



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS
E GEODINÂMICA

BIANCA SOARES DO VALE

**COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS SEBAL E SSEB_{op} NA ESTIMATIVA DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DO TRIGO NO CERRADO**

Dissertação de Mestrado nº 189

Área de Concentração: Recursos Hídricos e Meio Ambiente

Brasília – DF

2021

BIANCA SOARES DO VALE

**COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS SEBAL E SSEB_{op} NA ESTIMATIVA DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DO TRIGO NO CERRADO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Geociências Aplicadas, área de concentração: Recursos Hídricos e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Henrique Llacer Roig

Brasília – DF

2021

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

<p>c</p> <p>VALE, BIANCA SOARES DO COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS SEBAL E SSEBop NA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DO TRIGO NO CERRADO / BIANCA SOARES DO VALE; orientador HENRIQUE LLACER ROIG. -- Brasília, 2021. 135 p.</p> <p>Dissertação (Mestrado - Mestrado em Geociências Aplicadas) -- Universidade de Brasília, 2021.</p> <p>1. Evapotranspiração. 2. Cerrado. 3. Trigo. 4. SEBAL. 5. SSEBop. I. LLACER ROIG, HENRIQUE, orient. II. Título.</p>

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

VALE, B. S. do. 2021. Comparação entre os modelos SEBAL e SSEBop na estimativa da evapotranspiração do trigo no Cerrado. 135p. Dissertação de Mestrado – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília – Distrito Federal.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Bianca Soares do Vale

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Comparação entre os modelos SEBAL e SSEBop na estimativa da evapotranspiração do trigo no Cerrado.

GRAU: Mestre

ANO: 2021

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva-se a outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Bianca Soares do Vale

biancavale01@gmail.com

BIANCA SOARES DO VALE

**COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS SEBAL E SSEB_{op} NA ESTIMATIVA DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DO TRIGO NO CERRADO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Geociências Aplicadas, área de concentração: Recursos Hídricos e Meio Ambiente.

2021

Prof. Dr. Henrique Llacer Roig (Orientador – IG/UnB)

Dr. André Luiz Farias de Souza (Avaliador Externo- SEMA-DF)

Prof. Dr. Gustavo Macedo de Mello Baptista (Avaliador Interno– IG/UnB)

A todos os estudantes com dificuldade de aprendizagem,
dedico.

AGRADECIMENTOS

Ao *cordeiro de Deus*, meu guia, agradeço a oportunidade de mais uma existência e pela capacitação que tens me dado para que eu permaneça evoluindo moralmente e espiritualmente.

Aos meus pais, Ana Lourdes e Paulo, por me conduzirem com belos valores morais. Especialmente a minha amada mãe, sou grata pelo amor e todo carinho que recebo em seus braços, bem como, pelo inesgotável incentivo empregue para que as minhas dificuldades cognitivas não me impedissem de buscar o conhecimento.

À minha irmã, Geovanna, que sempre será meu bebê, a partir de você pude compreender a grandeza do amor ao próximo.

Ao meu esposo, Lucas, por me fazer sentir tão amada. Agradeço por todo apoio, compreensão e paciência que manteve desde a minha graduação. Também sou grata por sua serenidade e doçura, que foram fundamentais para me equilibrar durante a jornada.

Aos meus sogros, Eliane e Eduardo e ao meu cunhado, Leonardo, por cuidarem tão bem de mim.

Aos meus pets, Mabel e Flock, que me fortaleceram com seu amor e por tornarem os meus dias muito mais felizes.

Ao meu grande amigo Eduardo, que com imensa gentileza compartilhou comigo todo seu conhecimento sobre o tema deste trabalho. Agradeço por ter me conectado a um projeto de pesquisa que certamente mudou meu destino.

À querida professora e amiga Marina, por utilizar a educação afetiva comigo e pelo acolhimento que foi fundamental para que eu não desistisse do sonho de ingressar no mestrado. Sou grata por tudo que pude aprender com a senhora e por toda orientação gentil durante cada etapa deste trabalho.

Ao meu querido orientador, Henrique Roig, mesmo sabendo das minhas limitações me acolheu e aceitou me orientar. Agradeço pela generosidade, paciência e principalmente pela compreensão e carinho que teve comigo quando eu estive doente.

Aos meus amigos da pós-graduação, especialmente minha querida Paulinha, Hikari, Gabriela e Mateus, sou grata pelo incentivo e por todo o auxílio. Sinto pela pandemia que impediu que eu passasse mais tempo ao lado de vocês.

Aos amigos, Édio, Leandro, Raphael e Diogo, por todo auxílio na coleta dos dados de campo.

Ao Instituto de Geociências, por me receber tão bem e por tornar possível meu tão sonhado mestrado. A todos os professores que contribuíram para o meu aprimoramento. Ao Mendes, pela companhia e gentileza de nos levar nas visitas de campo. À querida dona Fátima (*in memoriam*), pelas prazerosas conversas e pelo café tão gostoso que animava os meus dias.

Ao grupo SLC-Agrícola, por nos receber e pela oportunidade da área de estudo. Aos funcionários da Fazenda Pamplona, por todo apoio durante a pesquisa.

À Agência Nacional de Águas, pela parceria e disponibilização das estações micrometeorológicas.

À FAP-DF, por financiar um projeto de pesquisa intitulado “Estimativa e monitoramento do consumo de água pela agricultura irrigada por meio de imagens de sensoriamento remoto orbitais e Sistemas Aéreos Não Tripulados”, processo 0193.002050/2017, coordenado pela Profa. Dr. Marina Rolim Bilich Neumann. Agradeço ainda pela oportunidade que me abriu várias portas no campo do conhecimento.

À Universidade de Brasília, minha eterna admiração por sua excelência.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil (CAPES)- Código de Financiamento 001.

Ao Dr. André Luis Farias de Souza e ao Prof. Dr. Gustavo Baptista, pela contribuição.

“Pedi, e dar-se-vos-à; buscai, e achareis; batei, e abrir-se-vos-à. Pois todo o que pede recebe; e todo o que busca encontra; e a quem bate, abrir-se-lhe-à.”

MATEUS 7:7

COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS SEBAL E SSEBop NA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DO TRIGO NO CERRADO

RESUMO

A expansão das fronteiras agrícolas no Cerrado com o crescimento da área irrigada, intensificam os conflitos pelo uso da água, o que se torna ainda mais significativo em uma região que já enfrenta a escassez de recursos hídricos. Em bacias hidrográficas onde há predominância da agricultura irrigada, torna-se fundamental a compreensão da variação temporal e espacial da evapotranspiração real de uma cultura (ETR), para o mais assertivo gerenciamento dos recursos hídricos. Modelos que aplicam dados de sensoriamento remoto permitem o mapeamento da ETR com maior cobertura espacial. Diante do potencial produtivo do trigo de inverno no Cerrado, o presente estudo tem por objetivo estimar a demanda hídrica requerida pela cultura do trigo nos anos agrícolas de 2018 e 2019 por meio da aplicação dos algoritmos SEBAL e SSEBop. Os desempenhos dos modelos de sensoriamento remoto foram avaliados por comparação dos resultados com o método da razão de Bowen (RB). Em escala diária, o SEBAL foi capaz de representar 86% das variações da ETR com subestimativa de $-0,26 \text{ mm d}^{-1}$ e RMSE de $0,50 \text{ mm d}^{-1}$, ou 9,66%, apresentando um bom desempenho com coeficiente de eficiência (E) de 0,75. Em comparação com os dados de campo, o modelo SSEBop teve um desempenho ainda mais satisfatório, representando 95% da variabilidade da ETR em 2018, com subestimativa de $-0,05 \text{ mm d}^{-1}$ e RMSE de $0,25 \text{ mm d}^{-1}$ ou 4,76%, afirmando o bom desempenho com E de 0,93. Levando em consideração que o cultivo do trigo em 2018 sofreu maior influência do efeito advectivo do vento no campo, as lâminas de água acumuladas durante o ciclo pelo RB, SEBAL e SSEBop, foram de 467,15 mm, 451,56 mm, 461,72 mm, respectivamente. No ciclo da cultura do trigo em 2019, o modelo SEBAL teve um desempenho satisfatório com R^2 de 0,72, subestimando os dados de campo em $-0,15 \text{ mm d}^{-1}$, com RMSE de $0,42 \text{ mm d}^{-1}$ ou 10,55% e E de 0,68. O SSEBop manteve o bom desempenho representando 78% da variação da ETR em campo, com superestimativa de $0,16 \text{ mm d}^{-1}$, RMSE de $0,41 \text{ mm d}^{-1}$ ou 10,32% e E de 0,69. A demanda hídrica do trigo em 2019 pelo RB foi de 419,63 mm, o SEBAL acumulou 421,08 mm e o SSEBop 422,61 mm. Nos dois ciclos da cultura do trigo avaliados, ambos os modelos apresentaram desempenho satisfatório. Contudo, o modelo SSEBop foi capaz de melhor representar a variabilidade da ETR para a cultura do trigo em condições de cerrado, e considerando o menor grau de complexidade operacional, torna-se o modelo mais recomendado nas referidas condições.

Palavras-Chave: Evapotranspiração; Cerrado; Trigo; SEBAL; SSEBop.

COMPARISON BETWEEN SEBAL AND SSEBop MODELS IN THE ESTIMATE OF WHEAT EVAPOTRANSPIRATION IN THE CERRADO

ABSTRACT

The expansion of agricultural frontiers in the Cerrado associated to the growth of the irrigated area intensifies conflicts over the use of water, which becomes even more significant in a region that already faces a shortage of water resources. In hydrographic basins where irrigated agriculture predominates, it is essential to understand the temporal and spatial variation of the real evapotranspiration of a crop (ETR), for a more assertive management of water resources. Models that apply remote sensing data allow ETR mapping with a greater spatial coverage. Considering the productive potential of winter wheat in the Cerrado, this study aims to estimate the water demand required by the wheat crop in the agricultural years of 2018 and 2019 through the application of the SEBAL and SSEBop algorithms. The performances of the remote sensing models were evaluated by comparing the results with the Bowen ratio (RB) method. On a daily scale, SEBAL was able to represent 86% of the ETR variations with an underestimate of -0.26 mm d^{-1} and RMSE of 0.50 mm d^{-1} , or 9.66%, presenting a good performance with a coefficient efficiency (E) of 0.75. Compared to field data, the SSEBop model performed even more satisfactorily, representing 95% of the ETR variability in 2018, with an underestimate of -0.05 mm d^{-1} and RMSE of 0.25 mm d^{-1} or 4.76%, affirming the good performance with E of 0.93. Considering that the cultivation of wheat in 2018 was more influenced by the advective effect of the wind in the field, the water depths accumulated during the cycle by RB, SEBAL and SSEBop were 467.15 mm, 451.56 mm e 461.72 mm, respectively. In the 2019 wheat crop cycle, the SEBAL model had a satisfactory performance with R^2 of 0.72, underestimating the field data by -0.15 mm d^{-1} , with RMSE of 0.42 mm d^{-1} , or 10.55% and E of 0.68. The SSEBop maintained its good performance representing 78% of the ETR variation in the field, with an overestimation of 0.16 mm d^{-1} , RMSE of 0.41 mm d^{-1} or 10.32% and E of 0.69. The water demand of wheat in 2019 by the RB was 419.63 mm, the SEBAL accumulated 421.08 mm and the SSEBop 422.61 mm. In the two evaluated wheat crop cycles, both models presented satisfactory performance. However, the SSEBop model was able to better represent the ETR variability for the wheat crop under cerrado conditions, and considering the lower degree of operational complexity, it becomes the most recommended model under these conditions.

Keywords: Evapotranspiration; Cerrado; Wheat; SEBAL; SSEBop.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localização da área experimental.	43
Figura 2. Descrição dos pivôs centrais cultivados com a cultura do trigo avaliados na região de Cristalina (GO) nas safras de 2018 (P18) e 2019 (P19).	45
Figura 3. Fluxograma de trabalho desenvolvido para a determinação da evapotranspiração real por modelos de sensoriamento remoto.	51
Figura 4. Fases fenológicas do desenvolvimento da cultura do trigo.....	68
Figura 5. Variação média dos totais diurnos dos componentes do balanço de energia no ciclo de 2018 para a cultura do trigo na região de Cristalina (GO). RN - saldo de radiação; G- fluxo de calor no solo; LE- fluxo de calor latente; H- fluxo de calor sensível; DAP- dias após o plantio.	70
Figura 6. Variação média dos totais diurnos dos componentes do balanço de energia no ciclo de 2019 para a cultura do trigo na região de Cristalina (GO). RN- saldo de radiação; G- fluxo de calor no solo; LE- fluxo de calor latente; H- fluxo de calor sensível; DAP- dias após o plantio.	70
Figura 7. Variação diurna dos componentes do balanço de energia no dia 15/08/2018, aos 92 DAP, no estágio de grão leitoso da cultura do trigo na região de Cristalina (GO). RN - saldo de radiação; G- fluxo de calor no solo; LE- fluxo de calor latente; H- fluxo de calor sensível....	72
Figura 8. Variação diurna dos componentes do balanço de energia no dia 15/08/2019, aos 97 DAP, no estágio de grão leitoso da cultura do trigo na região de Cristalina (GO). RN - saldo de radiação; G- fluxo de calor no solo; LE- fluxo de calor latente; H- fluxo de calor sensível....	73
Figura 9. Distribuição da demanda e disponibilidade hídrica da cultura do trigo na região de Cristalina (GO) para o ciclo de 2018.....	74
Figura 10. Distribuição da demanda e disponibilidade hídrica da cultura do trigo na região de Cristalina (GO) para o ciclo de 2019.....	75
Figura 11. Distribuição temporal da ETR_{SEBAL} nos dias de passagem dos satélites com valores máximos, mínimos, médios e no pixel correspondente à estação micrometeorológica no pivô central do ciclo de 2018.....	77
Figura 12. Distribuição espacial da ETR_{SEBAL} para o ciclo de desenvolvimento da cultura do trigo no ano agrícola de 2018 na região de Cristalina (GO).....	77
Figura 13. Distribuição temporal da ETR_{SEBAL} nos dias de passagem dos satélites com valores máximos, mínimos, médios e no pixel correspondente à estação micrometeorológica no pivô central do ciclo de 2019.....	79
Figura 14. Distribuição espacial da ETR_{SEBAL} para o ciclo de desenvolvimento da cultura do trigo no ano agrícola de 2019 na região de Cristalina (GO).....	79
Figura 15. Correlação entre a ETR_{SEBAL} e a ETR_{RB} nas datas de passagem dos satélites para o ano agrícola de 2018 (a) e 2019 (b), no Intervalo de Confiança para a média e individual de 95 % a um nível de significância ($p < 0,05$).	82
Figura 16. Gráfico tipo box plot da ETR_{SEBAL} e ETR_{RB} durante a safra de 2018.	84
Figura 17. Gráfico tipo box plot da ETR_{SEBAL} e ETR_{RB} durante a safra de 2019.	84

Figura 18. Correlação entre a ETR_{SEBAL} e a ETR_{RB} extrapolada para estimativas diárias para o ano agrícola de 2018 (a) e 2019 (b), no Intervalo de Confiança para a média e individual de 95 % a um nível de significância ($p < 0,05$).....	86
Figura 19. Distribuição temporal da ETR_{SSEBop} nos dias de passagem dos satélites com valores máximos, mínimos, médios e no pixel correspondente à estação micrometeorológica no pivô central do ciclo de 2018.....	89
Figura 20. Distribuição espacial da ETR_{SSEBop} para o ciclo de desenvolvimento da cultura do trigo no ano agrícola de 2018 na região de Cristalina (GO).....	89
Figura 21. Distribuição temporal da ETR_{SSEBop} nos dias de passagem dos satélites com valores máximos, mínimos, médios e no pixel correspondente à estação micrometeorológica no pivô central do ciclo de 2019.....	91
Figura 22. Distribuição espacial da ETR_{SSEBop} para o ciclo de desenvolvimento da cultura do trigo no ano agrícola de 2019 na região de Cristalina (GO).....	91
Figura 23. Correlação entre a ETR_{SSEBop} e a ETR_{RB} nas datas de passagem dos satélites para o ano agrícola de 2018 (a) e 2019 (b), no Intervalo de Confiança para a média e individual de 95 % a um nível de significância ($p < 0,05$).....	94
Figura 24. Gráfico tipo box plot da ETR_{SSEBop} e ETR_{RB} durante a safra de 2018.	96
Figura 25. Gráfico tipo box plot da ETR_{SSEBop} e ETR_{RB} durante a safra de 2019.	97
Figura 26. Correlação entre a ETR_{SSEBop} e a ETR_{RB} extrapolada para estimativas diárias para o ano agrícola de 2018 (a) e 2019 (b), no Intervalo de Confiança para a média e individual de 95% a um nível de significância ($p < 0,05$).....	98
Figura 27. Distribuição da ETR_{RB} , ETR_{SEBAL} e ETR_{SSEBop} para a cultura do trigo avaliada durante a safra de 2018 na região de Cristalina (GO).	102
Figura 28. Distribuição da ETR_{RB} , ETR_{SEBAL} e ETR_{SSEBop} para a cultura do trigo avaliada durante a safra de 2019 na região de Cristalina (GO).	103
Figura 29. Correlação entre a ETR_{SEBAL} (a) e da ETR_{SSEBop} (b) com a ETR_{RB} em análise conjunta para as duas safras experimentais e a correlação entre a ETR_{SEBAL} e a ETR_{SSEBop} (c), no Intervalo de Confiança para a média e individual de 95 % a um nível de significância ($p < 0,05$).....	105
Figura 30. Distribuição espacial da ETR_{SEBAL} e da ETR_{SSEBop} para o ciclo de desenvolvimento da cultura do trigo nos estágios fenológicos da safra de 2018 estimados na região de Cristalina (GO).....	107
Figura 31. Distribuição espacial da ETR_{SEBAL} e da ETR_{SSEBop} para o ciclo de desenvolvimento da cultura do trigo nos estágios fenológicos da safra de 2019 estimados na região de Cristalina (GO).....	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Metodologias indiretas de estimativa da evapotranspiração.....	29
Tabela 2- Caracterização dos pivôs centrais estudados no ano de 2018 e 2019 na região de Cristalina-GO.	44
Tabela 3- Instrumentação utilizada nas estações micrometeorológicas instaladas nos pivôs de trigo, em Cristalina (GO).....	46
Tabela 4 - Especificação das bandas espectrais dos sensores ETM+ e TIRS.	48
Tabela 5. Percentual total de inconsistência verificado por análise dos filtros de Perez (1999).	69
Tabela 6. Indicadores da análise estatística de desempenho do modelo SEBAL nas datas de passagem dos satélites.	82
Tabela 7. Indicadores da análise estatística de desempenho do modelo SEBAL extrapolado para estimativa diária.....	86
Tabela 8. Demanda hídrica do trigo de inverno por meio da aplicação do modelo SEBAL verificada na literatura	87
Tabela 9. Indicadores da análise estatística de desempenho do modelo SSEBop nas datas de passagem dos satélites.	94
Tabela 10. Indicadores da análise estatística de desempenho do modelo SSEBop extrapolado para estimativa diária.....	98
Tabela 11. Demanda hídrica do trigo de inverno por meio da aplicação do modelo SSEBop verificada na literatura	99
Tabela 12- Valores máximo, mínimo e média dos modelos aplicados na safra de 2018.	100
Tabela 13- Valores máximo, mínimo e média dos modelos aplicados na safra de 2019.	102
Tabela 14. Indicadores da análise estatística de desempenho dos modelos SEBAL e SSEBop extrapolado para estimativa diária e conjunta das duas safras da cultura do trigo.....	105

LISTA DE ABREVIACOES

ANA	Agência Nacional de guas
BIAS	Erro médio
c	Fator de correção da imagem
Cp	Calor específico
DAP	Dias após o plantio
DN	Número digital
dT	Diferença predefinida entre as temperaturas de pixel quente e de pixel frio
E	Coefficiente de eficiência Nash e Sutcliffe
ea	Pressão real de vapor
es	Pressão de vapor do ar saturado
ET	Evapotranspiração
ETc	Evapotranspiração da cultura
ETf	Fração de evapotranspiração da superfície
ETh	Evapotranspiração real horária
ETo	Evapotranspiração de referência
Et _o F	Fração da evapotranspiração de referência
ETp	Evapotranspiração potencial
ETr	Evapotranspiração real
ETR _{RB}	Evapotranspiração real calculada pela razão de Bowen
ETR _{SEBAL}	Evapotranspiração real estimada pelo modelo SEBAL
ETR _{SSEBop}	Evapotranspiração real estimada pelo modelo SSEBop
G	Fluxo de calor no solo
H	Fluxo de calor sensível
IAF	ndice de área foliar
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
k	Coefficiente que expressa a máxima evapotranspiração da cultura em relação  evapotranspiração de referência (ET _o)
LE / λ ET	Fluxo de calor latente
L λ	Radiância espectral
METRIC	Mapping Evapotranspiration at High Resolution and Internalized Calibration
MODIS	Moderate resolution Imaging Spectroradiometer
mRB	Método da Razão de Bowen
NDVI	ndice de Vegetação de Diferença Normalizada
P	Pressão atmosférica
Pa	Densidade do ar

rah	Resistência aerodinâmica do ar à transferência de calor
RMSE	Raiz do erro médio quadrático
$R_{L\downarrow}$	Radiação de onda longa incidente
$R_{L\uparrow}$	Radiação de onda longa emitida
R_n	Saldo de radiação
$R_{s\downarrow}$	Radiação solar de ondas curtas incidente
R_{so}	Radiação solar em dias claros
SAFER	Simple Algorithm model For Evapotranspiration Retrieving
SAVI	Índice de Vegetação Ajustado ao Solo
SEBAL	Surface Energy Balance Algorithm for Land
SSEBop	Operational Simplified Surface Energy Balance
T	Temperatura
T_a	Temperatura do ar
T_c	Temperatura de superfície estimada para a condição de pixel frio
T_h	Temperatura de superfície estimada para a condição de pixel quente
T_{max}	Temperatura máxima do ar
T_s	Temperatura de superfície
u	Velocidade do vento
u^*	Velocidade de fricção do vento
UR	Umidade relativa do ar
USGS	United States Geological Survey
ϵ_a	Emissividade da atmosfera
ϵ_o	Emissividade de banda larga do infravermelho termal
z	Altitude local
Z_{om}	Coefficiente de rugosidade para o transporte de <i>momentum</i>
β	Razão de Bowen
γ	Constante Psicométrica
Δe_a	Diferença da pressão real de vapor
ΔT	Diferença de temperatura
λ	Calor latente de vaporização da água
σ	Constante de Stefan-Boltzman
τ_{sw}	Transmissividade atmosférica

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. REVISÃO DE LITERATURA	21
2.1 Evapotranspiração.....	21
2.2 Metodologias para estimativa da evapotranspiração	24
2.2.1 Determinação direta da evapotranspiração	24
2.2.2 Determinação indireta da evapotranspiração	25
2.3 Sensoriamento remoto aplicado à modelagem da evapotranspiração	30
2.4 Cultivo e demanda hídrica do trigo irrigado no Cerrado	40
3. MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1 Materiais	42
3.1.1 Área de estudo	42
3.1.2 Especificações do experimento.....	43
3.1.3 Informações requeridas pelos modelos de sensoriamento remoto.....	47
3.1.4 Avaliação de desempenho dos modelos de sensoriamento remoto	49
3.2 Métodos	50
3.2.1 Balanço de energia e evapotranspiração real pelo método da razão de Bowen.....	51
3.2.2 Base de entrada meteorológica	53
3.2.3 Base de entrada de sensoriamento remoto	55
3.2.4 Modelo SEBAL	58
3.2.5 Modelo SSEBop	63
3.2.6 Análise estatística dos modelos SEBAL e SSEBop	65
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
4.1 Balanço de energia e evapotranspiração pelo método da razão de Bowen.....	67
4.2 Aplicação do modelo SEBAL para estimativa da evapotranspiração real da cultura do trigo em condições de cerrado	76
4.2.1 Análise de desempenho do modelo SEBAL.....	81
4.2.2 Demanda hídrica do trigo durante o período experimental estimada pelo modelo SEBAL.....	83

4.3 Aplicação do modelo SSEBop para estimativa da evapotranspiração real da cultura do trigo em condições de cerrado	88
4.3.1 Análise de desempenho do modelo SSEBop	93
4.3.2 Demanda hídrica do trigo durante o período experimental estimada pelo modelo SSEBop	96
4.4 Avaliação comparativa das estimativas da evapotranspiração real da cultura do trigo por meio dos modelos SEBAL e SSEBop.	100
5. CONCLUSÕES	112
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114

1. INTRODUÇÃO

A insuficiência de recursos hídricos é uma adversidade que afeta mais de 40% da população mundial e pode ser majorada por práticas agrícolas insustentáveis (FAO; WWC, 2015). A agricultura é responsável por abastecer, com segurança alimentar, toda a demanda mundial por alimentos e com essa finalidade, o setor utiliza quase 70% da água doce disponível (FAO, 2017). De acordo com o projeto MapBiomas (2021), a dinâmica das áreas agrícolas, pecuária e represas, estão contribuindo para a redução do fluxo de água no território nacional. O estudo indica ainda que, a retração da superfície coberta com água no Brasil foi de 15,7%, contabilizado desde o início dos anos 90.

Do ponto de vista da viabilidade econômica de produção, a intensificação da atividade agrícola no Cerrado decorreu da expansão de áreas irrigadas. Esse bioma é responsável por quase 50% da produção nacional de cereais (IBGE, 2019). O trigo (*Triticum aestivum L.*) é um dos cereais básicos mais consumidos no mundo, sendo cultivado em diferentes condições climáticas, exigindo trabalhos de pesquisa intensos para melhor adaptar a cultura ao ambiente de cultivo pretendido (KLAR; DENADAI, 1996; FUMIS et al., 1997). Segundo as informações do IBGE (2019), considerando apenas a terra cultivável com a cultura do trigo, na região centro-oeste, entre 2018 e 2019 houve um aumento de 37,7% da área plantada.

