundamental para a obtenção de resultados satisfatórios, já que dados imprecisos ou não representativos produzem resultados errôneos e inviabilizam a aplicação do modelo. Ainda que a evapotranspiração real seja parâmetro fundamental no manejo da irrigação, o modelo SSEBop não pode ser considerado uma ferramenta voltada a esse objetivo, pois depende da disponibilidade de imagens favoráveis para a sua utilização.

## 6.6 CONCLUSÕES

1. O modelo SSEBop subestimou a evapotranspiração real da cultura do feijoeiro em  $0,25 \text{ mm}$  na escala diária em comparação com o método da razão de Bowen. A correlação e concordância entre os métodos foram boas.
2. O desempenho do modelo SSEBop nas estimativas da evapotranspiração real da cultura do feijoeiro foi classificado como “muito bom” pelo índice  $P_i$ .

## 6.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil - 2014: Relatório síntese. Brasília: ANA, 2016. 33p. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/arquivos/ProjetoPivos.pdf>>. Acesso em: 17 de outubro, 2017.

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

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300p. FAO Irrigation and Drainage Paper 56.

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

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M. Modeling monthly mean air temperature for Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 113, p. 407-427, 2013a.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013b.

BASTIAANSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, v. 212-213, p. 198-212, 1998.

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, p. 85-93, 2005.

CAMMALLERI, C.; ANDERSON, M. C.; KUSTAS, W. P. Upscaling of evapotranspiration fluxes from instantaneous to daytime scales for thermal remote sensing applications. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 18, p. 1885-1894, 2014.

CARLSON, T. N.; RIPLEY, D. A. On the relationship between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. **Remote Sensing of Environment**, v. 62, n. 3, p. 241-252, 1997.

CARVALHO, D. F. de; ROCHA, H. S. da; BONOMO, R.; SOUZA, A. P. de. Estimativa da evapotranspiração de referência a partir de dados meteorológicos limitados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 1, p. 1-11, 2015.

CHÁVEZ, J. L.; NEALE, C. M. U.; PRUEGER, J. H.; KUSTAS, W. P. Daily evapotranspiration estimates from extrapolating instantaneous airborne remote sensing ET values. **Irrigation Science**, v. 27, p. 67-81, 2008.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. Acompanhamento da safra Brasileira de grãos – Safra 2017/18. CONAB, Brasília, v. 4, n. 2, p. 1-115, 2017. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/arquivos/ProjetoPivos.pdf>>. Acesso em: 08 de novembro, 2017.

CONSOLI, S.; VANELLA, D. Comparisons of satellite-based models for estimating evapotranspiration fluxes. **Journal of Hydrology**, v. 513, p. 475-489, 2014.

GEBREMICHAEL, M.; WANG, J.; SAMMIS, T. W. Dependence of remote sensing evapotranspiration algorithm on spatial resolution. **Atmospheric Research**, v. 96, p. 489-495, 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Levantamento sistemático da produção agrícola. IBGE, Rio de Janeiro, v. 30, n. 2, p. 1-83, 2017. Disponível em:<[ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao\\_Agricola/Levantamento\\_Sistematico\\_da\\_Producao\\_Agricola\\_\[mensal\]/Fasciculo/lspa\\_201709.pdf](ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistematico_da_Producao_Agricola_[mensal]/Fasciculo/lspa_201709.pdf)>. Acesso em: 10 de novembro, 2017.

LIMA, J. E. F. W. Situação e perspectivas sobre as águas do cerrado. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 63, n. 3, p. 27-29, 2011.

PEREZ, P. J.; CASTELLVI, F.; IBAÑEZ, M.; ROSELL, J. I. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 97, p. 141-150, 1999.

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**, v. 121, p. 1-18, 2013.

- SENAY, G. B.; BOHMS, S.; SINGH, R. K.; GOWDA, P. H.; VELPURI, N. M.; ALEMU, H.; VERDIN, J. P. Operational evapotranspiration mapping using remote sensing and weather datasets: a new parameterization for the SSEB approach. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 49, n. 3, p. 577-591, 2013.
- SENAY, G. B.; FRIEDRICHS, M.; SINGH, R. K.; VELPURI, N. M. Evaluating Landsat 8 evapotranspiration for water use mapping in the Colorado River basin. **Remote Sensing of Environment**, v. 185, p. 171-185, 2016.
- SENAY, G. B.; GOWDA, P. H.; BOHMS, S.; HOWELL, T. A.; FRIEDRICHS, M.; MAREK, T. H.; VERDIN, J. P. Evaluating the SSEBop approach for evapotranspiration mapping with landsat data using lysimetric observations in the semi-arid Texas High Plains. **Hydrology and Earth Systems Science**, v. 11, p. 723-756, 2014.
- SINGH, R. K.; SENAY, G. B. Comparison of four different energy balance models for estimating evapotranspiration in the Midwestern United States. **Water**, v. 8, n. 9, p. 1-19, 2016.
- SINGH, R. K.; SENAY, G. B.; VELPURI, N. M.; BOHMS, S.; SCOTT, R. L.; VERDIN, J. P. Actual evapotranspiration (water use) assessment of the Colorado river basin at the Landsat resolution using the Operational Simplified Surface Energy Balance model. **Remote Sensing**, v. 6, p. 233-256, 2014.
- SOBRINO, J. A.; JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C.; PAOLINI, L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. **Remote Sensing of Environment**, v. 90, p. 434-440, 2004.
- STONE, R.J. Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models. **Solar Energy**, v. 51, n. 4, p. 289-291, 1993.
- WILLMOTT, C. J.; ROBESON, S. M.; MATSUURA, K. Short communication: A refined index of model performance. **International Journal of Climatology**, v. 32, p. 2088-2094, 2012.
- ZHANG, B.; CHEN, H.; XU, D.; LI, F. Methods to estimate daily evapotranspiration from hourly evapotranspiration. **Biosystems Engineering**, v. 153, p. 129-139, 2017.