A cultura do trigo apresenta boa resposta ao incremento tecnológico, com produtividade satisfatória quando há bom suprimento hídrico durante o ciclo, que pode ser três vezes maior que o cultivo sequeiro (OLIVEIRA NETO; SANTOS, 2017). A produção do trigo de inverno no Cerrado ainda é beneficiada pela época de colheita ser realizada antes da região tradicional do Sul do Brasil (PASINATO et al., 2018; SOUZA; VIEIRA FILHO, 2020). Apesar do cerrado não ser considerado uma região tradicional no cultivo do trigo, o potencial expansivo de produção desse cereal se tornou evidente, considerando que o rendimento médio na região, em termos de produtividade já é o maior do país (CARGNIN et al., 2009; FARIAS et al., 2016).

O regime de precipitação sazonal no Cerrado tem no inverno uma estação extremamente seca, o que torna obrigatória a aplicação de lâminas de água por meio da irrigação na agricultura de inverno (GUERRA et al., 2003). A expansão das fronteiras agrícolas com o crescimento da área irrigada, intensificam os conflitos pelo uso da água, o que se torna ainda mais significativo em uma região que já enfrenta a escassez de recursos hídricos (SPERA et al., 2016; FISHER et al., 2016; ANA, 2013). O Cerrado possui grande importância no fornecimento hídrico de

diversas regiões, por abranger algumas das principais bacias hidrográficas do Brasil (LIMA; SILVA, 2007).

Uma parte significativa da água disponível nas frações do solo é reduzida pela transferência de água para a atmosfera por meio da vegetação. As espécies cultivadas transpiram e junto com a evaporação da água do solo, caracterizam o fenômeno da evapotranspiração (ET). Por meio da ET, aproximadamente 70% do total precipitado retorna à atmosfera, desempenhando um importante papel como regulador do balanço hídrico (VICTORIA, 2004; KITE; DROOGERS, 2000; SHUKLA; MINTZ, 1982). A compreensão da variação temporal e espacial da evapotranspiração é fundamental para atividades relacionadas à gestão das bacias hidrográficas, bem como, no manejo hídrico das culturas irrigadas (GHARBIA et al., 2018; VELOSO et al., 2017; SWENSON; WAHR, 2006).

A demanda hídrica de uma cultura pode ser estimada mediante análise do balanço de energia na superfície, determinando a quantidade de energia disponível para que ocorra processos como a evaporação da água e aquecimento do ar e do solo (PAYERO et al., 2003). Usualmente, o método do balanço de energia pela razão de Bowen (BOWEN, 1926) é aplicado para obtenção da partição da energia na superfície entre o fluxo de calor sensível (H) e calor latente (PEREZ et al., 2008). Dada a combinação da razão de Bowen (β) com a radiação solar líquida (RN) e com o fluxo de calor no solo (G), é possível determinar o fluxo de calor latente (LE) necessário para que ocorra a evapotranspiração de uma superfície vegetada (BIUDES et al., 2008).

O método da razão de Bowen é relativamente simples, pois descarta em sua metodologia a necessidade de informações aerodinâmicas da superfície e permite a estimativa de fluxos em escala horária com medições contínuas (TODD et al., 2000). Além disso, sua significativa precisão torna o método referência para calibração e validação de outros modelos que estimam a evapotranspiração real de uma cultura (TEIXEIRA, 2010; HU et al., 2014) e, tem apresentado resultados adequados quando confrontados com medidas diretas (PAUWELS; SAMSON, 2006; SILVA et al., 2005). Contudo, trata-se de um método oneroso e as estimativas geradas pela razão de Bowen são pontuais, o que não permite a extrapolação espacial da evapotranspiração em escala regional (BASTIAANSEN et al., 1998; KITE; DROOGERS, 2000; SCHUURMANS et al., 2003).

A avaliação das interações, que ocorre entre a superfície e a atmosfera e as possíveis mudanças hidrológicas podem ser feitas com a utilização de técnicas de sensoriamento remoto com maior cobertura espacial. Ao utilizar imagens multiespectrais é possível determinar a

evapotranspiração como resíduo do cálculo do balanço de energia. Para avaliar as variações espaço-temporal e os padrões da evapotranspiração, muitos modelos foram propostos e abrangem desde a escala regional à global (KALMA et al., 2008; BIGGS et al., 2016; MCSHANE et al., 2017).

A comparação entre diferentes modelos baseados em dados de sensoriamento remoto auxilia usuários e pesquisadores a compreender as vantagens e limitações de cada método, bem como, perceber algumas incertezas geradas por parâmetros do modelo e o impacto causado nos valores finais de evapotranspiração (BHATTARAI et al., 2016). Dado que os modelos requerem diferentes dados de entrada, seu desempenho pode ainda ser influenciado pela qualidade e precisão das informações utilizadas. Além disso, o grau de complexidade operacional entre os modelos disponíveis tende a afetar a facilidade da configuração para a calibração e eficiência da metodologia (SINGH; SENAY, 2016; LOSGEDARAGH; RAHIMZADEGAN, 2018).

Conforme informações na literatura, os modelos podem ter de forma geral um desempenho satisfatório (SCHERER-WARREN, 2012; ZHOU et al., 2014; CARRILLO-ROJAS et al., 2016; BALA et al., 2017; YIN et al., 2020). Contudo, há diferenças consideráveis no registro da variabilidade temporal e espacial da evapotranspiração sob condições climáticas adversas (ALLEN et al., 2002).

Neste trabalho, procurou-se avaliar dois modelos de fonte única, SEBAL e SSEBop, ambos fundamentados na temperatura da superfície e no princípio do balanço de energia, mas que possuem grau de complexidade operacional distintas.

Os modelos que aqui foram avaliados, estimam a evapotranspiração real (ETR) pela solução completa ou parcial do balanço de energia. Considera-se então que a energia consumida pela evapotranspiração (LE) é obtida como diferença residual entre o saldo de radiação líquida disponível (RN), subtraído da energia aplicada no aquecimento do ar (H) e da energia que é armazenada no solo e transferida para a vegetação (G). Assumem ainda uma relação linear entre a diferença de temperatura do ar da superfície e próxima à superfície (dT). Essa relação é estabelecida por meio da seleção de condições extremas, que podem ser observadas nas imagens adquiridas remotamente por sensores orbitais. A condição do pixel mais quente da cena deve representar uma superfície de solo exposto e seco, enquanto o pixel frio deve ser extraído de uma superfície em pleno desenvolvimento vegetativo e com bom suprimento hídrico. Conforme essa premissa, no pixel quente não haverá fluxo de calor latente, e no pixel frio LE atingirá seu valor máximo (BASTIAANSEN et al., 1998; ALLEN et al., 2002; SENAY et al., 2013).

O SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*), é um dos modelos mais completos para avaliação de fluxos de calor na superfície. Pode ser utilizado em imagens digitais para qualquer sensor orbital que realize medições de radiância no espectro visível, infravermelho próximo e infravermelho termal (MACHADO et al., 2014). O SEBAL é um modelo que possui maior complexidade operacional, pois assume a relação linear da dT ancorado em seleção específica dos pixels extremos para calibração interna, de modo que possa resolver completamente as etapas do balanço de energia, ao equilibrar o saldo de radiação de ondas curtas e longas pelo fluxo de aquecimento da superfície e das mudanças de fase da água (MCSHANE et al., 2017). Amplamente aplicado, a precisão do modelo na representatividade das variações da evapotranspiração é de 85% em escala diária, e sua eficiência pode ser aumentada para 95% se a avaliação for sazonal (BASTIAANSEN et al., 2005).

O SSEBop (*Operational Simplified Surface Energy Balance*), é um modelo de concepção mais recente e que aplica uma parametrização mais simplificada. Inova ao remover a subjetividade na seleção dos pixels âncoras, pois aplica condições de contorno fundamentadas no balanço de energia, mas sem resolvê-lo completamente. Sendo que a dT entre os pixels de referência será predefinida para que nos demais pixels da cena, a ETR possa variar proporcionalmente à temperatura da superfície e à dT estabelecida (SENAV et al., 2013). O modelo foi aplicado em condições de cerrado na cultura da soja e do feijão e de acordo com Paula et al. (2019), o modelo apresentou resultados satisfatórios com R^2 de 0,94. Lopes et al. (2019), relataram R^2 de 0,82 para a cultura do trigo.

A variação no desempenho dos modelos e as incertezas sobre a escolha da metodologia mais adequada para representar as diversas condições climáticas, impulsionam novos estudos de comparação entre modelos (SINGH; SENAY, 2016; LOSGEDARAGH; RAHIMZADEGAN, 2018). Especialmente no Cerrado, a expansão da fronteira agrícola com mudanças na cobertura e uso do solo tendem a impactar de forma negativa a disponibilidade hídrica. Além disso, as mudanças na cobertura terrestre alteram o balanço de energia na superfície, já que as florestas tropicais desempenham um papel fundamental na transição da estação seca para a chuvosa. Portanto, essas variações energéticas podem tornar a estação seca mais prolongada, com consequências ambientais mais severas (LAIPELT et al., 2020).

A presente oportunidade de pesquisa no bioma Cerrado seguiu-se por colaboração, iniciada com o projeto intitulado “Estimativa e monitoramento do consumo de água pela agricultura irrigada por meio de imagens de sensoriamento remoto orbitais e Sistemas Aéreos Não Tripulados”, financiado pela Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAP-DF),

em parceria com a Agência Nacional de Águas (ANA) e com o grupo SLC- Agrícola. O banco de dados brutos do projeto dispõe de informações micrometeorológicas para a cultura do trigo, coletadas em campo nos anos agrícolas de 2018 e 2019. Pretendia-se inicialmente agrupar ao banco de dados informações referentes ao ciclo do trigo na safra seguinte de 2020. Contudo, a sequência não pôde ser retomada por questão de segurança sanitária, devido ao risco de contaminação durante a pandemia. Portanto, o período de avaliação foi realizado durante o cultivo do trigo nos anos agrícolas de 2018 e 2019.

Frente ao potencial expansivo e produtivo da cultura do trigo no Cerrado, o presente estudo tem por objetivo avaliar o comportamento dos componentes do balanço de energia, bem como, a demanda hídrica da cultura do trigo de inverno, a fim de gerar informações pertinentes que possam ser aplicadas na gestão e no planejamento dos recursos hídricos. Para alcançar tais objetivos foram aplicadas as seguintes etapas:

- Avaliação do comportamento do balanço de energia no Cerrado e determinação da demanda hídrica do trigo pelo método da razão de Bowen.
- Determinação da demanda hídrica da cultura do trigo por meio do modelo SEBAL.
- Determinação da demanda hídrica da cultura do trigo por meio do modelo SSEBop.
- Avaliação de desempenho dos modelos SEBAL e SSEBop em comparação com o método da razão de Bowen.
- Seleção do modelo mais adequado para representar a variabilidade da evapotranspiração do trigo de inverno no Cerrado.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Evapotranspiração

A evapotranspiração (ET) ocorre em combinação dos processos de transferência de água para a atmosfera, da superfície do solo, por evaporação (E), e da vegetação por transpiração (T) (THORNTHWAITE & WILM, 1944; BERLATO & MOLION, 1981; ALLEN et al., 1998). No processo de evaporação, as moléculas de água em estado líquido apresentam uma força de coesão maior que no estado gasoso. De acordo com a teoria dos gases, a transformação para o estado gasoso exige a provisão de energia externa, de forma que aumente a energia cinética das moléculas de água. Na ET, essa energia externa é fornecida pela radiação solar. O calor latente da evaporação expressa a porção de energia necessária para evaporar a massa de água, estando a mesma temperatura (BERLATO & MOLION, 1981; COLLISCHONN & TASSI, 2008).

O ar atmosférico é composto por uma mistura de gases, e entre eles está presente a água. A concentração de saturação representa a quantidade de vapor de água contida na atmosfera, variando conforme a temperatura do ar. Em condições de saturação do ar, o fluxo evaporativo se encerra, ainda que seja fornecida radiação solar para evaporação. Dessa forma, a umidade relativa (UR) representa a quantidade de vapor de água no ar em relação ao conteúdo de vapor em condições de ar saturado (ALLEN et al., 1998).

A transpiração é um processo de evaporação da água, que fica contida nos tecidos das plantas, utilizada nos diversos processos metabólicos fundamentais para o seu desenvolvimento. A liberação do vapor de água dos tecidos vegetais para a atmosfera é controlada por estruturas celulares nomeadas de estômatos, que estão presentes principalmente nas folhas. É importante que a transpiração ocorra, pois evita-se que as folhas sofram superaquecimento, pois parte da energia absorvida é utilizada na evaporação (GATES, 1968; SMITH & GELLER, 1979; ALLEN et al., 1998).

Embora a transpiração apresente certa similaridade física com o processo de evaporação, elas ainda se diferem, pois a abertura estomática depende, entre outros fatores, da umidade do solo. Na ocorrência de estresse hídrico, que pode ser iniciado pela falta de água no solo ou quando a transpiração é superior à demanda atmosférica, os estômatos se fecham, diminuindo as trocas gasosas e a vaporização da água. Na situação de solo úmido e estômatos abertos, a taxa de transpiração é influenciada pelos mesmos fatores da evaporação (BENGTSON et al., 2006; SVENNINGSSON & LILJENBERG, 2006; STOWE et al., 2011).

Sendo assim, os elementos climáticos que exercem influência e devem ser considerados ao avaliar o processo de evapotranspiração são: a radiação solar, a temperatura, a umidade do ar e a velocidade do vento. Além das variáveis meteorológicas outros fatores também devem ser avaliados, tais como: teor de umidade do solo, grau de cobertura vegetal, salinidade e características da vegetação (ALLEN et al., 1998; DARSHANA et al., 2013; PETKOVIC et al., 2015). Em geral, quanto maior a disponibilidade de energia solar, velocidade do vento, temperatura do ar mais elevada e menor teor de umidade relativa, maior será a demanda de evaporação para a atmosfera, e conseqüentemente ocorrerá aumento na taxa de evapotranspiração, desde que não haja restrição hídrica (TAGLIAFERRE et al., 2015).

A radiação solar absorvida pela superfície terrestre contribui para seu aquecimento, emitindo radiação na forma de ondas longas. Tal aquecimento da superfície esquentas as parcelas de ar, gerando um fluxo de calor sensível na forma de ar quente e um fluxo de calor latente, aumentando o poder evaporativo, exercendo então uma função importante na evapotranspiração. Essa relevância implica em uma precisão maior nas medidas de radiação solar (ALLEN et al., 1998; LEMOS FILHO et al., 2010).

Quanto à temperatura, se aumentada exponencialmente, a capacidade de armazenamento de vapor de água na atmosfera também se amplia. A umidade do ar exerce uma relação inversa à evaporação, onde não ocorre evaporação em situação de atmosfera saturada de vapor de água. Já o vento, com sua turbulência, acelera a difusão do vapor de água, pois retira a umidade adjacente à superfície e dessa forma evita que o ar sature (GATES, 1968; ALLEN et al., 1998; DARSHANA et al., 2013; PETKOVIC et al., 2015).

Além das variáveis meteorológicas e do solo, particularidades de cada cultura também desempenham funções importantes na dinâmica da ET (TANNY, 2013). Conforme o tipo de cultura, desenvolvimento fenológico, variedade, densidade de plantio, rugosidade do dossel e cobertura do solo, as plantas apresentarão diferentes resistências à transpiração e, assim, alterando a evapotranspiração das culturas. A dinâmica da ET pode ainda ser influenciada por fatores climáticos e biológicos que tendem a limitar o crescimento da cultura, reduzindo a taxa da ET (ALLEN et al., 1998).

A evapotranspiração é medida na mesma unidade da precipitação de chuva, em milímetros (mm), empregando-se a altura da lâmina de água. Considera-se que um milímetro de ET é equivalente à um litro de água transferida para a atmosfera, para cada metro quadrado em projeção horizontal da superfície (FERNANDES et al., 2010). A literatura aponta quatro tipos de evapotranspiração: de referência, potencial, real e da cultura.

A evapotranspiração de referência (ET_o) pode ser definida como a demanda máxima evaporativa de uma superfície uniforme, coberta com uma cultura de referência, com altura de 12 cm, coeficiente de reflexão de 0,23 e resistência superficial de 70 s m⁻¹. Nesse caso, a cultura de referência é a grama em condições de crescimento ativo e sem restrições hídricas. A ET_o independe do tipo de cultura, fase de desenvolvimento e práticas de manejo, sendo influenciada exclusivamente por elementos climáticos (DOORENBOS; PRUITT, 1977; SMITH, 1991; ALLEN et al., 1998).

O conceito de evapotranspiração potencial (ETP) determina que a quantidade de água é transpirada por uma vegetação rasteira com cobertura total do solo, altura uniforme, sem limitação das condições hídricas, com aplicação de práticas de manejo (TANNER; PELTON, 1960). Contudo, para esse conceito, existem diversos tipos de cultura que se encaixam na definição de vegetação verde e rasteira. Portanto, o termo ETP foi substituído por “evapotranspiração potencial de referência”, no qual as propriedades de superfície vegetadas foram então padronizadas (KATERJI & RANA, 2011; XYSTRAKIS & MATZARAKIS, 2011). Para estimativa da ETP, utiliza-se dados meteorológicos em circunstância não potencial, quando a umidade do solo não atinge a capacidade de campo (ALLEN, 2006).

A evapotranspiração real (ETR) é definida pela quantidade de água evaporada e transpirada para a atmosfera em situações reais dos fatores atmosféricos e de umidade do solo (MATZENAUER, 1992). Segundo Allen et al. (1998), a ETR é definida em condições sem padronização de crescimento e da cultura, diferente das condições potenciais e em que seu desenvolvimento pode ser afetado. Para Camargo & Camargo (2000), o conceito de ETR refere-se à perda de água de uma superfície natural, com qualquer cobertura vegetal e diferentes condições de umidade. No cálculo da ETR, as variáveis como escoamento, percolação, infiltração e armazenamento permitem sua estimativa (TUCCI, 2007).

A evapotranspiração de uma cultura (ETC) pode ser estimada a partir da ET_o, aplicada em conjunto às necessidades hídricas das culturas, representada pelo coeficiente de cultivo (K_c). Sendo definida como a transferência de vapor de água para atmosfera, na ausência de doenças e pragas, em boas condições de solo, umidade e fertilidade. Dessa forma, a ETC depende das variáveis meteorológicas e das características das culturas (DOORENBOS; PRUITT, 1984; ALLEN et al., 1998). Lewis & Allen (2017) conceituam a ETC como demanda potencial de água pela cultura que seria evaporada do solo e transpirada pela vegetação, considerando que a mesma não sofra restrições hídricas.

A correta estimativa da evapotranspiração pode ser utilizada para o conhecimento da quantidade real de água a ser aplicada ao solo, permitindo um bom manejo e monitoramento da irrigação (SALGADO, 2001). Mensurar a ET ajuda a compreender a dinâmica do ciclo hidrológico, especialmente em sistemas irrigados, colaborando para uma gestão eficiente dos recursos hídricos (MARTÍ et al., 2015). Segundo Payero & Irmak (2013) a determinação das necessidades hídricas da cultura auxilia o produtor a tomar decisões precisas sobre a quantidade e o período de irrigação, garantindo produtividades mais elevadas.

2.2 Metodologias para estimativa da evapotranspiração

De acordo com a literatura, pode-se determinar a ET por meio de métodos diretos e indiretos. Dos métodos diretos, são utilizados os lisímetros, com base no balanço hídrico do solo. Já os métodos indiretos, combinam diferentes elementos climáticos e podem ser agrupados em cinco categorias, sendo: empíricos, aerodinâmico, balanço de energia, combinados e correlações dos turbilhões (BERNADO et al., 1996; XYSTRAKIS; MATZARAKIS, 2011).

Devido às condições diversas de climatologia e cobertura vegetal, é improvável que seja desenvolvida uma metodologia que possa ser aplicada indistintamente. Uma vez que, a dificuldade de padronização dos modelos está relacionada à interdependência dos fatores atmosféricos, que possuem variabilidade temporal e espacial das condições climáticas. Além disso, nem sempre os dados meteorológicos, fundamentais para aplicação dos métodos, estão disponíveis ou apresentam um bom nível de confiabilidade (ROJAS; SHEFFIELD, 2013).

Dessa forma, torna-se fundamental o conhecimento acerca da disponibilidade de informações dos elementos climáticos, para que se possa verificar quais são os métodos que podem ser aplicados, visto que os diversos modelos necessitam de ajustes para as condições locais, e a não correção implicaria em sub ou superestimativas, dependendo da época do ano (MENDONÇA et al., 2003).

2.2.1 Determinação direta da evapotranspiração

Considerando os métodos em que a evapotranspiração pode ser estimada a partir de medidas diretas, podemos destacar: os lisímetros, o balanço hídrico e o controle de umidade do solo (BURMAN et al., 1983). Dentre esses métodos, encontramos nas medidas lisimétricas

maior confiabilidade na obtenção de dados de ET, pois esta metodologia representa o balanço de água na superfície, o que permite flexibilidade de calibração e validação de outros modelos aplicados para estimativa da ET (SENTELHAS, 2001; MACHADO; MATTOS, 2001; WANG; DICKINSON, 2012).

De acordo com Aboukhaled et al. (1982), os lisímetros podem ser de pesagem ou volumétricos. Os autores destacam que os lisímetros de pesagem possuem maior precisão, porém, apresentam custos elevados de implementação, o que geralmente restringe o método a instituições de pesquisa, e quase sempre são utilizados para aferição de outros métodos mais viáveis. Para Fietz et al. (2005), a obtenção de dados de ET por meio de lisímetros possibilita um planejamento mais confiável da agricultura irrigada, o que permite o uso de forma racional desse recurso. Entretanto, exige uma estrutura física mais onerosa. Essa desvantagem, segundo Schneider et al. (1998), limita a aplicação do método pelo alto custo de mão-de-obra na construção e operação do tanque, além dos equipamentos e materiais utilizados.

Por se tratar de uma estimativa direta com precisão elevada, é importante que as operações e os equipamentos sejam mais simplificados, a fim de viabilizar sua aplicação com baixo custo de construção (MENDONÇA et al., 2003; SILVA et al., 2005; SANTOS et al., 2008).

Ainda sobre as medidas diretas utilizadas para determinar a ET, podemos citar o método do balanço hídrico. Esse método foi desenvolvido por Thornthwaite & Mather (1955), criado para determinar o regime hídrico de uma região, mesmo sem medidas diretas das condições de solo. Conforme Reichardt (1985), a metodologia do balanço hídrico é satisfatória na estimativa da evapotranspiração de culturas, pois afere as entradas e saídas de água no sistema, indicando a umidade volumétrica que permanece no solo. O método utiliza o princípio geral de conservação de massa, para contabilizar a precipitação, a irrigação, o escoamento superficial, drenagem profunda, ascensão capilar, a evapotranspiração e a variação no armazenamento.

2.2.2 Determinação indireta da evapotranspiração

A aplicação de métodos indiretos para cálculo da evapotranspiração envolve: equações empíricas que combinam diferentes elementos climáticos, fórmulas baseadas em princípios físico-fisiológico, bem como, utilização de instrumentos que quantificam a evaporação da água (STONE; SILVEIRA, 1995). Diversas metodologias foram elaboradas na tentativa de alcançar um método que melhor se ajuste às diferentes condições climáticas e atmosféricas de cada

região, justificando as divergências nas estimativas de cada método. Recomenda-se que sejam feitos estudos regionais, sazonais e sobre a disponibilidade de dados meteorológicos, para identificar o método mais adequado às condições locais (ALBLEWI et al., 2015; HALLAL et al., 2017).

Os evaporímetros são instrumentos de medição da evaporação da água que possibilitam medições diretas do poder evaporativo da atmosfera. O modelo mais difundido e aplicado é o tanque Classe A, composto por um tanque metálico com dimensões padronizadas, estando sujeito aos efeitos da radiação solar, vento, temperatura e umidade (TUCCI, 2004). A partir da medida de evaporação do tanque, é possível multiplicá-la pelo coeficiente do tanque (K_p), com valores tabelados que consideram o clima e o meio circundante ao tanque e, assim, estima-se a evapotranspiração (PEREIRA et al., 1997; ALLEN et al., 1998).

As equações empíricas são resultado de correlações entre medidas de ET, em condições padronizadas, e elementos meteorológicos. Em geral, essas equações são apropriadas para determinadas condições climáticas ou regiões específicas (GAVILÁN et al., 2006; FOOLADMAND; AHMADI, 2009). Existem na literatura mais de 50 modelos matemáticos utilizados para estimativa da ET, com distintos graus de complexidade de aplicação e requerimento de dados (MCMAHON et al., 2013). Dentre os diversos métodos já elaborados, podemos destacar os métodos de: Thornthwaite, Monteith, Radiação Solar, Hargreaves-Samani, Blaney-Cridle, Penman-Monteith e Balanço de energia.

O método de Thornthwaite foi proposto para estimativa da ET para períodos mensais, tendo como cultura de referência a grama. O conjunto das equações foi fundamentada no balanço hídrico de bacias hidrográficas e medidas de ET estimadas por lisímetros. A única variável independente aplicada nas equações é a temperatura (THORNTHWAITE, 1948). Alguns trabalhos evidenciam a cautela que deve ser tomada ao utilizar esse método, especialmente em climas de verões úmidos e invernos secos, por não adotar inúmeros parâmetros essenciais ao processo de evapotranspiração, além de subestimá-la com frequência em regiões áridas (CAMARGO; CAMARGO, 2000; TUCCI, 2004). Para melhorar o desempenho do método, Camargo et al. (1999) sugeriram a utilização da temperatura efetiva, que tem variações conforme a amplitude térmica diária, representando o termo aerodinâmico como correção da equação original, dando origem ao método de Thornthwaite modificado.

Hargreaves (1974) propôs em sua primeira equação para determinar a ET a aplicação de dados de latitude, temperatura média mensal e umidade relativa, baseando-se em informações obtidas por evapotranspirômetros em áreas cobertas com grama. Em 1976, o

mesmo autor simplificou sua equação desconsiderando a umidade relativa e inserindo a radiação global (HARGREAVES, 1976). Posteriormente, Hargreaves & Samani (1985) propuseram uma equação que aplicava dados de temperatura mínima, máxima e média. De acordo com Allen et al. (1998) esse modelo é uma boa alternativa para estimar a ET em condições que há poucos parâmetros climáticos disponíveis.

A metodologia de Blaney-Criddle foi desenvolvida na região semiárida dos Estados Unidos. Como se trata de um método embasado em dados de temperatura, sua aplicação é mais simples, visto que demanda poucas variáveis de entrada (BLANEY; CRIDDLE, 1950). De acordo com Doorenbos & Pruitt (1984), se inserido um fator de correção, esse método pode ser aplicado em diferentes condições climáticas. Dados de umidade, velocidade do vento e insolação são utilizados para determinar o fator de correção. Os autores afirmam que o método não deve ser utilizado em regiões que a temperatura se mantenha estável, a exemplo de regiões equatoriais ou de altitudes elevadas, devido às baixas temperaturas médias mesmo em níveis altos de radiação solar.

Também conhecido como método FAO-24 da radiação, o método da Radiação Solar é uma adaptação para o modelo de Makkink e o de Blaney-Criddle, onde foi feita uma substituição dos coeficientes a e b, tabelados conforme a escala de estimativa e que são variáveis de acordo com o local, pelo coeficiente c que se trata de uma função da umidade relativa e da velocidade do vento. Com a equação simplificada, o coeficiente c passa a representar a inclinação da reta de regressão (DOORENBOS; PRUITT, 1977; DOORENBOS; PRUITT, 1984; DOORENBOS; KASSAM, 1994). No propósito de evitar que houvesse interpolações em nomogramas e quadros, bem como facilitar a automatização dos cálculos. Freverte et al. (1983), propuseram um sistema de equações múltiplas, tornando a equação original independentemente do local avaliado, sendo possível um ajuste em cada condição de contorno. Essa proposta tornou o método mais refinado e possível de aplicação em todas as escalas.

O método de Penman (1948) combina os elementos do balanço de energia e assume proporção entre a evaporação da água com a evapotranspiração da grama, em condições sub-irrigada. Pereira et al. (1997) afirmam que o método é fundamentado em princípios físicos corretos. Para Tucci & Beltrame (2000), é a melhor opção para estimativa da ET. O método apresenta boa precisão, contudo, a necessidade de um amplo conjunto de parâmetros climáticos, que nem sempre estão disponíveis, dificultam sua aplicação, fato que estimulou outros pesquisadores a simplificar e aperfeiçoar o método de Penman (MONTEITH, 1965; DOORENBOS; PRUITT, 1977; BERNARDO, 2002).

Monteith (1981) introduziu, na equação original de Penman, as funções de resistência aerodinâmica e do dossel vegetal. Tal modificação deu origem ao método de Penman-Monteith, divulgado pela FAO (*Food and Agriculture Organization*) das Nações Unidas, como o método padrão para determinação da ET em escala diária, é universalmente conhecido por Penman-Monteith FAO-56 (ALLEN et al., 1998; ALLEN et al., 2006). Foi escolhido como padrão pela FAO devido à proximidade da ET do padrão da grama nas regiões avaliadas e pela superioridade em relação aos outros métodos (CAI et al., 2007; GAVILAN et al., 2007; XING et al., 2008). Sua aplicação em diversas condições agrometeorológicas apresentam resultados considerados robustos e precisos, mas com performances variáveis, uma vez que exibe empirismo em sua concepção (SENTELHAS et al., 2010; RÁCZ et al., 2013). Embora sua consistência e bom desempenho tenham sido verificados, e apesar das modificações realizadas, o método de Penman-Monteith requer várias informações meteorológicas, impondo obstáculos à sua difusão e fazendo-se necessário o emprego de métodos mais simples na ausência de todos os dados (BORGES JÚNIOR et al., 2012).

Das metodologias que apresentam relação entre a radiação disponível a uma cultura, sem restrições hídricas, com o fluxo de calor latente ou taxa de evapotranspiração, podemos evidenciar o método da razão de Bowen. A metodologia desenvolvida por Bowen (1926) combina a radiação solar líquida com o fluxo de calor no solo, viabilizando a determinação do fluxo de calor latente na superfície vegetada (BIUDES et al., 2008). Para definir a razão de Bowen, é realizada a multiplicação da constante psicrométrica pelo produto da razão entre os gradientes de temperatura e pressão de vapor (LIMA et al., 2011). O valor de Bowen está sujeito à variações, dependendo das condições hídricas sobre a superfície evaporante, portanto, se a superfície apresentar maior umidade, grande parte da radiação líquida será utilizada no fluxo de calor latente, retornando menor valor de Bowen. Em caso oposto, na condição de restrição hídrica, a maior porção da radiação será utilizada no aquecimento do ar, resultando em valores de Bowen mais elevados (PEREIRA et al., 1997).

Os métodos indiretos para estimativa da evapotranspiração de referência consideram em suas equações diversos parâmetros meteorológicos, como pode ser observado na Tabela 1. O conjunto de fatores que envolvem as equações estão associados a condições de solo, planta e atmosfera, portanto, é um sistema interrelacionado fisicamente, com ação dinâmica (TUCCI, 2004).

Tabela 1. Metodologias indiretas de estimativa da evapotranspiração.

Metodologia	Referência original	Variáveis meteorológicas de entrada
Penman	PENMAN (1948)	Tmin, Tmax, Rs, v
Thornthwaite	THORNTHWAITE (1948)	Tmin, Tmax
Hargreaves-Samani	HARGREAVES; SAMANI, (1985)	Tmin, Tmax, Tmed
Blaney-Criddle	BLANEY; CRIDDLE, (1950)	Tmin, Tmax, URmin, Rs, v
Radiação solar	DOORENBOS; PRUITT, (1984)	Tmin, Tmax, URmin, URmax, Rs, v
Tanque Classe A	PEREIRA et al., (1997)	URmin, URmax, v, E
Penman-Monteith- FAO	ALLEN et al., (1998)	Tmin, Tmax, URmin, URmax, Rs, v, P
Balanco de Energia	BOWEN (1926)	Tmin, Tmax, URmin, URmax, Rs, G

Abreviaturas: Tmin, Tmax, Tmed: Temperatura mínima, máxima e média, respectivamente; URmin, URmax: Umidade Relativa mínima e máxima; v: Velocidade do vento; Rs: Radiação solar; P: Pressão atmosférica; E: Evaporação; G: Fluxo de calor no solo.

De acordo com Chow (1964), os métodos não devem ser aplicados de forma indiscriminada para qualquer condição, uma vez que, foram desenvolvidos e calibrados em regiões com climas específicos. Dessa forma, nenhum dos métodos que utilizam informações meteorológicas são inteiramente adequados para qualquer condição climática, sem que haja calibração por meio de ajustes regionais ou locais destes dados (TURCO et al., 2008). O maior número de trabalhos encontrados na literatura, relacionados à estimativa da evapotranspiração, centralizam como objetivo a busca pelo método que melhor se adapte às condições climatológicas e quanto a disponibilidade de dados meteorológicos (CONCEIÇÃO; MANDELLI, 2005, OLIVEIRA et al., 2005; BORGES JÚNIOR et al., 2012; MOURA et al., 2013; PALARETTI et al., 2014; ALENCAR et al., 2015; LIMA JÚNIOR et al., 2016; RIBEIRO et al., 2016; HALLAL et al., 2017).

2.3 Sensoriamento remoto aplicado à modelagem da evapotranspiração

Apesar da grande quantidade de metodologias diretas e indiretas que são aplicadas na estimativa da evapotranspiração, a determinação e medição do fluxo dinâmico de vapor de água que ocorre entre a superfície e a atmosfera, são usualmente aferidas em escalas pontuais. Geralmente, parte das metodologias não abrangem extrapolações para medidas em larga escala, em função de sua grande variabilidade espacial. Desse modo, o uso de dados procedentes de sensoriamento remoto torna-se uma ferramenta alternativa para aquisição de informações atmosféricas em diversas escalas temporais e espaciais (IDSO et al., 1975; MENENTI; CHOUDHURY, 1993; LI; LYONS, 1999; COURALT et al., 2005; CONSOLI; VANELLA, 2014).

O interesse no desenvolvimento de métodos mais robustos e operativos para mensurar a evapotranspiração, de modo que auxilie o monitoramento de secas e manejo eficiente dos recursos hídricos, impulsionou a ciência ao longo dos anos, demonstrando evidências da qualidade das informações coletadas via sensoriamento remoto (YI et al., 2007; MASCARENHAS et al., 2009). Com o lançamento do primeiro satélite, o *Earth Resources Techonology Satellite* (ERTS-1), em 1972, para fins de monitoramento da superfície terrestre, foi possível verificar que os dados obtidos fornecem estimativas da evaporação da água no solo em um período longo e específico. Em 1975 o satélite ERTS-1 foi renomeado para Landsat-1.

Ainda nesse período, em um estudo realizado por Idso et al. (1975), certificou-se que, para solos com diferentes classificações e distintas condições de umidade, era possível obter a evaporação atual do solo a partir de medidas de temperatura coletadas remotamente, utilizando radiômetros instalados nas plataformas orbitais. Em 1978, com o lançamento dos satélites *Heat Capacity Mapping Mission* (HCMM) e *Tiros-N*, tornou-se possível a aplicação dos dados de sensoriamento em frequência termal para pesquisas envolvendo fluxo de energia e umidade na superfície da Terra (PRICE, 1980).

Com o desenvolvimento dos modelos que estimam a evapotranspiração a partir de informações coletadas remotamente, sua fundamentação foi categorizada em dois tipos. O primeiro se refere aos métodos empíricos, que relacionam informações derivadas do sensoriamento com dados extraídos da superfície, aplicando funções estatísticas. A segunda categoria são as que abordam métodos analíticos, que estabelecem relações entre os processos físicos, empregando informações mensuradas de forma direta e indiretamente via sensoriamento remoto, e equipamentos instalados na superfície (LI et al., 2009).

Na abordagem analítica para estimativa da ET, é utilizado o método residual do balanço de energia na superfície, a partir do fluxo de calor latente (LE). Os modelos que se enquadram nessa abordagem são classificados de acordo com a quantidade de camadas, sendo os de uma camada o (*Single-source models*) e os de duas camadas o (*Dual-source models*). A principal diferença entre eles é a segmentação do fluxo de energia da superfície (KUSTAS; NORMAN, 1996).

Os modelos de duas camadas apresentam soluções para a equação do balanço de energia, considerando que a superfície terrestre seja composta por uma camada de solo e vegetação, excluindo o tratamento de camada única e uniforme. O modelo original de duas camadas determina o fluxo de calor em conformidade de medições instantâneas da temperatura de brilho, possibilitando o cômputo da temperatura radiométrica da superfície, sendo estruturada nas temperaturas termodinâmicas individuais do solo e da vegetação (NORMAN et al., 1995). Ainda que os modelos de duas camadas sejam considerados um aperfeiçoamento dos modelos de camada única (YANG; SHANG, 2013), os modelos de uma camada são bastante utilizados em diversas metodologias (MENENTI; CHOUDHURY, 1993; BASTIAANSSEN et al., 1998; SU, 2002; ALLEN et al., 2007).

A segmentação dos algoritmos também compreende os grupos que utilizam o balanço de energia, as derivações dos índices de vegetação, e as relações entre a temperatura da superfície e o índice de vegetação para estimativa da evapotranspiração (KARIMI; BASTIAANSSEN, 2015). A associação de um fator específico, para cada cultura com a taxa de evapotranspiração potencial, é importante para definir as etapas de crescimento das plantas, em que a situação potencial é ajustada a taxas reais de evapotranspiração de culturas agrícolas (RITCHIE; BURNETT, 1971; SEEVERS; OTTMANN, 1994). Adiante, estudos procuraram substituir o fator cultural por um índice de vegetação (DUCHEMIN et al., 2006; ER-RAKI et al., 2010).

Inicialmente uma das variáveis utilizadas como fator de cultura foi o Índice de Área Foliar- IAF, avaliando o comportamento espectral da vegetação e parâmetros biofísicos (STERN, 1965; RITCHIE; BURNETT, 1971; WEISER et al., 1986). Posteriormente, Rouse et al. (1973) propuseram o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI, para representatividade de condições culturais e estimativa da evapotranspiração real conforme seu desenvolvimento (CHOUDHURY et al., 1994; KAMBLE et al., 2013; AKDIM et al., 2014). Na interpretação do NDVI deve-se considerar os fatores limitantes, como o ponto de saturação em que o aumento da biomassa não deve seguir o incremento do índice, possíveis interferências atmosféricas, o comprimento das bandas espectrais e a qualidade das imagens (PONZONI et

al., 2012). Na intenção de aprimorar a avaliação do comportamento vegetativo foi elaborado o Índice de Vegetação Melhorado (EVI). Este índice tem como característica maior sensibilidade ao analisar regiões com densidades elevadas de biomassa vegetal, por meio da diminuição da ação atmosférica e desagregação de fundo do dossel vegetativo (HUETE et al., 2002).

O grau de reflectância nas folhas, na região do visível, é conduzida pela influência dos pigmentos de clorofila, xantofilas, carotenoides e antocianinas. Ao longo do desenvolvimento das folhas, a concentração desses pigmentos varia, diminuindo a produção de clorofila quando envelhecem, e nesse estágio aumenta-se a produção de carotenoides e xantofilas (HOFFER, 1978). Já na região do infravermelho, esses pigmentos não desempenham uma influência significativa, e no espectro do infravermelho próximo, a reflectância é governada pela estrutura celular e pelo teor de água nas folhas. Próximo da senescência, com característica vegetativa seca, o grau de reflectância é maior e não sofre com extremidades de absorção da água (HOFFER, 1978; MOREIRA, 2003).

Quando se considera toda a composição de uma cultura, que envolve propriedades fisiológicas e morfológicas, são esses os fatores que exercem interação com a radiação solar incidente. Sendo assim, características como a densidade de plantio, por exemplo, influenciam no grau de reflectância, pois quanto maior a densidade, menor será a parcela de solo exposto e, nesse caso, o espectro de reflectância assume proximidade ao da vegetação (MOREIRA, 2003). Assumindo um dossel com distribuição heterogênea, sendo associado a um ângulo de incidência solar, é gerado um efeito de sombreamento em parte do dossel, o que produz valores menores de reflectância, situação contrária de quando a disposição do dossel se dá de forma homogênea (LIANG, 2004).

A representatividade de um fator cultural na estimativa da evapotranspiração real, sem que haja indicação de informações de solo ou da cultura, é uma das principais vantagens dos modelos que utilizam dados de satélites (BASTIAANSEN et al., 2005). Desse modo, os modelos são capazes de converter a radiância em propriedades de superfície como albedo, emissividade, índice de vegetação e temperatura, de forma que a determinação da evapotranspiração é dada como resíduo da equação do balanço de energia (CONSOLI; VANELLA, 2014).

Dentre os modelos desenvolvidos que são fundamentados na solução do balanço de energia, evidenciam-se: *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL), de Bastiaanssen et al. (1998a e 1998b); *Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration* (METRIC), elaborado por Allen et al. (2007); *Simplified Surface*

Energy Balance (SSEB), desenvolvido por Senay et al. (2007); o *Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving* – SAFER criado por Teixeira (2010); e Operational Simplified Surface Energy Balance (SSEBop), desenvolvido por Senay et al. (2013).

Entre os modelos citados, o SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*), desenvolvido por Bastiaanssen (1998), tem sua fundamentação no balanço de energia, onde o termo residual é produto da conversão do fluxo de calor latente. Os procedimentos computacionais empregados no método são vistos como complexos, porém, viáveis. Ao considerar a resolução espacial em superfícies heterogêneas e quantidades mínimas de dados meteorológicos, o método ainda possui baixo custo de aplicação. Para sua utilização, é requerido imagens digitais nas bandas do visível, infravermelho próximo e termal. O modelo SEBAL já foi aplicado em diversos estudos e condições climáticas (BASTIAANSSEN; CHANDRAPALA, 2003; TASUMI et al., 2005; ZHOU et al., 2014). Além da estimativa da evapotranspiração, o modelo pode ser aplicado para verificação de adversidades na irrigação e, com isso, auxiliar em uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos, bem como para monitoramento de degradação da vegetação (BASTIAANSSEN et al., 2005).

Desde sua elaboração, o modelo SEBAL foi avaliado em diferentes condições climáticas (BASTIAANSSEN; CHANDRAPALA, 2003; HENDRICKX et al., 2006; DU et al., 2013; ZHOU et al., 2014). Hong et al. (2009) testaram a acurácia do modelo SEBAL nos Estados Unidos, especificamente na bacia do Médio Rio Grande, região composta de campos agrícolas, áreas com características de desertificação e vegetação ripária. Objetivou-se comparar estimativas baseadas em imagens de alta e média resolução, respectivamente, correspondendo ao satélite Landsat 7 e ao sensor MODIS. Os resultados obtidos foram consistentes, porém apresentaram distribuições espaciais distintas de evapotranspiração, devido à diferença de resolução espacial dos dois sensores. Já na região do México, Zwart e Bastiaanssen (2007) empregaram imagens provenientes dos satélites NOAA-AVHRR e Landsat para aplicação do modelo SEBAL. A área avaliada estava plantada com a cultura do trigo, onde obteve-se medidas de campo pelo método de correlações turbulentas para validação do algoritmo. O resultado acumulado de ETr pelo SEBAL foi de 410 mm, distando-se em 13% do acumulado de 364 mm aferido em campo. De acordo com os autores, o modelo expôs boa acurácia.

Considerando a importância da estimativa da evapotranspiração para uso racional da água na agricultura irrigada, Moreira et al. (2010) aplicaram o modelo SEBAL utilizando imagens do Landsat 5. A avaliação foi referente a áreas irrigadas, floresta nativa densa e a

Caatinga do Estado do Ceará. Os resultados de evapotranspiração foram superiores a $0,60 \text{ mm h}^{-1}$ em áreas irrigadas e de vegetação nativa densa, nas áreas de vegetação nativa de menor densidade a taxa de ET apresentou variabilidade de $0,35$ a $0,60 \text{ mm h}^{-1}$. Além da estimativa da ET e determinação dos termos do balanço de energia, a modelagem do algoritmo SEBAL permitiu que fossem detectados a existência de áreas degradadas ou em processo de degradação, apresentando valores de ET quase nulos.

Oliveira et al. (2014) avaliaram o desempenho do modelo SEBAL em comparação com a técnica da razão de Bowen, na Bacia Hidrográfica do Rio Tapacurá, Pernambuco. A ETR determinada pelo modelo SEBAL indicou valores entre 0 e 6 mm d^{-1} , sendo os maiores valores respectivos ao reservatório de Tapacurá e menores em áreas urbanas. Quando comparado a razão de Bowen, o Erro Absoluto Médio obtido foi de $0,40 \text{ mm d}^{-1}$, indicando que o SEBAL teve precisão satisfatória. Segundo os autores, o referido algoritmo é uma ferramenta prática, eficiente e econômica para fornecimento de informações adequadas para gestão dos recursos hídricos.

Veloso et al. (2017) efetuaram um trabalho em áreas irrigadas do projeto Jaíba em Minas Gerais, estimando a evapotranspiração através do algoritmo SEBAL comparado às informações obtidas por estação meteorológica, respectiva à cena Landsat. Em escala diária, o resultado máximo de evapotranspiração foi equivalente a $6,85 \text{ mm d}^{-1}$, e o menor valor encontrado de $2,2 \text{ mm d}^{-1}$, correspondendo ao dia juliano 191. Considerando a quantidade de radiação disponível nos dias avaliados, observou-se variações nos valores de evapotranspiração, indicado pelo comportamento decíduo na área de floresta estacional. A avaliação do modelo foi apontada como eficiente, verificando sua importância na gestão ambiental dos recursos hídricos.

Profeta et al. (2018) analisaram o desempenho do modelo SEBAL na estimativa da evapotranspiração em escala horária e diária para duas condições de relevo, especificada pelos autores como Modelo 1 e 2. Para o Modelo 1, não houve correção da influência do relevo e para o Modelo 2 foi realizada a correção para a influência do relevo. O estudo foi realizado em Minas Gerais, na Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos do Rio Piranga (UPGRH DO1) e o desempenho do SEBAL foi relacionado com a evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith e com a evapotranspiração da cultura do Eucalipto. Segundo os autores, o algoritmo SEBAL apresentou resultados consistentes para os dois modelos avaliados. Contudo, a estimativa para o Modelo 2, em que foi feita a correção da influência do relevo, tende a exibir valores inferiores quando comparada ao Modelo 1.

Concluíram que, em ambos os modelos, ficou evidente a influência da vegetação e do relevo na distribuição dos fluxos de energia na superfície da Terra.

Outro modelo amplamente difundido é o METRIC (*Mapping Evapotranspiration at High Resolution and Internalized Calibration*), elaborado por Allen et al., (2007). O METRIC aborda em sua metodologia alguns princípios do SEBAL, na determinação da temperatura da superfície relacionada à temperatura radiométrica. Diferente do SEBAL, o METRIC não possui a necessidade de correções mais refinadas da temperatura do ar, além disso, o modelo é autocalibrado internamente para imagens de satélite, o que diminui a obrigação de correção da estabilidade aerodinâmica e rugosidade da superfície. Da mesma maneira que o SEBAL, o METRIC vem sendo utilizado para estimar a evapotranspiração real em diversos estudos (FOLHES et al., 2009; SCHERER-WARREN, 2012; TREZZA et al., 2013; GIONGO; VETTORAZZI, 2014; SINGH; SENAY, 2016; CARRILLO-ROJAS et al., 2016), apresentando resultados satisfatórios.

Um estudo realizado por França & Silva et al. (2019) teve como objetivo a estimativa da evapotranspiração real da cultura da cana-de-açúcar, utilizando o modelo METRIC. A pesquisa foi conduzida no município de Juazeiro (BA), tendo em vista as condições semiáridas da região, com extensa área irrigada com cultivo da cana. Para aplicação do modelo foram utilizados dados orbitais e da superfície, obtidos por uma estação meteorológica. Os resultados encontrados indicam que o METRIC se mostrou eficaz na estimativa da evapotranspiração real da cana-de-açúcar para a região. Entretanto, os autores apontam a necessidade de melhoria no processo de calibração do modelo, relacionado com a escolha dos pixels âncoras, a fim de obter resultados mais coerentes pelo método.

Tais modelos diferenciam-se no cálculo do fluxo de calor sensível, que apesar de estimarem esse fluxo através de um processo de auto calibração por uma função aerodinâmica, ainda há diferenças no cômputo da temperatura. Contudo, esses algoritmos aplicam pixels âncoras para definir nas imagens a divergência de temperatura entre uma superfície seca e úmida (GOWDA et al., 2008). No algoritmo SEBAL, a diferença de temperatura é determinada em função dos valores de fluxo de calor sensível para condições de pixel quente e pixel frio, que representam, respectivamente, a área em que o fluxo de calor é considerado máximo e mínimo. Já no modelo METRIC, a variação da temperatura é estimada em conformidade com a evapotranspiração de referência para a cultura da alfafa. Ambos os modelos aplicam a teoria da similaridade de Monin-Obukhov para corrigir a estabilidade atmosférica (BASTIAANSEN et al., 2005; ALLEN et. al., 2007b).

O modelo SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*) foi desenvolvido e teve sua validação em condições semiáridas do Brasil (TEIXEIRA, 2010). O modelo estima a evapotranspiração por meio de parâmetros biofísicos, determinados pela aplicação do sensoriamento remoto, relacionados a informações meteorológicas. O algoritmo é fundamentado na modelagem da razão entre evapotranspiração real e de referência, baseado na equação de Penman-Monteith. Por não empregar em suas equações dados de especificação de cultura ou de situações de extrema seca, o modelo permite que sejam realizadas avaliações de tendências históricas, já que aplica informações de estações meteorológicas (TEIXEIRA, 2012). A simplicidade operacional do modelo é apontada como grande vantagem de utilização. Tanto o modelo SAFER quanto o SSEBop contornam em suas metodologias a dificuldade de identificação do conjunto de pixel quente, quando há máximo fluxo de calor sensível e mínimo fluxo de calor latente, que para outros modelos pode limitar sua aplicação durante períodos com elevada precipitação (TEIXEIRA, 2013b).

Sales et al. (2017) empregaram o modelo SAFER para determinar a evapotranspiração real de dois híbridos de tomateiro industrial. O experimento foi realizado na região de Silvânia-GO, e o modelo foi comparado com a equação de Penman-Monteith, com dados de coeficiente de cultura (K_c) recomendados pela FAO 56 e EMBRAPA. Foi realizado o monitoramento do potencial de água na folha e o conteúdo de água no solo por procedimento de balanço hídrico. A estimativa do K_c pelo modelo SAFER apresentou correlação significativa, bem como a determinação da evapotranspiração, comparado aos métodos micrometeorológicos, com R^2 de 0,97 para a metodologia FAO 56 EMBRAPA. Os bons resultados obtidos indicam que o modelo SAFER é promissor para estimativa da evapotranspiração na região estudada. Contudo, no estudo realizado por Lopes (2018), a estimativa da ETR para a cultura do trigo por meio do algoritmo SAFER não foi satisfatório e a autora sugeriu que o modelo fosse melhor avaliado para as condições de Cerrado.

Como procedimento simplificado, o modelo SSEB (*Simplified Surface Energy Balance*), criado por Senay et al. (2007), também é baseado no princípio do balanço de energia e trabalha de maneira similar aos modelos mais complexos, porém não é requerida uma solução completa do balanço de energia, fato que permite uma estimativa da evapotranspiração real de forma mais rápida (ALLEN et al., 2007). No algoritmo SSEB a temperatura é multiplicada de forma direta por meio da determinação da evapotranspiração em condições máximas, enquanto nos outros a temperatura é aplicada para estimativa do fluxo de calor sensível (SENAY et al., 2011).

Na região nordeste do Brasil, Araújo et al. (2017) apresentaram uma metodologia a fim de operacionalizar a estimativa espacial da evapotranspiração apenas com dados de sensoriamento remoto, utilizando o algoritmo R-SSEB (Modelagem Simplificada Para Estimativa do Balanço de Energia à Superfície em Escala Regional). Avaliaram-se diversos alvos espalhados na região nordeste e os resultados foram comparados a dados CLM (Common Land Model) e MOD16. O erro médio percentual encontrado foi de 23,6% e diferença de 181 mm.ano⁻¹. Concluíram que o modelo apresentou resultados promissores, a considerar a grande quantidade de dados processados de forma simplificada e operacional, de forma que não compromete a precisão das informações obtidas.

Uma nova parametrização para o modelo SSEB e alternativa mais recente para estimativa da evapotranspiração é o modelo SSEBop (*Operational Simplified Surface Energy Balance*), desenvolvido por Senay et al. (2013). O aprimoramento do modelo inclui, para cada pixel, condições de delineamento para o fluxo de calor latente, sendo o valor de referência do pixel frio um produto da fração da temperatura do ar. O valor de referência do pixel quente é estimado através do acréscimo da diferença de temperatura, que é sazonalmente dinâmica e única para cada região (SENAY et al., 2013). Para aplicação do modelo, são necessárias medições de temperatura de superfície e albedo em período coincidente com a passagem orbital. O SSEBop considera em sua metodologia a determinação da evapotranspiração de referência (ET_o) e, apesar de não definir completamente alguns parâmetros do balanço de energia, é capaz de solucionar as condições no princípio do saldo de radiação. O SSEBop possui uma parametrização simplificada e metodologia operacional que permite sua aplicação tanto em escala local quanto regional (SENAY et al., 2014). O modelo utiliza a variação da temperatura em condição predefinida para estimar o fluxo de calor sensível, o que o difere das metodologias como METRIC, SEBAL e SEBS, que aplicam o método de Monin-Obukov (SINGH; SENAY, 2016).

Senay et al. (2016) utilizaram o modelo SSEBop para estimar o consumo de água anual na bacia do rio Colorado, nos Estados Unidos, aplicando imagens do satélite Landsat 8. A validação do modelo foi obtida pela comparação com o método da correlação de vórtices. A estimativa da evapotranspiração pelo modelo apresentou boa concordância, tanto para escala diária quanto mensal, extrapolando-se os valores. Singh et al. (2014) avaliaram o SSEBop com aplicação de dados procedentes de técnicas de desagregação espacial de imagens, com objetivo de melhorar a resolução do MODIS com imagens Landsat 8. O desempenho do modelo foi considerado satisfatório.

Com o propósito de estimar a evapotranspiração no sistema aquífero de Urucuia entre os anos de 2000 e 2013, Comini et al. (2017) aplicaram a metodologia do algoritmo SSEBop. Os resultados de evapotranspiração mensal foram confrontados com dados mensais de ETr adquiridos via modelo chuva-vazão SMAP. Realizando a calibração do modelo com valor único para o fator de escala (k), não foi possível representar adequadamente os períodos secos e chuvosos da região. Portanto, foi efetuada a calibração de k com valores independentes para cada período, alcançando bons resultados onde o R^2 variou entre 0,71 e 0,80. Na avaliação anual do SSEBop, os valores encontrados concordaram bem com o modelo de SMAP, apresentando desvios pequenos e de igual magnitude, estabelecendo a estimativa da ETr em grandes áreas a um baixo custo operacional. O trabalho destaca ainda que o modelo é uma valiosa ferramenta para identificação de escassez hídrica, tanto em grandeza espacial quanto temporal.

Paula et al. (2019) avaliaram estimativas de evapotranspiração real do modelo SSEBop para a cultura da soja e do feijão, em sistema irrigado por pivô central. A pesquisa foi realizada na bacia do Rio Preto (DF), sendo as estimativas do modelo definidas a partir de imagens obtidas pelos satélites Landsat 7 e Landsat 8. Os autores relataram forte relação linear entre a evapotranspiração real, determinada pelo SSEBop, e a medida pelo método da razão de Bowen, com R^2 de 0,94 e concordância equivalente a (dr) equivalente a 0,82. Com valores de erro médio quadrático de 0,62 mm d⁻¹ e erro médio absoluto de 0,04 mm d⁻¹, o desempenho do modelo foi classificado como ótimo, com Pi de 0,77, garantindo a utilidade e precisão do SSEBop no cômputo da evapotranspiração das referidas culturas.

O modelo SSEBop também foi aplicado por Lopes et al. (2019) na região do Cerrado brasileiro, a fim de avaliar o desempenho do método em relação à estimativa da evapotranspiração da cultura do trigo. Os resultados foram comparados com o método da razão de Bowen e as imagens utilizadas foram obtidas pelos sensores ETM+/Landsat 7 e OLI-TIRS/Landsat 8. Considerando os dados ultrapassando o ciclo da cultura, o SSEBop superestimou a evapotranspiração real em 13,6 %, com erro médio quadrático correspondente a 0,89 mm d⁻¹. Na avaliação da performance do modelo para escala diária, durante o ciclo do trigo e com a extrapolação de dados, a superestimativa do modelo ficou próxima de 5,5%, com R^2 de 0,66 e erro médio quadrático de 0,95 mm d⁻¹. Apesar do SSEBop ter superestimado a ETr para a cultura do trigo, os autores citam que o modelo tem desempenho confiável e que sua aplicação pode contribuir para melhoria da eficiência da irrigação, visto a simplicidade operacional e de modelagem do método.

Nas mesmas condições, Malta (2019) utilizou o algoritmo SSEBop para determinar a evapotranspiração real do trigo, nos ciclos correspondentes aos anos de 2017, 2018 e 2019. Os valores definidos pelo método foram comparados com medidas de campo, estipulada pela razão de Bowen. De maneira geral, observando todos os anos em análise, obteve-se um R^2 de 0,82 e coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe equivalente a 0,73, que indica bom desempenho do modelo. De acordo com o índice BIAS, o SSEBop subestimou a ETr em $-0,06 \text{ mm d}^{-1}$, resultado que comprova a eficiência do algoritmo para a cultura do trigo na região do Cerrado.

Salles (2020), utilizou o modelo SSEBop com aplicação de dados MODIS, ETM+ e TIRS, para estimar a ETR em diferentes condições. De modo geral, o modelo apresentou um desempenho satisfatório, com coeficiente de determinação (R^2) equivalente a 0,8 em áreas de pastagem, 0,59 nas áreas de reflorestamento e 0,91 para vegetação nativa. A menor complexidade operacional do modelo SSEBop e o seu desempenho satisfatório, motivaram o lançamento do aplicativo *SSEBop BR*. Desenvolvido pela ANA (2020), o aplicativo processa cenas individuais dos satélites Landsat 5, 7 e 8 e está disponível em: www.snirh.gov.br > Usos da água. Inicialmente sua utilização está restrita ao território brasileiro.

O algoritmo SSEBop foi aplicado por Lima et al. (2020) para avaliar a dinâmica espaço-temporal da evapotranspiração na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul (BHPS). Foi aplicada a computação em nuvem de imagens Landsat 5 e Landsat 8, além de dados meteorológicos em grade. A partir dos resultados, foi possível identificar a variabilidade temporal e o padrão espacial da evapotranspiração na bacia. A partir da série histórica, correspondendo ao período de 30 anos, observou-se tendências significativas de variação anual de ETr em determinadas classes de uso e cobertura do solo. Devido a algumas limitações identificadas, o trabalho sugere a incorporação da influência sazonal da topografia, bem como calibrações regionalizadas de parâmetros e base de dados.

Segundo Chen et al. (2016), possíveis falhas na estimativa da evapotranspiração, por meio de modelos que utilizam o sensoriamento remoto, podem estar relacionadas com uma estrutura inadequada de parametrização e com a qualidade dos dados de entrada, visto que para a maioria dos modelos apresentados é necessária a implementação de informações obtidas na superfície. Embora existam diversas metodologias disponíveis, o processo da evapotranspiração envolve uma complexa dinâmica, por estar associado a princípios do balanço hídrico e de energia. Estes, por sua vez, sofrem influência de tipos de cobertura e propriedades do solo e condições meteorológicas. Para Kilic et al. (2016), os objetivos e necessidades de

cada trabalho devem contornar os desafios expostos pelos modelos, quanto à adequação das resoluções espectrais, temporais e espaciais.

2.4 Cultivo e demanda hídrica do trigo irrigado no Cerrado

O plantio recorrente de monoculturas altera as características do solo, reduzindo a produtividade e proporcionando condições favoráveis à ocorrência de pragas e doenças. A alternativa de controle mais viável ocorreu a partir da rotação de culturas com gramíneas de inverno. Justificado pela importância de compor o sistema de produção agrícola, iniciou-se o cultivo do trigo no cerrado. Apesar da produção em todos os continentes, o trigo é uma cultura que se desenvolve melhor em climas temperados e moderadamente secos, o que exigiu intensos trabalhos de melhoramento genético para melhor adaptar a cultura às condições locais (MAFRON et al., 1993; KLAR; DENADAI, 1996; FUMIS et al., 1997; CARGNIN et al., 2009).

No Cerrado, a época de semeadura do trigo compreende a estação seca, trazendo a necessidade de aplicação de lâminas de água por meio da irrigação, a fim de atender à exigência hídrica da cultura. Incentivos governamentais, como o programa de financiamento da triticultura irrigada (PRONAFIR), e a possibilidade de lucro maior para o produtor, já que a colheita do trigo no cerrado ocorre antes da produção do Sul do Brasil, impulsionaram a produção da cultura (PASINATO et al., 2018; SOUZA; VIEIRA FILHO, 2020). O trigo é uma cultura agrícola que apresenta boa resposta ao incremento tecnológico e com um bom suprimento hídrico pode atingir uma produtividade três vezes maior que o cultivo sequeiro (OLIVEIRA NETO & SANTOS, 2017). Fatores que potencializaram a expansão da cultura, considerando que o rendimento em termos de produtividade, na região, já é o maior do país (CARGNIN et al., 2009; FARIAS et al., 2016).

De modo geral, o trigo irrigado tem sido cultivado em áreas já consolidadas com as culturas de verão, o que evita o impacto ambiental da abertura de novas áreas (PASINATO et al., 2018). Contudo, 1 mm d⁻¹ de irrigação excedente em uma área irrigada de 100 ha, refletirá na condução desnecessária de 1000 m³ de água, e além do desperdício hídrico, leva a um consumo de 3 a 8 kW/h de energia elétrica (MOREIRA et al., 2006). A necessidade da irrigação para atingir altas produtividades podem levar à conflitos pelo uso da água, indicando a necessidade de estudos que determinem a variabilidade da demanda hídrica do trigo na região.

São largas as variações do consumo hídrico do trigo, dentro do bioma Cerrado, em decorrência da cultivar plantada, das condições atmosféricas e diferenças adotadas no manejo do plantio e da irrigação, bem como, a depender da modelagem utilizada para a estimativa da evapotranspiração real. Guerra et al. (2003), utilizando lisímetros de pesagem, uma medida direta de estimativa, relataram a lâmina máxima de 6,20 mm d⁻¹ requerida pela cultura do trigo. Para alta produtividade do trigo, encontrou-se a lâmina acumulada de 428 mm (BOSCHINI et al., 2011). Em condições de efeito advectivo do vento no campo, a demanda hídrica do trigo pode ser ampliada de 345 para 385 mm (LUCHIARI JR. et al., 1997). Por meio da aplicação de modelos de sensoriamento remoto, relatou-se na literatura, valores entre 355,52 mm à 491,3 mm (SOUZA, 2016; LOPES et al., 2019; MALTA, 2019). De acordo com Azevedo (1988), na ausência de água proveniente da chuva, são necessários 500 a 600 mm de água para a cultura do trigo no Cerrado.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Diante do objetivo de estimar a evapotranspiração real do trigo em condições de cerrado, a presente seção irá contextualizar todas as premissas adotadas para o desenvolvimento da pesquisa, bem como, esclarecer as especificações do experimento e a base de dados requerida.

3.1.1 Área de estudo

O estudo da demanda hídrica da cultura do trigo na Bacia Hidrográfica do Rio Samambaia foi iniciado por Lopes (2018) e seguido por Malta (2019). Nesta bacia há predominância de pivôs centrais. (PORTO, 2019).

Os pivôs centrais avaliados no presente estudo, cultivados com a cultura do trigo, estão localizados na Fazenda Pamplona, que pertence ao grupo SLC-Agrícola®. Localizam-se na região de Cristalina-GO inseridos na Bacia Hidrográfica do Rio Samambaia, que por sua vez está situada na Bacia Hidrográfica do Rio São Marcos e, pertencem à Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do rio Paranaíba, fazendo parte da bacia hidrográfica do rio Paraná. A Figura 1 apresenta o mapa de localização da região onde a pesquisa foi desenvolvida.

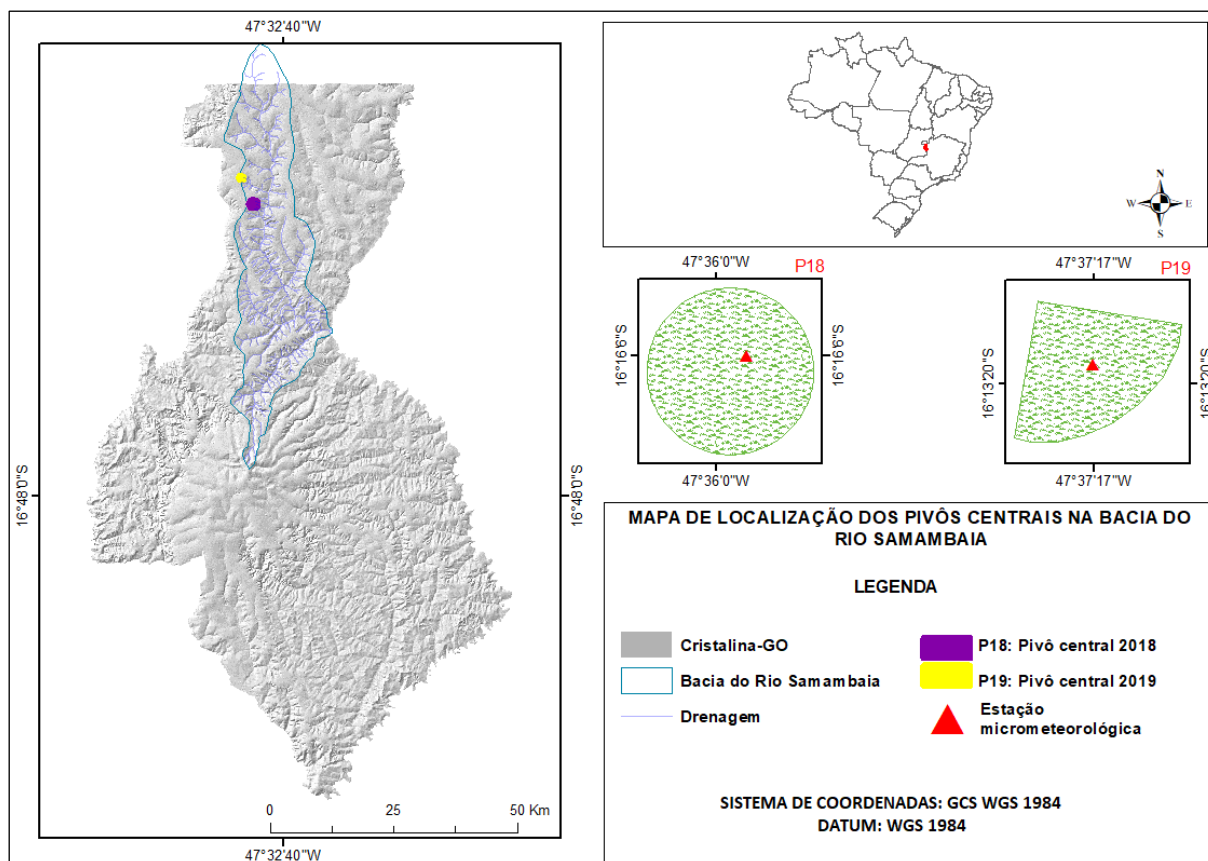


Figura 1. Mapa de localização da área experimental.

Ambos os períodos de cultivo avaliados compreenderam a estação seca no Cerrado, que ocorre de junho a setembro, nas estações outono-inverno. Conforme classificação climática sugerida por Köppen, a região de Cristalina-GO possui o clima dominante classificado como Cwa, mesotérmico úmido, com frequência de chuvas nos meses de outubro a maio, com precipitação pluviométrica média e anual de aproximadamente 1600 mm, temperatura média de 22°C e umidade relativa em torno de 73 % (SCHMIDT; VALIATI, 2006; PEEL et al., 2007).

3.1.2 Especificações do experimento

O método da razão de Bowen (mRB) foi aplicado para mensurar a partição da energia disponível nas densidades de fluxos, no propósito de determinar a evapotranspiração real da cultura do trigo (ETR_{RB}). Dado que seus parâmetros são medidos diretamente no campo, os resultados da ETR_{RB} também foram utilizados na avaliação de desempenho dos modelos de sensoriamento remoto SEBAL e SSEBop. Toda a coleta de dados de natureza primária foram simultâneas com o trabalho de Malta (2019) e integram o banco de dados do projeto de pesquisa

desenvolvido entre a UnB e a ANA, e que contou com recurso do projeto de pesquisa financiado pela FAP-DF.

Foram instaladas nos pivôs experimentais, duas estações micrometeorológicas da marca Campbell Scientific, cedidas pela Agência Nacional de Águas (ANA). Em 2018 o plantio ocorreu no dia 15 de maio, com colheita do trigo no dia 17 de setembro do mesmo ano. Em 2019 houve antecipação da semeadura, que aconteceu em 10 de maio, e após completa maturação dos grãos do trigo foi realizada a colheita no dia 05 de setembro. As estações permaneceram no interior da área irrigada durante todo o ciclo da cultura do trigo, garantindo o monitoramento do balanço de energia e da ETR_{RB} no decorrer da pesquisa. Dos 60 ha de área total do pivô avaliado em 2019, apenas $\frac{1}{4}$ do pivô foi cultivado com a cultura do trigo. Outras informações relevantes dos pivôs centrais são apresentadas na Tabela 2 e na Figura 2.

Tabela 2- Caracterização dos pivôs centrais estudados no ano de 2018 e 2019 na região de Cristalina-GO.

Ano	Latitude	Longitude	Altitude	Área	População	DAP	Sistema de Cultivo
2018	16°16'10" S	47°35'57" W	975 m	120 ha	4.000.000 pl/ha	126	Plantio convencional
2019	16°13'11" S	47°37'21" W	993 m	14.33 ha	4.000.000 pl/ha	118	Plantio convencional

* DAP: Dias após o plantio.

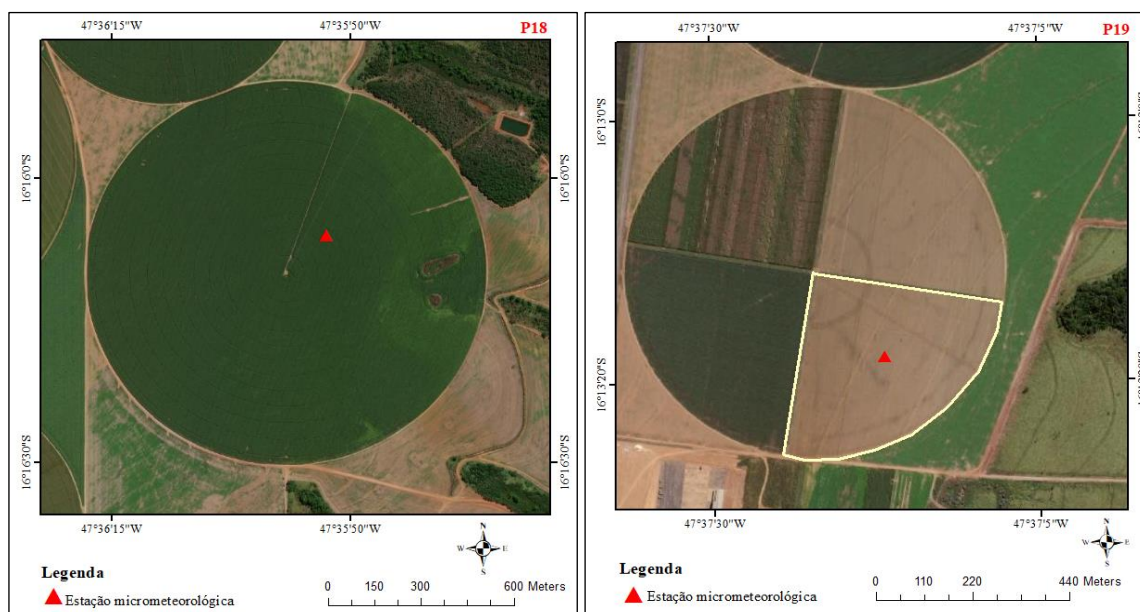


Figura 2. Descrição dos pivôs centrais cultivados com a cultura do trigo avaliados na região de Cristalina (GO) nas safras de 2018 (P18) e 2019 (P19).

Os pivôs centrais foram cultivados com a cultura do trigo, com espaçamento de 0,17 cm entre fileiras. Em ambos os períodos se plantou a cultivar BRS 394 (ALBRECHT et al., 2020), conhecida como o “trigo melhorador do cerrado”, que apresenta características de precocidade, alto potencial produtivo, bom desempenho industrial para panificação e resistência ao acamamento, que é um aspecto importante da cultura para cultivo sob sistema irrigado.

Para medições mais assertivas do balanço de energia, certas condições limites devem ser asseguradas na instalação de um sistema de medição do mRB, como o requisito de bordadura mínima para reduzir os efeitos de advecção (STANNARD, 1997; LEE et al., 2004; GAVILAN; BERENGENA, 2007). Quanto à exigência de bordadura mínima, em 2018 as estações foram posicionadas a 250 m de distância da borda, na intenção de atender o critério de 100 vezes a altura do sensor mais elevado (MONTEITH; UNSWORTH, 1990; HORST; WEIL, 1992). Em 2019, o pivô central foi fracionado para plantio de outras culturas na mesma área, além do trigo, e devido à grande redução da área experimental em que o trigo foi cultivado, não foi possível garantir a exigência de bordadura mínima, por isso as instalações ocorreram nas áreas mais próximas ao centro do pivô, a fim de reduzir a advecção de calor sensível de áreas adjacentes.

Com finalidade de determinação do fluxo de calor no solo (G), utilizou-se dois fluxímetros, instalados a 2 cm de profundidade. A medição do saldo de radiação (Rn) foi

realizada pelo equipamento saldo radiômetro, instalado a 2,0 m acima do dossel da cultura. Acima da superfície evaporante forma-se uma coluna de ar, onde é possível estabelecer os gradientes de temperatura e pressão de vapor, sendo contabilizados por sensores instalados em diferentes níveis (BIUDES et al., 2008; EUSER et al., 2014). Nesse estudo, os sensores de umidade relativa, temperatura do ar e velocidade do vento foram colocados na altura de 1,0 e 2,0 m da superfície do solo, correspondendo assim aos níveis 1 e 2. O conteúdo volumétrico de água no solo foi medido por sensores TDR, cravados na direção vertical a 30 cm de profundidade. Para monitoramento da precipitação o pluviômetro foi instalado a 1,4 m.

Todos os equipamentos citados foram conectados a um *datalogger* para aquisição automática e armazenamento dos dados, contabilizados no intervalo de 10 minutos. A especificação dos instrumentos instalados nas estações micrometeorológicas estão detalhados na Tabela 3.

Tabela 3- Instrumentação utilizada nas estações micrometeorológicas instaladas nos pivôs de trigo, em Cristalina (GO).

Variável meteorológica	Instrumento
Saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)	CNR4 Net Radiometer
Fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)	HFP01 Soil Heat Flux Plate
Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$)	Temperature Sensor
Umidade relativa (%)	083E Relative Humidity
Umidade do solo (cm^3)	CS650 Water Content Reflectometers
Precipitação (mm)	TB4 Rain Gage
Velocidade do vento (m/s)	Met One 014A Wind Speed Sensor
<i>Datalogger</i>	CR3000 Measurement and Control System

Os elementos climáticos aplicados em modelos agrometeorológicos podem apresentar erros dependendo da calibração, das propriedades dos sensores e das condições de uso dos instrumentos. Para estimativas da razão de Bowen de forma assertiva, é necessário que tenha variações nos gradientes de temperatura e pressão de vapor em diferentes níveis de altura. Para

garantir a precisão dos instrumentos, avaliou-se a consistência dos dados coletados por meio da calibração de cada sensor, estando no mesmo nível, através de regressões lineares simples.

A calibração foi feita ao final de cada ciclo, correspondendo ao estágio de completa maturação dos grãos da cultura do trigo e, antes da colheita. Foram computados 97 dias com dados válidos de campo para análise no ciclo de 2018 e 106 dias em 2019.

É importante destacar que durante as visitas na área experimental para manutenção e limpeza dos sensores da estação micrometeorológica ocorre inevitavelmente a degradação da cultura ao redor da estação. A tendência é que haja diminuição do dossel devido o pisoteamento, resultando em variações na quantidade de radiação solar refletida. Por essa razão, para não comprometer a avaliação a nível de pixel conforme o crescimento da cultura, considerou-se o pixel mais próximo da estação quando necessário.

3.1.3 Informações requeridas pelos modelos de sensoriamento remoto

Para execução dos modelos SEBAL e SSEBop, foram utilizados dados meteorológicos e informações obtidas via sensoriamento remoto. Os dados meteorológicos aplicados nesse estudo são provenientes da estação automática do INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Foi selecionada, por estar mais próxima da região avaliada, a estação de Cristalina-Fazenda Santa Mônica (GO) - A056, com latitude sul de 16°23'57'' e longitude oeste de 47°37'33'', com altitude equivalente a 932 m. A coleta de dados correspondeu ao período de aquisição das imagens de satélite e dos ciclos da cultura do trigo, acompanhados em campo.

Os dados orbitais utilizados para implementação dos algoritmos foram cartograficamente padronizados, utilizando a Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM) 23 S e datum horizontal WGS 84. Os modelos SEBAL e SSEBop exigem informações do relevo para correção da declividade e elevação no decorrer da metodologia. Essas correções são feitas mediante aplicação do Modelo Digital de Terreno (MDT). Adotou-se no presente estudo dados provenientes do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), na resolução espacial de 30 m (1 arco-segundo).

Uma das adversidades encontradas quando se utiliza modelos que aplicam dados de sensoriamento remoto, como ferramenta para gestão de recursos hídricos, é a resolução temporal dos satélites, relacionada ao período de aquisição das imagens. No caso dos sensores a bordo dos satélites Landsat, essa resolução temporal é de 16 dias, trazendo desvantagens de aplicação da metodologia quando se pretende realizar um manejo eficiente da irrigação. Outro

obstáculo é a presença de nuvens nas imagens, que de acordo com a temporalidade de obtenção, pode-se ocasionar longos períodos sem imagens válidas. Dessa forma, uma opção é trabalhar com a sinergia entre as bandas das imagens provenientes de dois sensores, a fim de reduzir o intervalo de aquisição para oito dias.

Foram utilizadas imagens do satélite Landsat 7, geradas pelo sensor ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*) e do satélite Landsat 8 pelos sensores OLI- (*Operational Land Imager*) e TIRS (*Thermal Infrared Sensor*). A sinergia entre as aquisições das imagens permite maior frequência de revisita, de modo que seja possível monitorar as mudanças fenológicas da cultura ao longo do ciclo. As respectivas bandas espectrais aplicadas são indicadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Especificação das bandas espectrais dos sensores ETM+ e TIRS.

Sensor	Bandas espectrais	Resolução espectral	Resolução espacial
ETM+	Azul (B1)	0.45 – 0.52 μm	30 m
	Verde (B2)	0.50 – 0.60 μm	
	Vermelho (B3)	0.63 – 0.69 μm	
	Infravermelho Próximo (B4)	0.76 – 0.90 μm	60 m
	Infravermelho Médio (B5)	1.55 – 1.75 μm	
	Infravermelho Termal (B6)	10.4 – 12.5 μm	
	Infravermelho Médio (B7)	2.08 – 2.35 μm	
OLI	Azul (B2)	0.45 – 0.51 μm	30 m
	Verde (B3)	0.53 – 0.59 μm	
	Vermelho (B4)	0.64 – 0.67 μm	
	Infravermelho Próximo (B5)	0.85 – 0.88 μm	
	Infravermelho Médio (B6)	1.57 – 1.65 μm	
	Infravermelho Médio (B7)	2.11 – 2.29 μm	
TIRS	Infravermelho Termal (B10)	10.6 – 11.19 μm	100 m

As imagens foram adquiridas no período de 15 de maio a 17 de setembro de 2018 e de 10 de maio a 05 de setembro de 2019. Ambos os períodos correspondem ao ciclo do trigo, durante o cultivo na área de estudo. A seleção das imagens foi realizada para condições de céu claro, na ausência de cobertura de nuvens, devido a possibilidade de comprometerem a qualidade dos dados e das análises. Ao todo, foram processadas 14 datas para o ano agrícola de 2018 e 12 datas em 2019. De acordo com Singh et al. (2014), são desejadas duas imagens por mês para áreas agrícolas, especialmente durante a fase de crescimento da cultura e resultados aceitáveis são esperados com base entre 10-12 imagens por ano agrícola.

Quando se compara imagens, que foram obtidas por diferentes sensores, é necessário que seja realizada uma conversão da radiância espectral do sensor ($L\lambda$) para reflectância estratosférica (ρ) no topo da atmosfera, que representa o albedo planetário na banda (α). A partir dessas conversões, é possível realizar uma comparação padronizada de dados entre imagens adquiridas em períodos e sensores distintos. Ao utilizar valores de reflectância, consegue-se vantagens como: a remoção do efeito cosseno do ângulo solar zenital que ocorre devido ao período distinto entre a aquisição das informações, os valores desiguais de irradiância estratosférica em cada banda é compensado pela reflectância, que também corrige as variações da distância entre a Terra e o Sol em diferentes datas de obtenção de imagens (MILTON, 1987; CHANDER et al., 2009).

Importante evidenciar que desde 2003 as cenas provenientes do satélite Landsat 7 apresentam ruídos, faixas não imageadas, devido a problemas no equipamento SLC (*Scan Line Correction*), utilizado para compensar o efeito do deslocamento do satélite em relação à rotação da Terra. Contudo, as imagens Landsat 7 possuem elevada precisão radiométrica e geométrica e a banda termal não foi impactada radiometricamente.

3.1.4 Avaliação de desempenho dos modelos de sensoriamento remoto

Para interpretar a resposta de um modelo com relação ao seu comportamento, que varia em função dos dados de entrada aplicados, é importante que o processo seja submetido às etapas de calibração e validação. Dessa forma, é possível identificar a sensibilidade das variáveis que compõem sua metodologia, a fim de determinar quais dos parâmetros necessitam de maior acurácia (LONG et al., 2011). O processo de calibração é referente ao procedimento de ajuste dos elementos que possam melhor representar a área de estudo, em concordância com a verdade observada. O recurso da validação é obtido após a etapa de calibração, comparando-se o modelo com verificações reais, indicando também suas discrepâncias e percepções para sua melhoria.

No algoritmo SEBAL, o processo interno de calibração reflete na determinação dos coeficientes que relacionam de forma linear dT e TS . A calibração foi feita a partir da seleção de pixels “âncoras”. O denominado pixel “frio”, foi aplicado na definição da quantidade evapotranspirativa ocorrente em determinada imagem, de forma a representar uma área bem irrigada e completamente coberta por vegetação. Na condição de pixel “quente”, foram avaliadas as áreas secas e ausentes de vegetação, atendendo a exigência de solo exposto.

De acordo com Long et al. (2011), o modelo SEBAL é bastante sensível quanto à escolha dos pixels âncoras, com significativa importância na determinação de H e LE, já que um aumento de temperatura em um dos pixels reduz valores de H, aumentando as estimativas de LE, seguindo a mesma tendência na simulação oposta. Timmermans et al. (2007) concluíram que erros provenientes na estimativa da TS e dT, com base na escolha dos pixels extremos, exercem grande impacto nas medidas de fluxos, indicando ainda que se evite a aplicação do SEBAL em regiões heterogêneas, pois prejudicaria a linearidade entre TS e dT.

Na concepção do modelo SSEBop, foi removida a subjetividade de seleção de pixels “âncoras”, onde a dT passou a ser predefinida para um determinado pixel que represente a condição de contorno seco/úmida. A calibração no SSEBop foi feita para corrigir a temperatura na condição de contorno, por meio do fator “c” (aplicado em pixels com predominância de cobertura vegetal e determinados para cada imagem), para relacionar a temperatura no pixel frio com a temperatura máxima do ar. Senay et al. (2017) aferiram que o fator c sofre variações regionais e sazonais, e que oscilações de 1% na sua resposta pode refletir em até 20% na estimativa a ETr.

Para avaliar a acurácia das estimativas obtidas pelos algoritmos SEBAL e SSEBop, foi tomada como referência os valores de ETR_{RB} . Dessa forma, foram utilizados no presente estudo os índices: raiz do erro médio quadrático em modo absoluto (RMSE) e percentual (pRMSE), o erro médio (BIAS), o percentual de tendência (pBIAS) e o coeficiente de eficiência (E).

3.2 Métodos

Para conduzir este estudo, foram utilizadas ferramentas de análise geoespacial disponíveis no software ArcGIS 10.4.1 e as metodologias dos modelos SEBAL e SSEBop foram desenvolvidas na linguagem de programação *Python*. O método da razão de Bowen foi automatizado para gerar valores de ETR_{RB} acumulada para o período diurno a partir da elaboração de um *script* na linguagem de programação *Python*. A análise estatística, gráficos e interpretações foram conduzidas com o auxílio de planilhas no Microsoft Excel®. As principais etapas percorridas para determinação da demanda hídrica da cultura do trigo podem ser observadas na Figura 3.

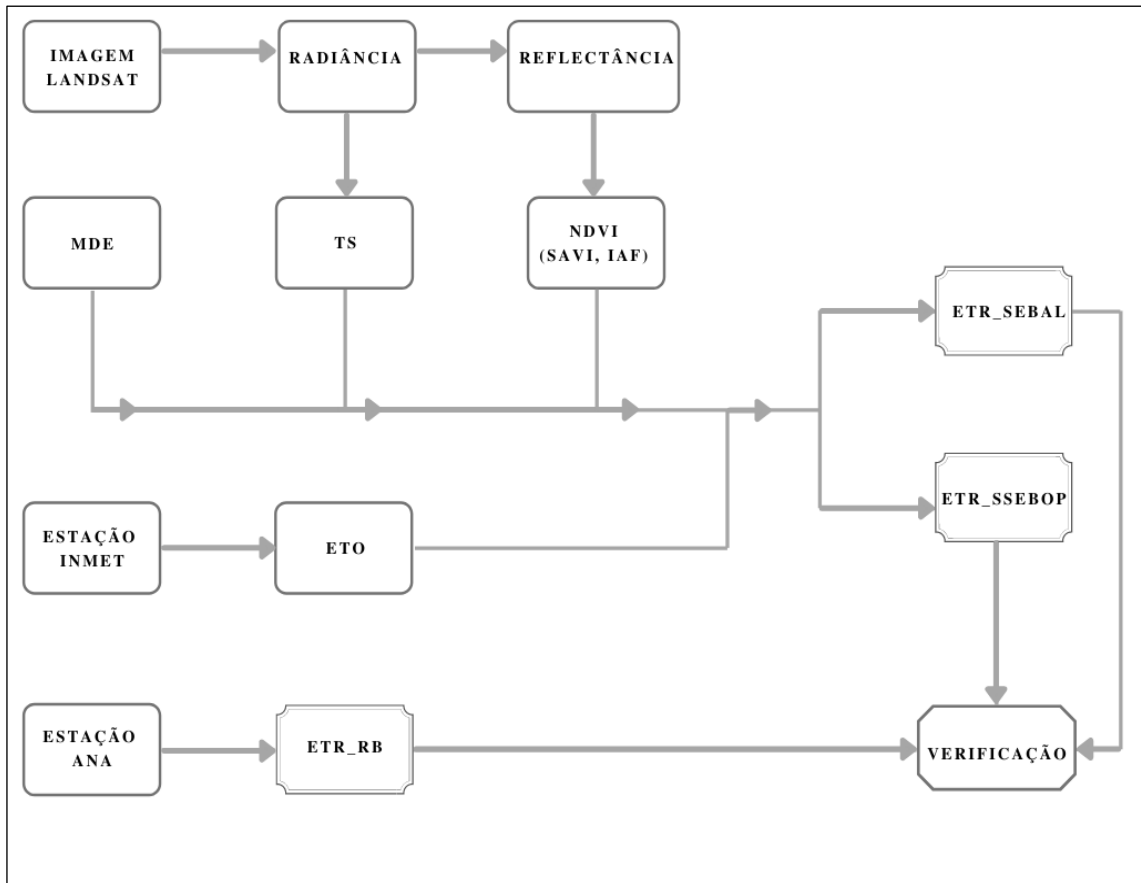


Figura 3. Fluxograma de trabalho desenvolvido para a determinação da evapotranspiração real por modelos de sensoriamento remoto.

3.2.1 Balanço de energia e evapotranspiração real pelo método da razão de Bowen

Mediante análise do balanço de energia na superfície, pode-se determinar a quantidade de energia disponível para que ocorra processos como a evaporação da água e aquecimento do ar e do solo (PAYERO et al., 2003). Desse modo, estimando os fluxos de calor sobre uma superfície, é possível calcular a evapotranspiração, como um resíduo do balanço de energia, sendo representada de forma simplificada pela Equação 1.

$$R_n = LE + H + G \quad [1]$$

em que: R_n é o saldo de radiação ($W\ m^{-2}$); LE é o fluxo de calor latente ($W\ m^{-2}$); H é o fluxo de calor sensível ($W\ m^{-2}$) e G é o fluxo de calor no solo ($W\ m^{-2}$).

A partição de energia disponível entre calor sensível, calor latente e energia utilizada para trocas de calor e massa que ocorre entre a superfície e a atmosfera, pode ser aferida por

meio da razão de Bowen (BOWEN, 1926). Na estimativa do fluxo de calor latente, realizada por meio da Equação 2, para cada intervalo de tempo correspondente a 10 minutos, estimou-se a razão de Bowen (β) considerando os gradientes de temperatura (ΔT) e pressão real de vapor do ar (Δe), aferidos nos níveis 1 e 2 da estação meteorológica, segundo Equação 3. Para determinação do coeficiente psicrométrico (γ) empregou-se a Equação 4.

$$LE = \frac{RN-G}{(1+b)} \quad [2]$$

$$b = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad [3]$$

$$\gamma = \frac{1,013 P 10^{-3}}{0,622 \lambda 10^{-6}} \quad [4]$$

em que: ΔT é a diferença de temperatura do ar entre os níveis 1 e 2 ($^{\circ}\text{C}$); Δe é a diferença da pressão real de vapor do ar entre os níveis 1 e 2 (kPa); P representa a pressão atmosférica (kPa) e λ é o calor latente de vaporização da água (J Kg^{-1}).

No cálculo da pressão de vapor do ar (e_s), para definição da pressão real de vapor (e_a), utilizou-se as Equações 5 e 6.

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

$$e_a = e_s \times \frac{UR}{100} \quad [6]$$

em que: e_s é a pressão de vapor do ar saturado de acordo com a temperatura (kPa); T é a temperatura do ar a 2 m de altura ($^{\circ}\text{C}$) e UR a umidade relativa do ar (%).

Para calcular a pressão atmosférica e o calor latente de vaporização foram aplicadas as Equações 7 e 8, respectivamente.

$$P = \left[\left(\frac{293 - 0,0065 z}{293} \right)^{5,26} \right] 101,3 \quad [7]$$

$$\lambda = [2,501 - (0,00236 T_1)] 10^6 \quad [8]$$

em que: z representa a altitude local (m); λ é o calor latente de vaporização da água ($J Kg^{-1}$) e T_1 a temperatura do ar no nível 1 ($^{\circ}C$).

A fim de evitar as possíveis inconsistências nos valores de β , adotou-se critérios de rejeição segundo recomendação de Perez et al. (1999), estabelecendo classes de erro para valores de β próximos a -1. Para a filtragem dos dados utilizou-se três parâmetros, em que o primeiro elimina os valores de β no intervalo de $-1,3 < \beta < -0,7$. O segundo parâmetro requer resultados da Equação 9 superiores a zero, em que $Rn > 0 W m^{-2}$, sendo assim, foi feita a exclusão de dados noturnos do LE, adotando somente valores diurnos para obtenção da ETR_{RB} . O terceiro fator condicionante exclui dados quando a razão de Bowen apresenta resultados imprecisos, com valores inconsistentes (ORTEGA-FARIA; CUENCA, 1996; PAYERO et al., 2003).

$$\frac{(\lambda (\Delta e + \gamma \Delta T)(Rn - G))}{10^6} > 0 \quad [9]$$

Após filtragem dos dados foi possível estimar a evapotranspiração real da cultura do trigo, segundo a Equação 10. Gerou-se valores de ETR_{RB} a cada 10 minutos, sendo esses acumulados até a determinação total do período diurno da evapotranspiração.

$$ETR_{RB} = \frac{LE \times 600}{\lambda} \quad [10]$$

em que: ETR_{RB} é a evapotranspiração real da cultura do trigo a cada 10 minutos (mm) e 600 é o tempo correspondente em segundos.

3.2.2 Base de entrada meteorológica

As informações meteorológicas obtidas por meio da estação automática do INMET, foram aplicadas no cálculo da evapotranspiração de referência (ET_o) pelo método de Penman-Monteith -FAO, de acordo com Allen et al. (1998), conforme Equação 11. Os dados também foram úteis para cômputo da diferença de temperatura predefinida (dT), resistência aerodinâmica (r_{ah}) e velocidade de fricção (u^*).

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(Rn-G) + \gamma \left(\frac{900}{T_{med} + 273} \right) u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad [11]$$

em que: ET_o é a evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹); Δ é a inclinação da curva de pressão de vapor d'água (kPa °C⁻¹); Rn o saldo de radiação (MJ m⁻² d⁻¹); G é o fluxo de calor no solo; γ é a constante psicrométrica (kPa); T_{med} refere-se à temperatura média do ar diária, (°C); u_2 é a velocidade do vento a 2 m de altura (ms⁻¹); e_a é a pressão real de vapor (kPa) (Eq. 7); e e_s é a pressão de saturação de vapor (kPa) (Eq. 5).

O valor da inclinação da curva de pressão de vapor d'água pode ser estimado de acordo com a Equação 12. E, segundo a metodologia de Penman-Monteith, Rn pode ser determinado pela Equação 13.

$$\Delta = \frac{4098 \left[0,6108 \exp \left(\frac{17,27 \times T_{med}}{T_{med} + 237,3} \right) \right]}{(T_{med} + 237,3)^2} \quad [12]$$

$$Rn = Rns - Rnl \quad [13]$$

em que: Rns é o saldo de radiação de ondas curtas (MJ m⁻² d⁻¹) e Rnl é o saldo de radiação de ondas longas (MJ m⁻² d⁻¹).

A determinação de Rns e Rnl segue-se conforme Equações 14 e 15, respectivamente:

$$Rns = (1 - \alpha) \times Rs \quad [14]$$

$$Rnl = \sigma \left[\frac{(T_{max} + 273,16)^4 + (T_{min} + 273,16)^4}{2} \right] \times (0,34 - 0,14 \sqrt{ea}) \times \left(1,35 \frac{Rs}{Rso} - 0,35 \right) \quad [15]$$

em que: α é o coeficiente de reflexão da vegetação (albedo), sendo considerado igual a 0,23 para a cultura de referência (grama); σ é a constante de Stefan-Boltzmann (4,903 10⁻⁹ MJ m⁻² d⁻¹); T_{max} e T_{min} são, respectivamente a temperatura máxima e mínima do dia (°C); Rs é a radiação solar incidente (MJ m⁻² d⁻¹); e Rso é a radiação solar incidente na ausência de nuvens (MJ m⁻² d⁻¹), estimado pela Equação 16:

$$R_{so} = (0,75 + 2 \times 10^{-5} \times Z) \times Ra \quad [16]$$

em que: Ra é a radiação solar no topo da atmosfera ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), calculada pela Equação 17:

$$Ra = \frac{118,08}{\pi} \times dr [\omega_s \text{sen}(\phi) \text{sen}(\delta) + \text{cos}(\phi) \text{cos}(\delta) \text{sen}(\omega_s)] \quad [17]$$

em que: o valor de ϕ representa a latitude da estação meteorológica, expressa em radianos; dr é a distância inversa relativa entre a Terra e o Sol (rad); δ é a declinação solar (rad) e ω_s é o ângulo horário ao nascer do sol (rad).

A distância inversa relativa entre a Terra e o Sol, a declinação solar e o ângulo horário ao nascer do Sol são determinadas conforme Equações 18, 19 e 20, respectivamente:

$$dr = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} \text{doy}\right) \quad [18]$$

$$\delta = 0,409 \text{sen}\left(\frac{2\pi}{365} \text{doy} - 1,39\right) \quad [19]$$

$$\omega_s = \frac{\pi}{2} - \arctan\left[\frac{-\tan(\phi) \tan(\delta)}{X^{0,5}}\right] \quad [20]$$

em que: doy é o número de dia do ano (de 1 a 365 ou 366, se bissexto); e X é um coeficiente expresso pela Equação 21:

$$X = (1 - [\tan(\phi)]^2 [\tan(\delta)]^2) \quad [21]$$

3.2.3 Base de entrada de sensoriamento remoto

Para a conversão dos valores de número digital para radiância espectral do sensor TIRS empregou-se a Equação 22 (USGS, 2016), e para conversão do sensor ETM+ foi aplicada a Equação 23 (NASA, 2016).

$$L\lambda = M_L \times DN + A_L \quad [22]$$

em que: $L\lambda$ é a radiância espectral em $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$; M_L um fator multiplicativo para radiância, adimensional; DN representa o número digital, adimensional; e A_L o fator aditivo para radiância, adimensional.

$$L\lambda = \left(\frac{L\lambda_{\max} - L\lambda_{\min}}{DN_{\max} - DN_{\min}} \right) \times (DN - DN_{\min}) + L\lambda_{\min} \quad [23]$$

em que: $L\lambda_{\max}$ é o valor máximo de radiância espectral, $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$; $L\lambda_{\min}$ o valor mínimo de radiância espectral, $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$; DN_{\max} é o valor máximo do número digital, adimensional; e DN_{\min} o valor mínimo do número digital, adimensional.

Com o propósito de aplicação dos valores de reflectância no topo da atmosfera $\rho(\lambda)$, utilizou-se a Equação 24 para o sensor ETM+ (NASA, 2016), já para conversão da radiância para reflectância do sensor OLI empregou-se a Equação 25 (USGS, 2016).

$$\rho\lambda = \frac{\pi \times L\lambda \times d^2}{R_{a\lambda} \times \cos\varphi} \quad [24]$$

em que: d^2 refere-se a distância entre o Sol e a Terra, unidade astronômica; $R_{a\lambda}$ é a irradiância solar exoatmosférica média no topo da atmosfera, $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$; e φ o ângulo zenital solar, graus.

$$\rho(\lambda) = M_{\rho} \times DN + A_{\rho} \quad [25]$$

em que: M_{ρ} é o fator multiplicativo para reflectância, particular de cada banda, adimensional; A_{ρ} é o fator aditivo para reflectância, particular de cada banda, adimensional.

Com base nos fundamentos de reflectância da vegetação relatados anteriormente, o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada-NDVI foi calculado utilizando a reflectância nas bandas do vermelho e do infravermelho próximo (ROUSE et al., 1973). Sua estimativa é dada pela Equação 26:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad [26]$$

em que: ρ_{NIR} representa valores de reflectância para o infravermelho próximo; e ρ_{RED} são valores de reflectância para o vermelho.

No cômputo do albedo no topo da atmosfera (α_{toa}), aplicou-se os fatores de ponderação de cada banda, conforme Equação 27:

$$\alpha_{toa} = \Sigma (\omega\lambda \times \rho\lambda) \quad [27]$$

em que: $\omega \lambda$ é o coeficiente de ponderação da banda.

O coeficiente de ponderação é calculado conforme a irradiância solar espectral no topo da atmosfera (ESUN), sendo específico para cada banda e sensor, estimado segundo Equação 28:

$$\omega \lambda = \frac{ESUN_{\lambda}}{\sum ESUN_{\lambda}} \quad [28]$$

Para determinação do albedo da superfície (α) utilizou-se a Equação 29 (ALLEN, et al, 2002).

$$\alpha = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_{path_radiance}}{\tau_{sw}^2} \quad [29]$$

em que: $\alpha_{path_radiance}$ é uma constante no valor de 0,03, baseada em Bastiaanssen (2000); e τ_{sw} é a transmissividade atmosférica, dada pela Equação 30:

$$\tau_{sw} = 0.75 + 2 \times 10^{-5} \times Z \quad [30]$$

em que: Z é a altitude de cada pixel (m).

A temperatura de brilho no topo da atmosfera (T_{sat}) foi determinada para a banda 6 do sensor ETM+ e banda 10 do sensor TIRS (USGS, 2016), de acordo com a Equação 31:

$$T_{sat} = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L_{TIR}} + 1\right)} \quad [31]$$

em que: K1 e K2 são constantes específicas de cada sensor orbital ($W \text{ m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$); e L_{TIR} é a radiância espectral não corrigida para a banda do infravermelho termal ($W \text{ m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$).

Para determinação da temperatura de superfície (TS) segundo Equação 32, usualmente é aplicada a inversão da equação de Planck, com validade para um corpo negro. De acordo com a metodologia proposta em Allen et al. (2007), são requeridas as emissividades, para fins de cálculo da emissão radiativa perceptível pelo Landsat em sua banda termal.

$$TS = \frac{K2}{\ln\left(\frac{\epsilon_{NB} K1}{L_{CTIR}} + 1\right)} \quad [32]$$

em que: LC_{TIR} é a radiância espectral corrigida para a banda do infravermelho termal ($W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$); \mathcal{E}_{NB} é a superfície de emissividade para a banda do infravermelho termal, adimensional.

A superfície de emissividade para a banda do infravermelho termal foi determinada conforme Equação 33:

$$\mathcal{E}_{NB} = 0.97 + 0.0033 \times IAF \quad [33]$$

em que: IAF é o Índice de Área Foliar, adimensional. (Definido pela Eq.41)

Para correção da irradiância espectral na banda do infravermelho termal utilizou-se a Equação 34:

$$LC_{TIR} = \frac{L_{TIR} - R_p}{\tau_{NB}} - (1 - \mathcal{E}) \times R_{sky} \quad [34]$$

em que: R_p é a *path radiance* para a banda do infravermelho termal, equivalente a $0.91(W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1})$; R_{sky} é a radiação termal descendente nas condições de céu claro, igual a $1.32 (W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1})$; e τ_{NB} é a transmissividade do ar, igual a 0.866.

3.2.4 Modelo SEBAL

As etapas que constituem o algoritmo SEBAL incluem: calibração radiométrica, estimativa da reflectância e albedo, cômputo dos índices de vegetação, emissividade e balanço de energia (BEZERRA et al., 2008). O saldo de radiação (R_n) é parâmetro fundamental no processo de balanço de energia, pois representa a fração de energia disponível nas interações físicas e biológicas que acontecem na superfície, representando os fluxos radiativos incidentes e emitidos (KLEIN, 1977; WELIGEPOLAGE, 2005). A radiação líquida foi estimada por meio do balanço de energia na superfície, conforme Equação 35:

$$R_n = (1 - \alpha) \times R_{s\downarrow} - R_{L\uparrow} + \mathcal{E}_o \times R_{L\downarrow} \quad [35]$$

em que: α é o albedo da superfície, adimensional; $R_{s\downarrow}$ é a radiação de onda curta incidente ($W m^{-2}$); $R_{L\uparrow}$ é a radiação de onda longa emitida ($W m^{-2}$); $R_{L\downarrow}$ é a radiação de onda longa incidente ($W m^{-2}$); e \mathcal{E}_o é a emissividade da superfície, adimensional.

A radiação de onda curta incidente foi determinada de acordo com a Equação 36:

$$R_{s\downarrow} = G_{sc} \times \cos\varphi \times dr \times \tau_{sw} \quad [36]$$

em que: G_{sc} é a constante solar (1367 W m^{-2}); $\cos \varphi$ é o cosseno do ângulo zenital solar; d_r é a distância inversa relativa entre a Terra e o Sol (rad)(Eq.18); τ_{sw} é a transmissividade atmosférica, adimensional (Eq. 30).

No cálculo da radiação de onda longa incidente aplicou-se a Equação 37:

$$R_{L\downarrow} = \varepsilon_a \times \sigma \times T_a^4 \quad [37]$$

em que: ε_a é a emissividade da atmosfera, adimensional; e T_a é a temperatura do ar medida na estação meteorológica do INMET no momento da passagem do satélite (K).

A emissividade da atmosfera é determinada conforme Equação 38, proposta por Bastiaanssen (1995):

$$\varepsilon_a = 0.85 \times (-\ln \tau_{sw})^{0.09} \quad [38]$$

A radiação de onda longa emitida foi calculada segundo Equação 39:

$$R_{L\uparrow} = \varepsilon_o \times \sigma \times T_S^4 \quad [39]$$

em que: σ é a constante de Stefan-Boltzman ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$); e T_S é a temperatura da superfície (K)(Eq.32).

A emissividade de banda larga do infravermelho termal (ε_o) é estimada conforme Equação 40:

$$\varepsilon_o = 0.95 + 0.001 \times IAF \quad [40]$$

em que: IAF é o Índice de Área Foliar, adimensional.

O Índice de Área Foliar (IAF) é um parâmetro biofísico indicador de biomassa da vegetação. Para sua determinação aplicou-se a Equação 41:

$$IAF = - \frac{\ln((0.69 - SAVI)/0.59)}{0.91} \quad [41]$$

em que: SAVI é o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo, adimensional.

O SAVI é estimado conforme Equação 42, e o objetivo de sua determinação é reduzir a influência do solo nos cálculos do Índice de vegetação para o modelo SEBAL.

$$SAVI = \frac{(1+L) \times (\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{(L + \rho_{NIR} + \rho_{RED})} \quad [42]$$

em que: L é o fator de ajuste do substrato do dossel, seu valor pode variar de 0 a 1 dependendo da densidade da vegetação. O presente estudo adotou o valor de 0,5.

Da parcela de energia que alcança o solo, uma fração é dissipada por emissão radiativa, outra quando aplicada aquece o solo, internamente, por processo de condução, sendo o fluxo de calor no solo. A fração restante aquece o ar na superfície próxima, diminuindo sua densidade através da convecção (PEREIRA et al.,2013). Para determinação do fluxo de calor no solo, empregou-se a Equação 43. Inicialmente, aplica-se a razão empírica G/R_n , posteriormente multiplica-se a razão obtida por R_n , para correta dedução de G ($W m^{-2}$) (BASTIAANSSEN, 2000).

$$\frac{G}{R_n} = (TS - 273.15) \times (0.0038 + 0.0074 \times \alpha) \times (1 - 0.98 \times NDVI^4) \quad [43]$$

Para determinação do fluxo de calor sensível, assume-se uma função linear entre TS e o gradiente de temperatura do ar (dT (K)), sendo feito um processo iterativo de correção até a condição de estabilidade atmosférica, e pode ser determinada conforme Equação 53 (BASTIAANSSEN, 1995). H ($W m^{-2}$) não pode ser mensurado de forma direta apenas com informações orbitais, primeiramente é estimado pela Equação 44 em condições neutras, onde se considera uma relação indireta entre dados provenientes de imagens de satélites e elementos meteorológicos.

$$H = \frac{\rho_{ar} \times C_p \times dT}{r_{ah}} \quad [44]$$

em que: ρ_{ar} é a densidade específica do ar ($1.15 kg m^{-3}$); C_p é o calor específico do ar à pressão constante ($1004 J kg^{-1} K^{-1}$); dT é a diferença de temperatura entre duas alturas (K); e r_{ah} é a resistência aerodinâmica do ar ao transporte de calor ($s m^{-1}$).

A resistência aerodinâmica é estimada inicialmente conforme Equação 45, considerando condições neutras da atmosfera. Seu resultado pode sofrer variações devido a razão entre duas alturas, do inverso da velocidade de fricção e da rugosidade do terreno.

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)}{u^* \times k} \quad [45]$$

em que: z_1 e z_2 representam as alturas acima da superfície vegetada (m); k é a constante de von Karman (0,41) e u^* é a velocidade de fricção na área de estudo ($m s^{-1}$), podendo ser calculada em condições atmosféricas neutras de acordo com a Equação 46:

$$u^* = \frac{k \times u_{200}}{\ln\left(\frac{z_x}{z_{om}}\right)} \quad [46]$$

em que: u_{200} é a velocidade do vento ($m s^{-1}$) na altura de mistura z_x , considerada no presente estudo igual a 200 m, conforme recomendação de Allen et al. (2002a); z_{omw} é um coeficiente de rugosidade para o transporte de *momentum* (m).

u_{200} para a altura de 200 m acima da estação meteorológica é dada pela equação 47:

$$u_{200} = u_* \frac{\ln\left(\frac{200}{z_{omw}}\right)}{k} \quad [47]$$

em que: u^* é a velocidade de fricção do vento ($m s^{-1}$), estimada pela Equação 48; z_{omw} é o coeficiente de rugosidade, ambos estimados para a estação meteorológica.

$$u_* = \frac{k \times u_x}{\ln\left(\frac{z_x}{z_{omw}}\right)} \quad [48]$$

em que: u_x é a velocidade do vento para coincidindo com o momento da coleta da imagem de satélite ($m s^{-1}$); z_x é a altura da coleta do dado (10m).

De acordo com Allen et al. (2002), o coeficiente de rugosidade para a estação pode ser estimado pela Equação 49. z_{om} para toda área de estudo pode ser determinada conforme Equação 50 (BASTIAANSSEN, 2000).

$$z_{omw} = 0.12 \times h \quad [49]$$

$$z_{om} = \exp(a \times NDVI + b) \quad [50]$$

em que: h é a altura média da vegetação em volta da estação, sendo considerado o valor padrão (0.30 m); a e b são coeficientes regressivos, que devem ser estimados para cada condição de estudo.

O valor da diferença de temperatura predefinida representa a condição de contorno seca/quente, onde supõe-se que a evapotranspiração apresente valores próximo de zero e o calor sensível como máximo (BASTIAANSSEN et al., 1998; ALLEN et al., 2007b). Espera-se que o valor de dT seja próximo da máxima diferença de temperatura entre um local úmido e bem vegetado (pixel “frio”), e uma área mais quente com solo exposto (pixel “quente”), para cada cena avaliada, sendo estes pontos considerados como pixels “âncoras”. Para estimativa de $dT_x(K)$ em cada pixel “âncora” utilizou-se a Equação 51:

$$dT_{SEBAL} = \frac{H_x \times r_{ahx}}{\rho_{arx} \times C_p} \quad [51]$$

$$dT = (b + a \times TS) \quad [52]$$

em que: x é referente ao pixel “frio” ou “quente”; a e b são coeficientes regressivos e após sua representação é possível estimar o valor mais coerente de H .

Para as condições de contorno de H_x assume-se:

$$H_{frio} = R_n - G - \lambda ET_{frio}$$

$$H_{quente} = R_n - G - \lambda ET_{quente}$$

onde é considerado que: λET_{hot} seja igual a 0; e λET_{cold} seja 5% maior que a ET_o (Eq.11).

No processo iterativo de correção para a condição de estabilidade atmosférica, deve-se ajustar o valor de r_{ah} , já que no primeiro momento foi considerada uma atmosfera neutra. Essa correção é feita aplicando-se a teoria de similaridade de Monin-Obukhov (L), sendo uma função do *momentum* e transporte de calor (ψ_m e ψ_h). L pode ser calculado pela Equação 53:

$$L = \frac{\rho_{ar} \times c_p \times u_*^3 \times TS}{k \times g \times H} \quad [53]$$

em que: g é a aceleração gravitacional (9.81 m s^{-2}).

Para valores de $L < 0$ declara-se que as condições da atmosfera são instáveis, quando $L > 0$ assume-se uma condição estável e para $L = 0$ a indicação é que haja neutralidade atmosférica. Conforme cada condição, são realizados cálculos do *momentum* e transporte de calor. O procedimento adotado até a estabilidade de L foi desenvolvido de acordo com a metodologia proposta em Allen et al. (2002). Após o cômputo de ψ_m e ψ_h , determina-se u^* e r_{ah} outra vez, de forma corrigida pelas Equações 54 e 55.

$$u^* = \frac{k \times u_{200}}{\ln\left(\frac{z_x}{z_{om}}\right) - \psi_m(200\text{m})} \quad [54]$$

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right) - \psi_h(z_1)}{u^* \times k} \quad [55]$$

Com os valores corrigidos de u^* e r_{ah} , a função dT é gerada mais uma vez, alimentando o processo iterativo com novos coeficientes efetuados. Dessa forma, é possível calcular dT e r_{ah} para cada pixel, até que ocorra estabilidade nos seus resultados.

No algoritmo SEBAL, a ETR é estimada com base na quantificação de fluxo de calor latente (λET (W m^{-2})), sendo este um resíduo do balanço de energia, indicado pela Equação 56. Dessa forma, λET equivale à energia aplicada no processo evapotranspirativo, podendo ser

utilizada para estimar a evapotranspiração real horária (ET_h (mm h⁻¹)). Empregando a fração evaporativa é possível definir a evapotranspiração real em escala diária (ETR_{SEBAL} (mm d⁻¹)) ao longo de toda imagem, de acordo com a Equação 57.

$$\lambda ET = Rn - G - H \quad [56]$$

$$ET_h = 3.600 \times \frac{\lambda ET}{\lambda} \quad [57]$$

em que: 3.600 equivale à conversão de 1 hora para segundos; λ é o calor latente de vaporização (J Kg⁻¹) (Eq.8).

$$ETR_{SEBAL} = ET_o F \times ET_o \quad [58]$$

em que: $ET_o F$ é a fração da evapotranspiração de referência (adimensional), estimada conforme Equação 59; ET_o é a evapotranspiração de referência da estação meteorológica (mm d⁻¹) (Eq.11).

$$ET_o F = \frac{ET_h}{ET_{o,h}} \quad [59]$$

em que: $ET_{o,h}$ corresponde à evapotranspiração de referência horária (mm h⁻¹).

3.2.5 Modelo SSEBop

No algoritmo SSEBop, a temperatura diária máxima do ar é relacionada com a TS, por meio da estimativa do coeficiente de calibração para cada imagem “c”, determinado pela Equação 60. O fator de correção da temperatura para cada *pixel* da imagem “ c_{pixel} ”, nas condições em que o NDVI > 0.80 e a TS > 270 K, foi obtido segundo Equação 61. Tais condições foram estabelecidas por representarem áreas com pleno desenvolvimento vegetativo e na ausência da cobertura de nuvens.

$$c_{pixel} = \frac{TS_{cold}}{T_a} \quad [60]$$

$$c = \frac{\sum_{i=1}^n c_{pixel(i)}}{n} \quad [61]$$

em que: TS_{cold} é a temperatura da superfície(K) nos *pixels* que apresentam a condição de NDVI > 0.80 e a TS > 270 K; T_a é a temperatura do ar medida na estação meteorológica no momento da passagem do satélite (K); c é o fator de correção da imagem (adimensional); c_{pixel} é o fator de correção referente a um dado *pixel* na imagem; e n é o número de *pixels*.

Na estimativa do valor de referência do pixel frio/úmido (T_c), aplicou-se a Equação 62. Após definição de T_c para cada imagem, a temperatura de superfície do pixel quente (T_h) é obtida pela adição da dT , em concordância com a Equação 63.

$$T_c = c \times T_a \quad [62]$$

$$T_h = T_c + dT_{SSEBop} \quad [63]$$

em que: T_c é a temperatura de superfície estimada para a condição de pixel frio (K); T_h é a temperatura de superfície estimada para a condição de pixel quente (K); e dT_x é a diferença de temperatura do ar entre dois níveis acima da superfície (K).

Na determinação de dT para o algoritmo SSEBop, foi utilizado o princípio do balanço de energia em condições de céu claro, onde considerou-se uma superfície com solo seco e exposto, de modo que os fluxos de calor latente e de calor no solo são assumidos como zero e assim, o fluxo de calor sensível é correspondente ao saldo de radiação (ALLEN et al., 2007b; BASTIAANSSEN et al., 1998). Em função dos parâmetros que envolvem a estimativa de dT , é importante registrar que seu valor não se modifica de um ano para o outro, se estiver sendo avaliado no mesmo local e período do ano (SENAY et al., 2013).

$$dT_{SSEBop} = \frac{Rn \times r_{ah}}{\rho_a \times C_p}$$

em que: Rn é o saldo de radiação em condições de céu claro ($W \ m^{-2}$), segundo metodologia proposta por Allen et al. (1998).

Conforme metodologia do SSEBop, a ETr é mensurada em mm/dia, com aplicação de dados multiespectrais e meteorológicos. Estes empregados em etapas anteriores são utilizados para determinar a fração evapotranspirativa da superfície (ETf), que foi estimada de acordo com a Equação 64. Dessa forma, a ETr pode ser obtida multiplicando-se a ETf pela ETo (grama), ajustada por um fator de escala (k), conforme Equação 65.

$$ETf = \frac{T_h - T_s}{dT} \quad [64]$$

$$ETr_{SSEBop} = ETf \times k \times ETo \quad [65]$$

em que: ETf é a fração evapotranspirativa, adimensional; ETo é a evapotranspiração de referência da estação meteorológica ($mm \ d^{-1}$) (Eq.11); k é o coeficiente que expressa a máxima evapotranspiração da cultura em relação à evapotranspiração de referência (ETo), adimensional.

ETf com valores negativos são convertidos a zero e seu valor máximo é limitado a 1,05. Como o seu valor se comporta de maneira constante ao longo do dia e durante a passagem do satélite, pode-se aplicar pontualmente seu valor para estimativas em escala diária (CHÁVEZ et al., 2008; CAMMALLERI et al., 2014b). O coeficiente k tem por finalidade representar um valor de referência máximo de evapotranspiração de uma cultura, que seja aerodinamicamente mais rugosa em relação à grama. Neste estudo, adotou-se o valor de 1,2 de acordo com a recomendação de Senay et al., (2013).

3.2.6 Análise estatística dos modelos SEBAL e SSEBop

Diante dos resultados da modelagem, avaliou-se a normalidade da distribuição da ETR_{RB} , ETR_{SEBAL} e ETR_{SSEBop} pelo teste de Shapiro-Wilk para amostras $n < 50$ (SHAPIRO; WILK, 1965) e pelo teste de Kolmogorov-Sminorv para amostras $n > 50$ (KOLMOGOROV, 1933), para os testes de normalidade, considera-se ($p > 0,05$) com distribuição normal. Em caso de distribuição normal, aplicou-se a análise de regressão linear simples e delimitou-se o intervalo de confiança (I.C) por análise de variância (ANOVA), com nível de confiança de 95% a um nível de significância ($\alpha=0,05$), entre os dados observados (X, ETR_{RB}) e estimados (Y, ETR_{SEBAL} ou ETR_{SSEBop}). Para as análises de regressão, caso ($p < 0,05$), rejeita-se a hipótese nula ($H_0: X=Y$) e conclui-se que X explicará as variações em Y e indicará a significância estatística da regressão.

As avaliações pelo indicador RMSE são deduzidas como medida do desvio médio quadrático entre os dados observados e aferidos. O indicador foi aplicado para avaliar a acurácia dos modelos SEBAL e SSEBop, conforme Equação 66. Quanto menor forem os resultados de RMSE alcançados, melhor será o desempenho dos modelos SEBAL e SSEBop em comparação à ETR_{RB} . Para estimativa do pRMSE aplicou-se a Equação 67.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2}{N}} \quad [66]$$

$$pRMSE(\%) = \sqrt{\frac{\frac{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2}{N}}{\frac{\sum_{i=1}^N O_i}{N}}} \cdot 100 \quad [67]$$

em que: M_i são os dados modelados de ETR_{SEBAL} e ETR_{SSEBop} ; O_i refere-se ao dado observado *in situ* da ETR_{RB} ; e N o número de observações.

O intuito de aplicação do índice BIAS é mensurar o quanto as estimativas da ETR_{SEBAL} e ETR_{SSEBop} se diferem dos valores reais determinados pela ETR_{RB} , e entre si. Para uso dos índices BIAS e pBIAS as Equações 68 e 69 foram utilizadas.

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)}{N} \quad [68]$$

$$PBIAS(\%) = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)}{\sum_{i=1}^N O_i} \quad [69]$$

O coeficiente de eficiência (E) foi elaborado por Nash & Sutcliffe (1970), sua aplicação em modelagens procura avaliar a concordância entre o modelo e a observação. É estimado de acordo com a Equação 70:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad [70]$$

em que: \bar{O} é a média dos valores observados.

Quanto à interpretação dos resultados de E, Van Liew et al. (2007) consideram que para $E > 0.75$ a performance dos modelos SEBAL e SSEBop serão boas, valores de $0.36 > E < 0.75$ são satisfatórios; e na condição de $E < 0.36$ os modelos seriam insatisfatórios.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme o desenvolvimento da metodologia proposta, foram geradas informações referentes ao comportamento dos componentes do balanço de energia, bem como, a demanda hídrica da cultura do trigo de inverno. Inicialmente, a apresentação dos resultados dos modelos ocorrerá de forma individual para posteriormente serem discutidas as avaliações conjuntas, a fim de determinar o desempenho dos modelos de sensoriamento remoto.

4.1 Balanço de energia e evapotranspiração pelo método da razão de Bowen

Segundo Slafer & Rawson (1994), o desenvolvimento do trigo pode ser dividido em três fases fenológicas, sendo elas: a fase vegetativa, que abrange desde a germinação da cultura até o primórdio floral; a segunda fase, reprodutiva, inclui o período de floração; já a terceira fase de enchimento dos grãos se estende até a completa maturação fisiológica do trigo. Os componentes do balanço de energia são influenciados pelas condições climáticas e pelo próprio crescimento da cultura. De acordo com a Figura 4 é possível observar as diferenças fenológicas durante o desenvolvimento da cultura do trigo. As imagens utilizadas pertencem ao relatório de manejo elaborado pela IRRIGA GLOBAL® para a SLC-Agrícola®.

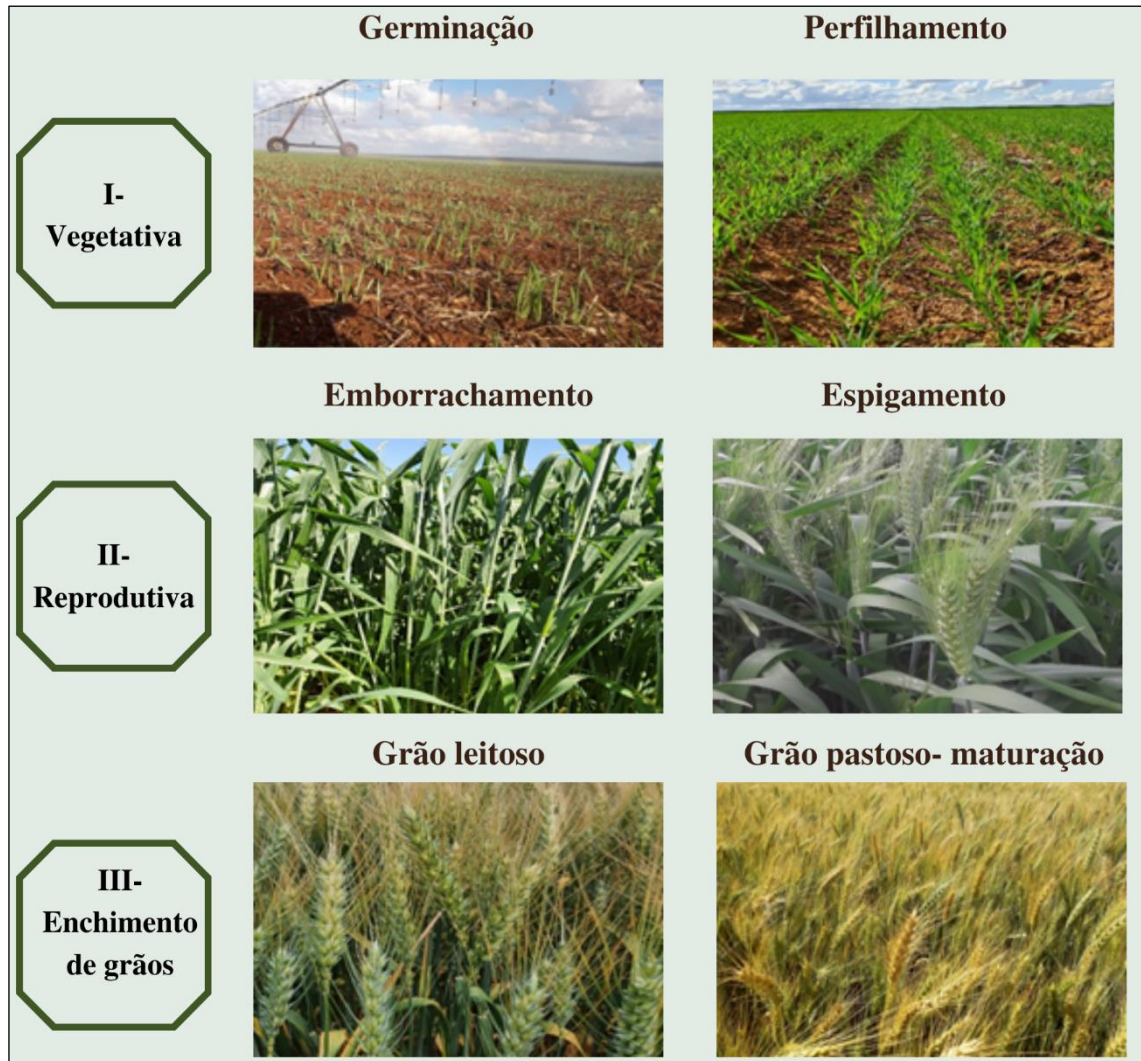


Figura 4. Fases fenológicas do desenvolvimento da cultura do trigo.

Por meio da análise de regressão linear, verificou-se que não haveria necessidade de ajuste para os dados de temperatura nos dois ciclos. Foram aplicados os filtros sugeridos por Perez (1999) para os valores de β , LE e H. Nos dois ciclos, os dados coletados por meio da estação 1, que esteve mais próxima ao centro do pivô, demonstraram menor porcentagem de inconsistência em relação à estação 2, conforme Tabela 5, e por isso foram adotados como parâmetro na estimativa diária da ETR_{RB} . Além disso, em 2018 a estação 2 apresentou problemas nos sensores de temperatura e umidade que precisaram ser substituídos, logo só foi possível monitorar o ciclo completo da cultura do trigo por meio da estação 1 nesse ano.

Tabela 5. Percentual total de inconsistência verificado por análise dos filtros de Perez (1999).

	Inconsistência (%)	
	2018	2019
Estação 1	4,3%	6%
Estação 2	13%	17%

Os parâmetros derivados do balanço de energia foram determinados para o período diurno, das 7 horas da manhã às 18 horas da tarde, quando $(RN - G) > 0$. Com base na avaliação diurna, verificou-se que a relação entre Y (LE+ H) e X (RN-G) foi de $(Y= 1,0229x)$ com R^2 de 0,97 para o ano de 2018 e $(Y= 0,9926x)$ com R^2 de 0,96 em 2019. A relação entre a soma dos fluxos com a energia disponível, indicam a validade das estimativas de LE e H em ambos os ciclos, e por essa razão conclui-se que o balanço de energia pôde ser bem representado pelos dados experimentais. Dessa forma, constata-se a acurácia das estimativas feitas pelo mRB, confirmando a precisão da metodologia para culturas agrícolas com desenvolvimento homogêneo no cerrado, relatada no trabalho de Hone & Luchiari Jr. (1981). De acordo com a literatura, a relação $(LE+H/RN-G)$ para o período diurno pode variar entre R^2 de 0,87 a 0,99 (CUNHA et al., 2002; FARIAS et al., 2004).

As variações totais dos componentes do balanço de energia foram determinadas a partir da integração dos valores médios horários para o período diurno, durante os ciclos da cultura do trigo, e são apresentadas nas Figuras 5 e 6, respectivas aos anos de 2018 e 2019. Com relação à partição de RN, observou-se a maior fração sendo destinada ao LE em ambos os períodos avaliados. No ciclo de 2018, a razão em porcentagem de (LE/RN) , (G/RN) e (H/RN) foi de 101,7%, 4,8% e -5,7%, respectivamente. Em 2019, os resultados mostraram que em média 88% da partição de RN foi destinada à LE, 7% para H e 5 % para G.

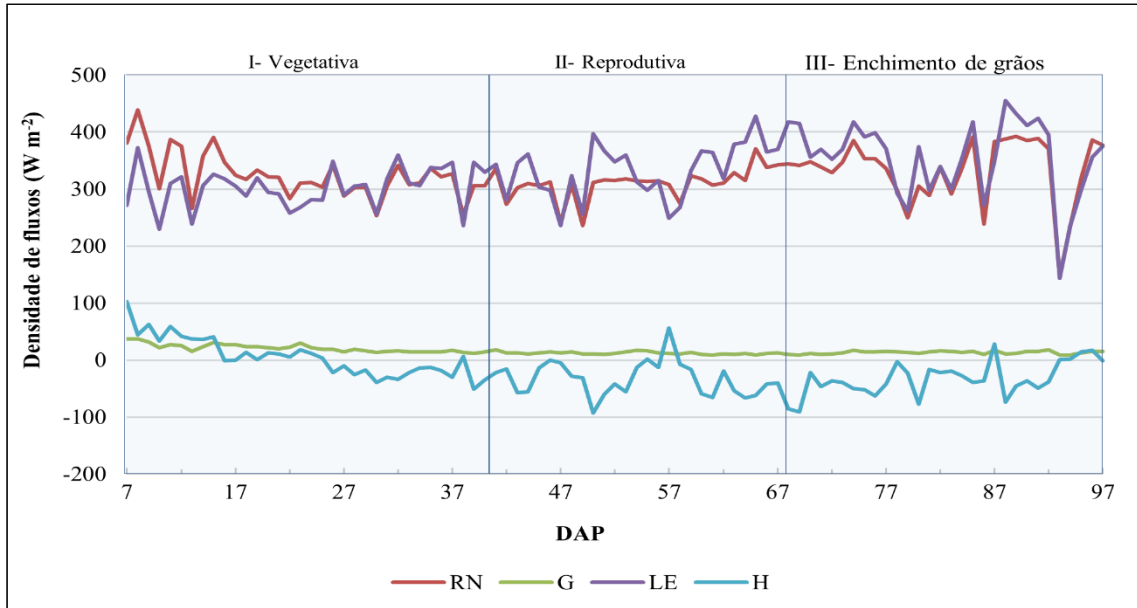


Figura 5. Variação média dos totais diurnos dos componentes do balanço de energia no ciclo de 2018 para a cultura do trigo na região de Cristalina (GO). RN - saldo de radiação; G- fluxo de calor no solo; LE- fluxo de calor latente; H- fluxo de calor sensível; DAP- dias após o plantio.

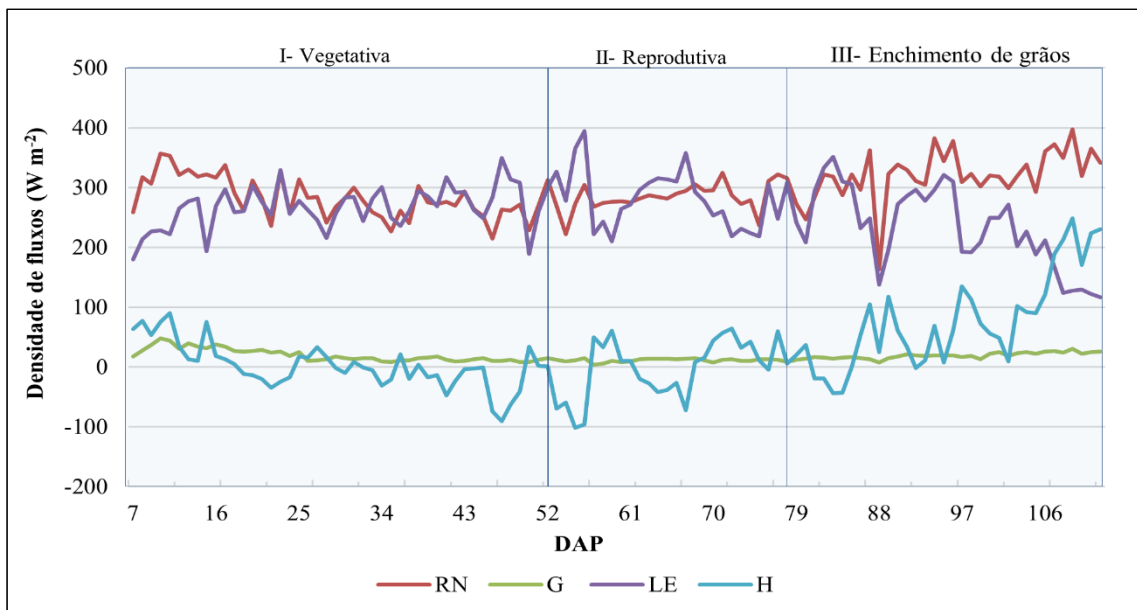


Figura 6. Variação média dos totais diurnos dos componentes do balanço de energia no ciclo de 2019 para a cultura do trigo na região de Cristalina (GO). RN- saldo de radiação; G- fluxo de calor no solo; LE- fluxo de calor latente; H- fluxo de calor sensível; DAP- dias após o plantio.

De acordo com a Figura 5, observa-se que LE se comporta de maneira semelhante à curva de RN durante a fase de emergência e no início do perfilhamento da cultura, com ETR_{RB} média de $4,39 \text{ mm d}^{-1}$. Após os 26 DAP, ainda em fase de perfilhamento, percebeu-se que LE passou a expressar médias horárias no período diurno superior à energia disponível, pois nessa fase a superfície do pivô apresentava maior cobertura vegetal e, com a redução da parcela de

solo exposto, menor quantia de energia esteve disponível para o aquecimento do ar. Esse comportamento se estendeu durante o emborrachamento e até a formação do grão leitoso aos 93 DAP, com irrigação média de 5,12 mm e ETR_{RB} com valor máximo de 7,41 mm d⁻¹. A partir dos 94 DAP o trigo iniciou o estágio fenológico de grão pastoso e atingiu o ponto de maturação da colheita aos 111 DAP. Contudo, por questão de logística da fazenda, o trigo foi colhido aos 126 DAP, o que não comprometeu as análises, pois a cultura já estava em processo de maturação fisiológica.

É comum que a fração (LE/RN) apresente resultados superiores às outras razões quando a camada superficial do solo tem boa disponibilidade hídrica, sendo assim, a maior parte do saldo de radiação será utilizado na evapotranspiração (FONTANA et al., 1991; LIMA et al., 2011). Em 2018, o cultivo do trigo teve finalidade comercial e, por esse motivo, a frequência da irrigação e o valor das lâminas aplicadas foram maiores em comparação ao ciclo de 2019 (Figuras 9 e 10), que foi de cunho experimental. Outra informação pertinente é que o pivô avaliado em 2018, conforme Figura 2 (P18), esteve circundado por uma extensa superfície sem cobertura vegetal e com umidade, temperatura e rugosidade descontínuas, condição que frequentemente originou correntes de ar quente em direção ao pivô.

Ainda de acordo com a Figura 5, nota-se que na maior parte do período avaliado em campo, H apresentou valores negativos durante o dia, em virtude da advecção local de ar seco no campo, indicado pela direção predominante do vento de Nordeste (NE) à Leste (E). Dessa forma, a constante presença de advecção e a boa disponibilidade hídrica contribuíram para que a proporção de (LE/RN) fosse maior que a unidade, evidenciando que H foi uma fonte adicional de energia e colaborou para o aumento da demanda evapotranspirativa.

Os dados de 2019 (Figura 6), foram coletados em um pivô que teve finalidade de cultivo experimental. Dessa forma, apenas ¼ da área foi cultivada com trigo e as outras frações corresponderam ao cultivo das culturas do algodão e do milho. Devido a antecipação do cultivo neste ano, o trigo passou um período maior na fase vegetativa, iniciando a fase reprodutiva somente aos 54 DAP, situação que ocorre devido às mudanças no fotoperíodo. Apesar da bordadura mínima não ter sido garantida nesse ano devido à redução da área experimental, verificou-se por meio do fechamento do balanço de energia em 100% que a maior contribuição de H foi destinada ao aquecimento do ar, e poucos foram os dias em que pôde ser observado a participação de H contribuindo na forma de energia adicional, como pode ser visto na Figura 6. Essa reação ocorreu, pois, diferentemente do posicionamento da área de 2018, em 2019 o pivô

esteve circundado por áreas constantemente cultivadas e sob sistema de irrigação, diminuindo a influência da temperatura das áreas circunvizinhas.

Assim que o milho e o algodão, cultivados no mesmo pivô central, atingiram a maturidade fisiológica, a frequência e o volume da lâmina de água aplicada reduziram, conseqüentemente diminuindo também o volume de água disponibilizado à cultura do trigo nesse período, que apresentou valor mínimo de ETR_{RB} de $2,01 \text{ mm d}^{-1}$. Após a colheita do milho e do algodão, a cultura do trigo já tinha atravessado o período reprodutivo, ficando aproximadamente 16 dias com restrição hídrica, conforme Figura 6. Estando a maior parte do solo do pivô (75%) sem cobertura vegetal durante as fases de enchimento do grão aos 88 DAP, até a completa maturação dos grãos trigo do trigo, observou-se o aumento da partição da energia disponível atribuída ao aquecimento do ar e do solo. Nesse período de baixa disponibilidade hídrica e com aquecimento da superfície descoberta dentro da área experimental, H demandou cerca de 24% de RN, sendo uma adição considerável se comparado aos 7% particionado durante todo o ciclo para H em 2019.

Avaliou-se o comportamento dos componentes do balanço de energia na situação de boa disponibilidade hídrica e presença de advecção (Figura 7), e na condição de restrição hídrica e ausência do efeito advectivo (Figura 8). Considerou-se na avaliação o mesmo estágio fenológico, na característica de grão leitoso, em ambos os ciclos.

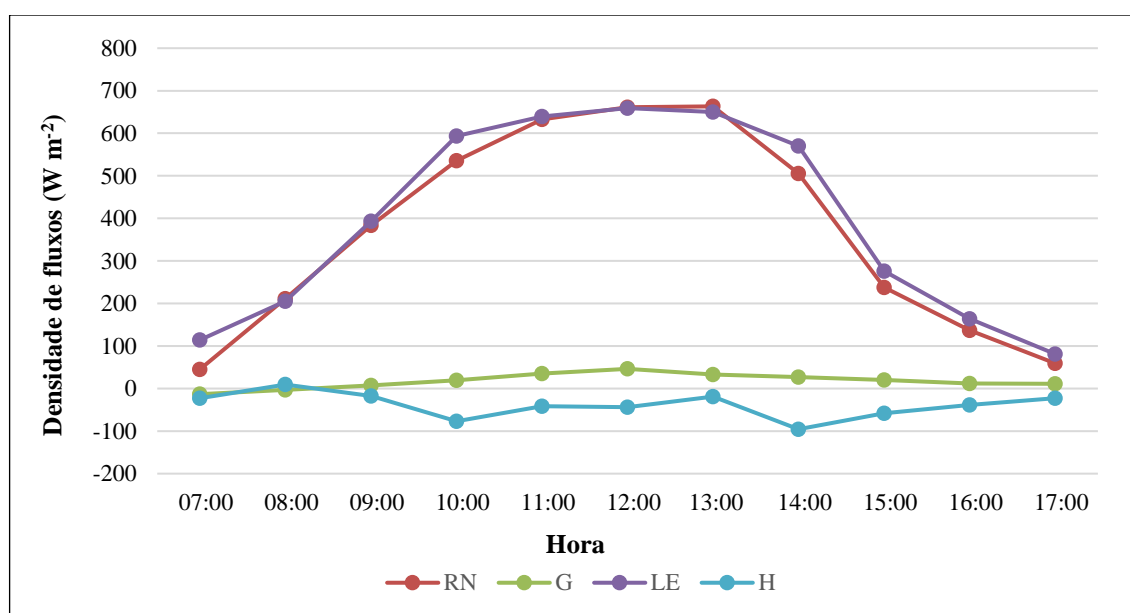


Figura 7. Variação diurna dos componentes do balanço de energia no dia 15/08/2018, aos 92 DAP, no estágio de grão leitoso da cultura do trigo na região de Cristalina (GO). RN - saldo de radiação; G- fluxo de calor no solo; LE- fluxo de calor latente; H- fluxo de calor sensível.

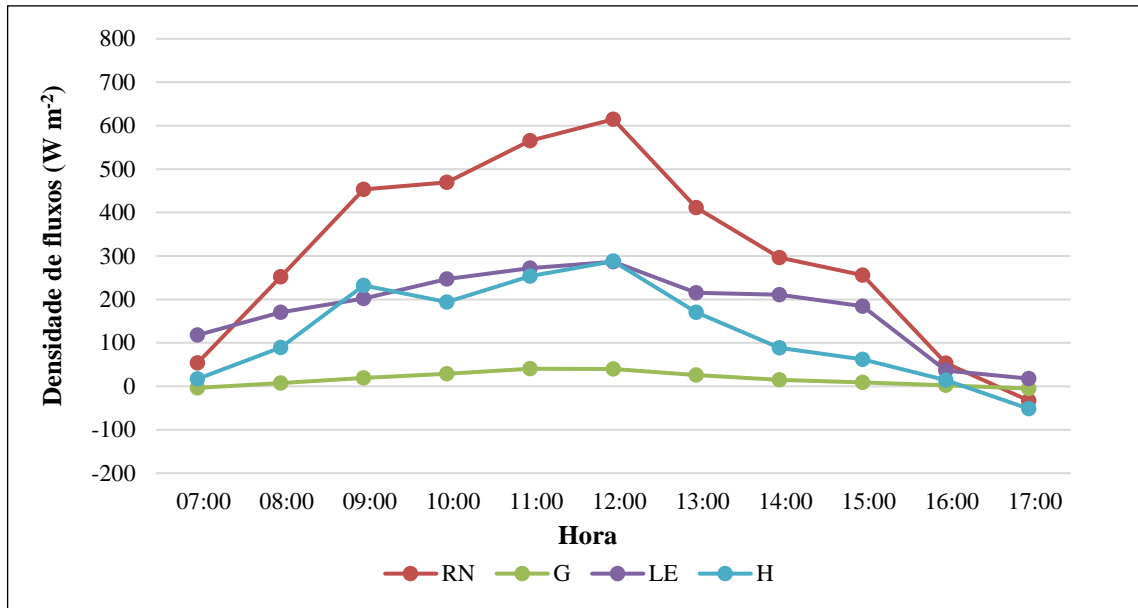


Figura 8. Variação diurna dos componentes do balanço de energia no dia 15/08/2019, aos 97 DAP, no estágio de grão leitoso da cultura do trigo na região de Cristalina (GO). RN - saldo de radiação; G- fluxo de calor no solo; LE- fluxo de calor latente; H- fluxo de calor sensível.

Os dias selecionados para análise individual da variação diurna dos componentes do balanço de energia foram dias de céu claro, com irradiância solar incidente (RS_{\downarrow}) máxima de $900 (W m^{-2})$ às 12:00 horas do dia 15/08/2018 e (RS_{\downarrow}) máxima de $898 (W m^{-2})$ às 12:00 horas do dia 15/08/2019 (97 DAP). A variação de G foi semelhante em ambos os dias avaliados, sendo positivo durante o período diurno, com 4,7% e 5,3% de RN, partição respectiva aos dias 15/08/2018 e 15/08/2019.

No dia 15/08/2018 (92 DAP) o solo apresentava umidade volumétrica de $0,25 cm^3$, com ETR_{RB} de $6,42 mm d^{-1}$ e na proporção de (LE/RN) de 107% e (H/RN) de -10,5%. Em 15/08/2019 o trigo estava atravessando o período de restrição hídrica com umidade volumétrica de $0,16 cm^3$, devido à colheita das culturas adjacentes no mesmo pivô. Com maior percentual de solo exposto H, correspondeu a 39% da energia disponível e 57% foi particionado para LE, resultando na ETR_{RB} de $2,83 mm d^{-1}$.

A partição dos componentes do balanço de energia mostra que na presença de advecção e boa disponibilidade hídrica LE pode superar a energia disponível (ROSENBERG, 1983; LUCHIARI JR. et al., 1997; TEIXEIRA et al., 1997; ALVES et al., 1998; CUNHA et al., 2002; SILVA et al., 2007). Prevedello et al. (2007), estimando a demanda de água para a cultura do trigo, certificaram que o fornecimento de água no decorrer do desenvolvimento da cultura gera efeitos na quantidade armazenada de água no solo, colaborando diretamente na partição de RN destinada à LE. Condições de restrição hídrica e ausência de advecção intensificam a partição

da energia para H, tornando o processo evapotranspirativo dependente do déficit de pressão de vapor e da resistência da superfície (MARIN et al., 2002; LIMA et al., 2011; SOUZA et al., 2015).

A frequência dos valores negativos de H, no período diurno durante o ciclo de 2018, sugerem a ocorrência de inversão térmica e indicam que o ciclo teve maior recorrência de advecção na forma de calor sensível em relação ao cultivo de 2019. Essa variação do comportamento do balanço de energia em condições advectivas também foi observado por Luchiari Jr. et al. (1997), que ao avaliarem a demanda hídrica do trigo irrigado no cerrado, observaram que em um ano mais advectivo H assumiu constantemente valores negativos, tornando a demanda de LE maior que a unidade. E em um ciclo do trigo em que se notou pouco ou nenhum efeito advectivo, a partição de energia correspondeu a 80% para LE, 13% para H e 7% em G. Alfonsi et al. (1986), analisando o comportamento do balanço de energia para a cultura do milho na região de Campinas-SP, verificaram que nos dias com maior efeito advectivo, a relação entre (LE/RN) foi de 1,04 e 1,33, excedendo a energia disponível. Nos dias em que não houve contribuição de calor advectivo, 84% da energia foi destinada ao processo de evapotranspiração, 2% para o aquecimento do ar e 14% foi empregue no aquecimento do solo.

Nas Figuras 9 e 10 são apresentadas as lâminas de água aplicadas e a estimada, pelo mRB, bem como, a variação da umidade volumétrica do solo durante os ciclos de 2018 e 2019.

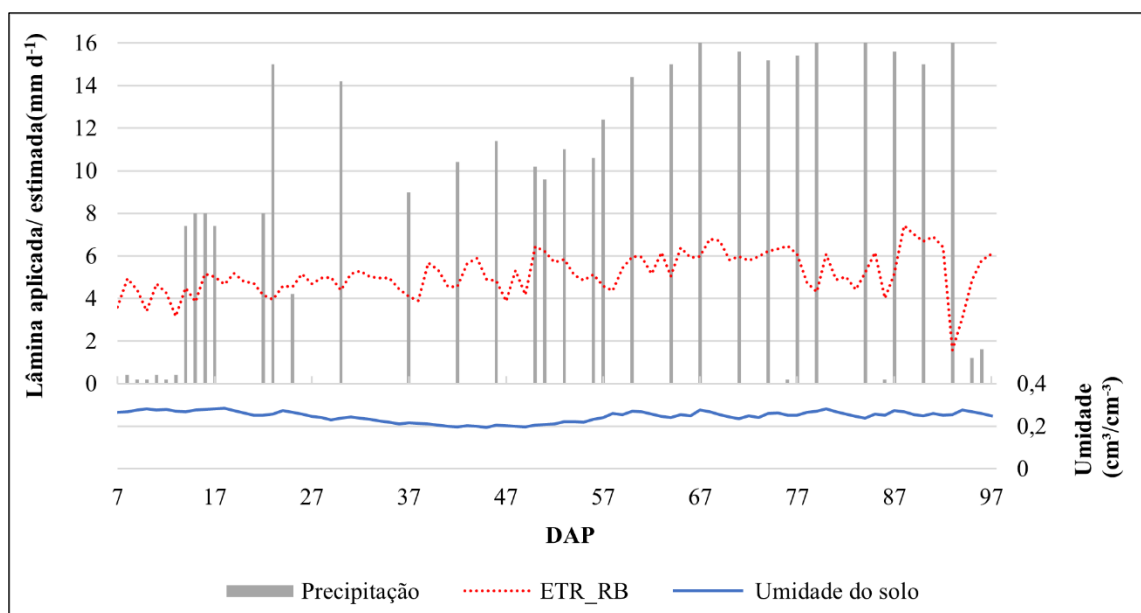


Figura 9. Distribuição da demanda e disponibilidade hídrica da cultura do trigo na região de Cristalina (GO) para o ciclo de 2018.

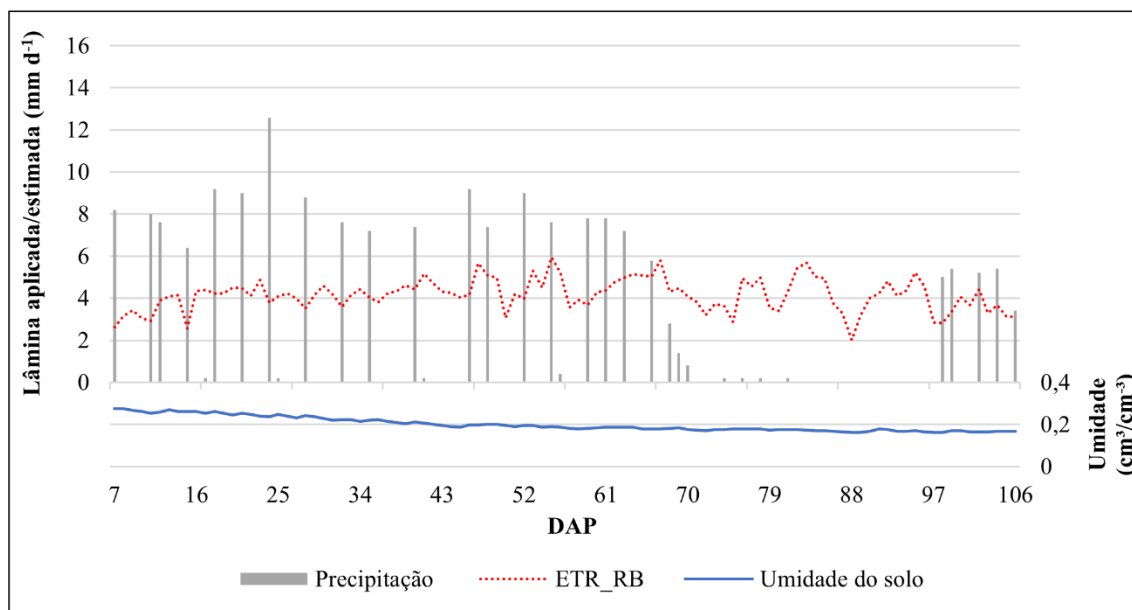


Figura 10. Distribuição da demanda e disponibilidade hídrica da cultura do trigo na região de Cristalina (GO) para o ciclo de 2019.

No experimento de 2018 a ETR_{RB} apresentou valor máximo de $7,41 \text{ mm d}^{-1}$ e média de $5,14 \text{ mm d}^{-1}$. O valor mínimo encontrado de $1,58 \text{ mm d}^{-1}$ foi observado no dia 16/08/2018 (93 DAP), e foi desconsiderado devido o percentual de inconsistência encontrado nas medições causado por um evento de irrigação. A lâmina acumulada em valores totais do ciclo foi de $467,15 \text{ mm}$ ($560,58 \text{ m}^3$).

Em 2019, os valores de ETR_{RB} máximo, mínimo e médio observados foram $5,94 \text{ mm d}^{-1}$, $2,46 \text{ mm d}^{-1}$ e $4,11 \text{ mm d}^{-1}$, respectivamente. A evapotranspiração total do ciclo correspondeu a lâmina de $421,63 \text{ mm}$ ($60,42 \text{ m}^3$). Apesar dos dias de restrição hídrica em 2019, os estágios de enchimento do grão do trigo não foram comprometidos em termos de desenvolvimento, sugerindo a hipótese de que nas camadas mais profundas do solo (30- 60 cm) havia água disponível, suprindo parcialmente as necessidades hídricas da cultura nesse período.

Nas mesmas condições de estudo e cultura, Malta (2019) encontrou a lâmina total de $448,4 \text{ mm}$ no ano agrícola de 2018 e $491,3 \text{ mm}$ no ciclo de 2019. A diferença dos valores totais em comparação com o presente estudo, deve-se a parametrizações de calibração distintas adotadas no desenvolvimento da metodologia. Ainda nas mesmas condições, Lopes (2018) obteve como valor total da evapotranspiração, 430 mm para a estação 1 e 454 mm para a estação 2, no ano de 2017.

Luchiari Jr. et al. (1997), afirmam que a demanda de água evapotranspirada e os termos do balanço de energia sofrem variações de um ciclo para o outro, devido à advecção regional. Em 1982, um ano menos advectivo, a evapotranspiração da cultura do trigo correspondeu a 345

mm por ciclo e em 1983, caracterizado pela ocorrência frequente de advecção, a quantidade de água evapotranspirada aumentou para 385 mm.

Os ciclos avaliados em 2018 e 2019 abrangem a estação seca no Cerrado, que tem início ao final do mês de abril e se estende até setembro (SETTE, 2005). De acordo com Azevedo (1988), na ausência de água proveniente da chuva, são necessários 500 a 600 mm de água para a cultura do trigo no cerrado, para alcance de produtividade entre 5.260 e 6.086 kg ha⁻¹. Para a cultura do trigo na região de Cristalina (GO), Azevedo (1997a) registrou uma lâmina total de 451 mm, com produtividade de 5.216 kg ha⁻¹. Em estudo mais recente, Rosário (2019) verificou que uma demanda hídrica do trigo de 447 mm pode resultar em rendimentos entre 5.820 e 6.240 kg ha⁻¹.

O balanço de energia para os ciclos de 2018 e 2019 puderam ser bem representados pelos dados experimentais, indicando a precisão do mRB e a possibilidade de sua aplicação para análise de desempenho de modelos que utilizam dados de sensoriamento remoto.

4.2 Aplicação do modelo SEBAL para estimativa da evapotranspiração real da cultura do trigo em condições de cerrado

Seguindo as etapas da metodologia proposta, foi realizada a estimativa da evapotranspiração real estimada pelo modelo SEBAL (ETR_{SEBAL}) na área de estudo durante as respectivas safras da cultura do trigo. As Figuras 11 e 12 trazem a distribuição temporal e espacial da ETR_{SEBAL} durante o ciclo fenológico da cultura em 2018. A estimativa da ETR_{SEBAL} durante a safra de 2019 estão apresentadas nas Figuras 13 e 14.

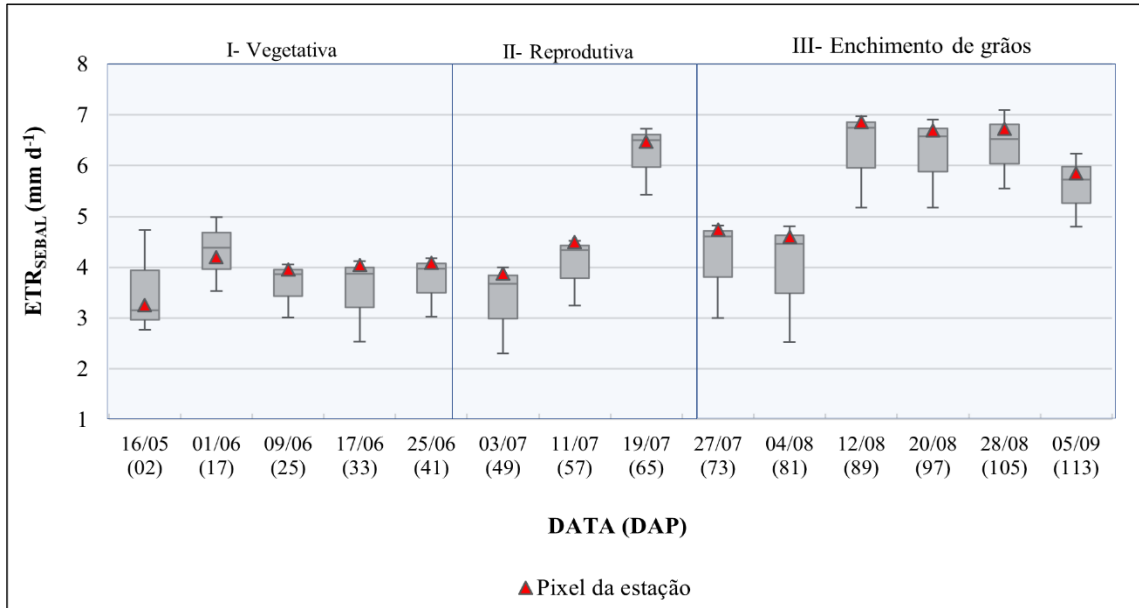


Figura 11. Distribuição temporal da ETR_{SEBAL} nos dias de passagem dos satélites com valores máximos, mínimos, médios e no pixel correspondente à estação micrometeorológica no pivô central do ciclo de 2018.

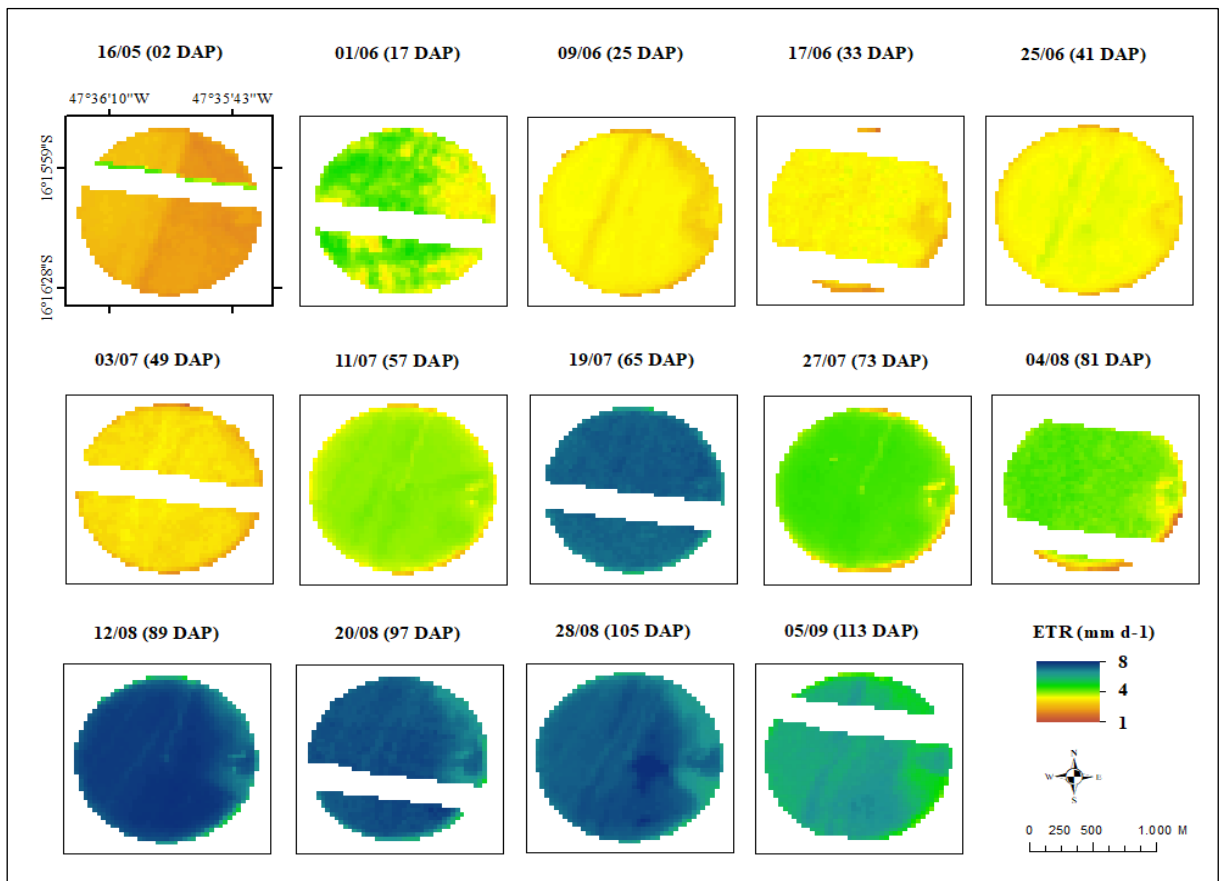


Figura 12. Distribuição espacial da ETR_{SEBAL} para o ciclo de desenvolvimento da cultura do trigo no ano agrícola de 2018 na região de Cristalina (GO).

Na safra de 2018, a estimativa da ETR_{SEBAL} apresentou valor máximo de 7,09 mm dia⁻¹, mínimo de 2,29 mm d⁻¹ e a média do ciclo foi de 4,53 mm d⁻¹. Durante a fase vegetativa de

16/05 à 25/06, dado que a cobertura vegetal no início do desenvolvimento da cultura é baixa, prevalece sobre a transpiração a evaporação do teor de água no solo, influenciando diretamente em taxas evapotranspirativas menores, como pode ser observado na Figura 8 na data de 16/05/2018 (02 DAP), onde o NDVI apresentou a média de 0,21. O trigo é uma cultura sensível à temperatura, o que implica em diferentes taxas evapotranspirativas de um estágio fenológico para outro. A baixa cobertura na fase vegetativa implica em TS mais elevada no interior da área irrigada, que variou nesse período entre 293 e 304 K.

Conforme o crescimento do trigo, e a garantia de uma boa disponibilidade hídrica durante todo o ciclo, a ETR_{SEBAL} demonstrou o primeiro pico na demanda na data 19/07/2018 (65 DAP), período em que o trigo estava na fase reprodutiva, e o NDVI teve o valor mais alto do ciclo de 0,86 observado nessa data. Essa elevação também pode ser justificada pela alta demanda atmosférica, que teve ETo de $5,03 \text{ mm d}^{-1}$, e em decorrência de uma alta lâmina de água aplicada no pivô central no dia anterior à imagem. Como pode ser percebido na Figura 12, na data de 27/07/2018 (73 DAP), há um declínio da ETR_{SEBAL} , decorrente da fase de enchimento dos grãos e que foi atenuado pelas menores temperaturas alcançadas no ciclo, variando entre 292 K e 300 K. Nesse período houve estabilidade nos valores de NDVI que variou entre 0,79 e 0,81.

O valor máximo de $7,09 \text{ mm dia}^{-1}$ foi observado no início da fase de maturação dos grãos na imagem referente à data de 28/08/2018 (105 DAP), com NDVI médio para todos os pixels do pivô de 0,53. A continuidade da alta demanda da ETR_{SEBAL} se estendeu até a completa maturação do trigo, onde a cultura também apresenta sensibilidade à temperatura elevadas. Ainda que, de modo geral, o trigo seja sensível à altas temperaturas, a cultivar aqui estudada (BRS 394) apresenta boa tolerância ao calor.

Na data de 05/09/2018 (113 DAP) houve um aumento da TS. Esses valores elevados da TS no final do ciclo foram observados na parte oeste do pivô, que é circundado por uma extensa área de solo exposto, além disso, há nessa direção maior porcentagem de cascalho, que retém menor volume de água em relação ao restante do pivô que tem uma proporção maior de argila.

Esse comportamento é semelhante à imagem de 16/05/2018 quando a maior parte do solo do pivô central estava exposto, diminuindo a estimativa da ETR_{SEBAL} na referida data, devido ao maior aquecimento do solo. A diferença na distribuição da energia no final do ciclo em forma de calor resultou no maior desvio padrão da ETR_{SEBAL} encontrado na data de 05/09/2018, correspondente a 0,32.

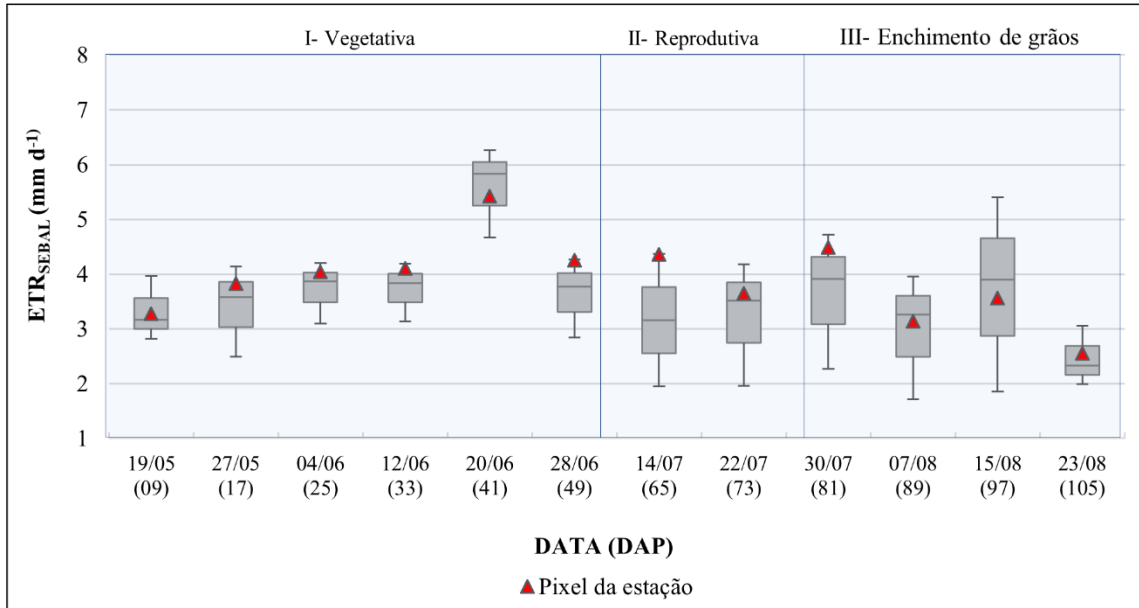


Figura 13. Distribuição temporal da ETR_{SEBAL} nos dias de passagem dos satélites com valores máximos, mínimos, médios e no pixel correspondente à estação micrometeorológica no pivô central do ciclo de 2019.

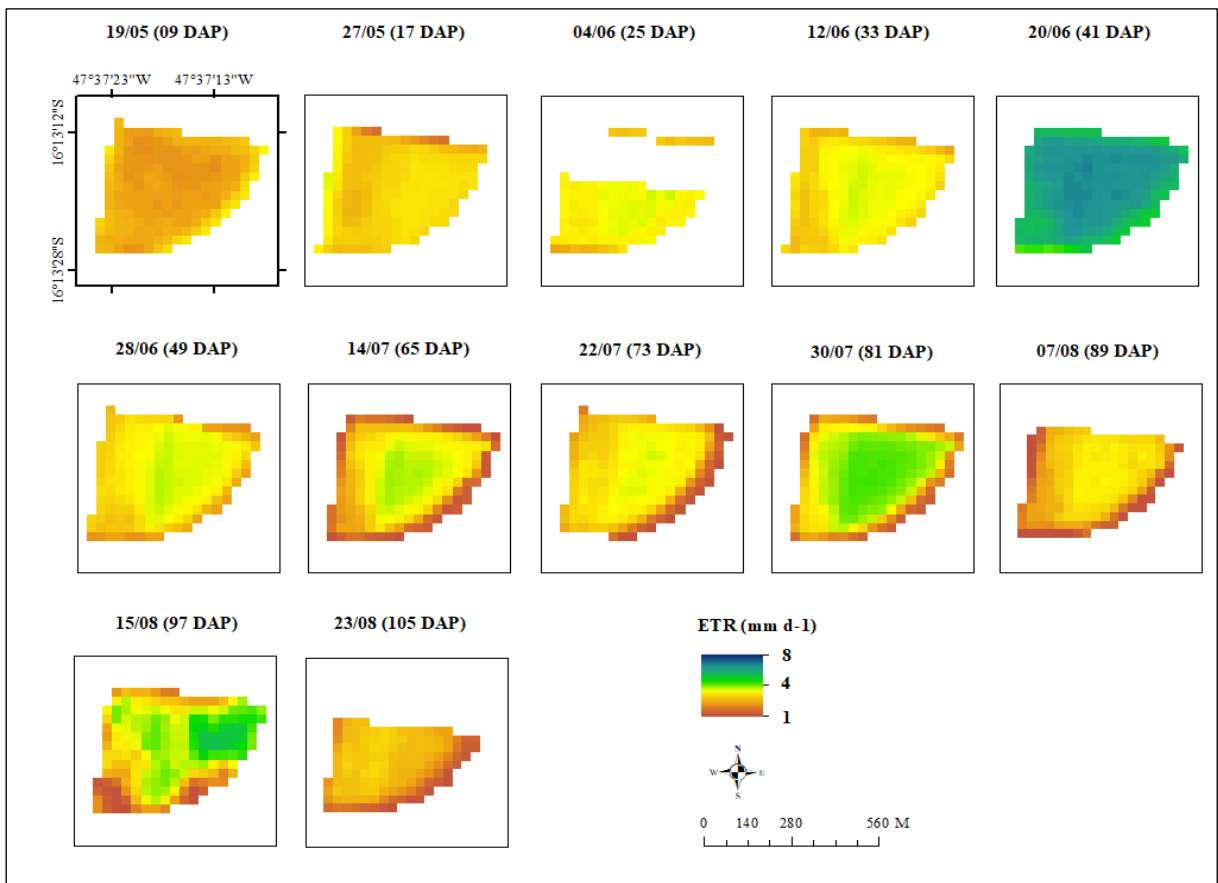


Figura 14. Distribuição espacial da ETR_{SEBAL} para o ciclo de desenvolvimento da cultura do trigo no ano agrícola de 2019 na região de Cristalina (GO).

O pivô central estudado na safra de 2019 teve finalidade experimental para a SLC-Agrícola e por essa razão apenas $\frac{1}{4}$ do pivô foi cultivado com a cultura do trigo. Mesmo com a área de estudo reduzida, manteve-se a densidade populacional da cultura de 4.000.000 pl/ha. Vale destacar que a densidade do dossel colabora para o aumento da temperatura no interior da área cultivada.

A ETR_{SEBAL} para o ciclo de 2019 teve como valor máximo $6,26 \text{ mm dia}^{-1}$, mínimo de $1,72 \text{ mm d}^{-1}$, valor observado nos pixels da borda do pivô e que não integra a análise de desempenho, e média de $3,43 \text{ mm d}^{-1}$. No início do ciclo, referente a data de 19/05/2019 (09 DAP), a cultura apresentou valor médio da ETR_{SEBAL} de $3,17 \text{ mm dia}^{-1}$ e NDVI de 0,23. Ao contrário do ciclo de 2018, em 2019 observa-se o pico no dia 20/06/2019 (41 DAP), ainda com a cultura na fase vegetativa, com NDVI de 0,60 onde foi encontrado o valor máximo de $6,26 \text{ mm dia}^{-1}$, resultante de um evento de irrigação realizado na data anterior de obtenção da imagem.

Após a colheita das culturas que foram cultivadas no mesmo pivô central, a frequência e o volume da lâmina de água aplicada reduziram, afetando diretamente a ETR_{SEBAL} do trigo. Já no estágio fenológico de reprodução no dia 22/07/2019 (73 DAP) a ETR_{SEBAL} estimada foi de $3,65 \text{ mm dia}^{-1}$, com variação do NDVI entre 0,71 e 0,63. Se comparado ao mesmo período com a safra de 2018, é possível relacionar essa baixa demanda evapotranspirativa com a insuficiência hídrica em que a cultura foi submetida. Nesse caso, considerando a área total do pivô, 75% do solo estava sem cobertura vegetal e assim, aumentando a partição da energia disponível para o aquecimento do ar e do solo e potencializando o efeito de um longo período sem irrigação expondo a cultura a maiores velocidades do vento no campo.

Em 15/08/2019 (97 DAP) o trigo estava na fase fenológica de maturação dos grãos, com NDVI médio de 0,67. Observou-se nesse período um aumento da TS, decorrente do próprio processo de maturação e maior demanda atmosférica com E_{To} de $4,65 \text{ mm d}^{-1}$. Nessa data a ETR_{SEBAL} teve como valor máximo $5,40 \text{ mm d}^{-1}$ e mínimo de $1,85 \text{ mm d}^{-1}$, que foi verificado nos pixels que estavam mais próximos da borda do pivô central, intensificado pela maior TS onde o solo estava exposto ao maior aquecimento do ar.

À medida em que diminuía a biomassa devido a maturação da cultura, na data de 23/08/2019 (105 DAP) o trigo apresentou variações de NDVI entre 0,54 e 0,39. A ETR_{SEBAL} média nessa data de passagem do satélite foi de $2,32 \text{ mm d}^{-1}$, a menor estimativa de todo o ciclo, atenuada pela TS máxima de 309 K e pela baixa umidade volumétrica de $0,16 \text{ cm}^3$, resultado muito abaixo da capacidade de campo de 0,30 a $0,40 \text{ cm}^3$ para solos argilosos.

Quando a cultura passa por um estresse hídrico, a cobertura vegetal tende a absorver uma quantidade menor de radiação solar, aumentando a reflectância no espectro visível, assim como, absorve mais radiação na faixa do infravermelho, situação que colabora para valores mais baixos de NDVI.

Haverá diferenças no quantitativo evapotranspirado na mesma cultura para condições irrigadas e não irrigadas, já que a boa disponibilidade hídrica leva ao aumento da evapotranspiração (SINGH et al., 2014). Conforme a literatura, essa distância quantitativa pode estar entre 6,11 mm d⁻¹ em um campo com facilidade de irrigação e decrescer aos 1,1 mm d⁻¹ se houver baixo fornecimento de água no cultivo do trigo durante o período experimental (RAWAT et al., 2017).

4.2.1 Análise de desempenho do modelo SEBAL

O desempenho do modelo SEBAL na determinação da evapotranspiração real da cultura do trigo foi realizada inicialmente nos dias de passagens dos satélites, em função da ETR_{RB} . Para correta validação do modelo utilizou-se os dados de ETR_{SEBAL} referente ao pixel da estação micrometeorológica, com os referidos dados da ETR_{RB} . A Figura 15 traz a correlação entre as metodologias para o ano de 2018 (a) e 2019 (b). A Tabela 6 apresenta os indicadores da análise estatística de desempenho da ETR_{SEBAL} . Por meio do teste de normalidade de Shapiro-Wilk ($p > 0,05$), verificou-se que a distribuição das estimativas de ETR não demonstraram diferença significativa de uma distribuição normal, permitindo aplicação da análise de regressão e do intervalo de confiança pela ANOVA.

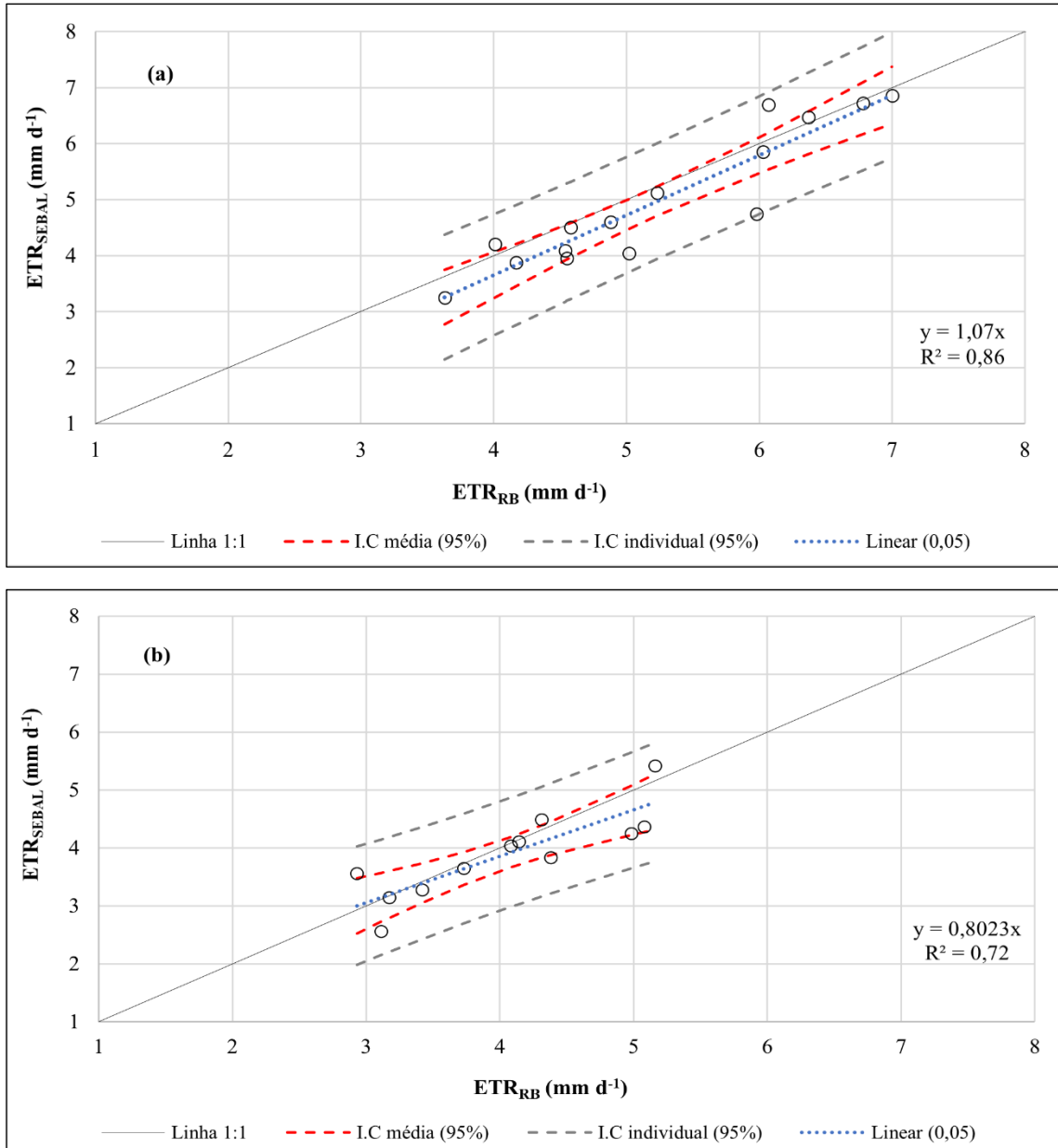


Figura 15. Correlação entre a ETR_{SEBAL} e a ETR_{RB} nas datas de passagem dos satélites para o ano agrícola de 2018 (a) e 2019 (b), no Intervalo de Confiança para a média e individual de 95 % a um nível de significância ($p < 0,05$).

Tabela 6. Indicadores da análise estatística de desempenho do modelo SEBAL nas datas de passagem dos satélites.

	2018	2019
R^2	0,86	0,72
RMSE	0,50	0,42
pRMSE	9,66	10,55
BIAS	-0,26	-0,15
pBIAS	-4,9	-3,71
E	0,75	0,68

De acordo com a análise de desempenho da ETR_{SEBAL} para o ano de 2018 (a), é possível verificar a forte correlação positiva obtida com um produto R^2 de 0,86 em comparação com os dados aferidos em campo. O p-valor $< 0,05$ da ANOVA indica que nas datas de passagem dos satélites não houve diferenças estatísticas significativas entre as médias dos métodos. O SEBAL apresentou RMSE de 0,50 mm e pRMSE de 9,66%, o que indica a diferença percentual dos valores reais. É possível verificar por meio da linha de tendência que o modelo SEBAL constantemente tendeu a subestimar a ETR, com breve diminuição para os valores mais elevados, onde a linha de tendência esteve mais próxima da reta 1:1. Em média, o modelo subestimou a ETR_{RB} em $-0,26 \text{ mm d}^{-1}$, ou aproximadamente -5%. De modo geral, a ETR_{SEBAL} teve um bom desempenho, confirmado pelo indicador E de 0,75. A variabilidade obtida é semelhante ao R^2 de 0,88 encontrado por Yang et al. (2015) e muito próximo do R^2 de 0,85 apresentado por Rawat et al. (2017), que em uma das validações compararam o SEBAL com método FAO-56.

No ano de 2019, devido à menor quantidade de imagens sem cobertura de nuvens, a comparação pode ser feita em menos datas. Como não foi observada diferença significativa entre os modelos (p-valor $> 0,05$), seguiu-se com a análise de regressão linear. O R^2 foi de 0,72 e verifica-se pela linha de tendência que nas datas de passagem dos satélites o modelo tendeu a subestimar a ETR_{RB} em $-0,15 \text{ mm d}^{-1}$ ou -3,71 %. Apesar de um RMSE menor, equivalente à 0,42, em termos percentuais a diferença entre o modelado e o observado foi de 10,55%. O coeficiente de eficiência E obtido de 0,68 indica que a ETR_{SEBAL} teve um desempenho satisfatório.

4.2.2 Demanda hídrica do trigo durante o período experimental estimada pelo modelo SEBAL

Para avaliação da ETR_{SEBAL} em estimativa diária a fim de determinar o consumo de água da cultura do trigo nas safras de 2018 e 2019, foi realizada a interpolação da fração evapotranspirativa, obtida como resíduo do balanço de energia com validade entre as passagens dos satélites. A fração evapotranspirativa foi multiplicada pelos resultados da ET_o com base nas informações da estação automática do INMET em Cristalina - Fazenda Santa Mônica (A056), para estimativas em escala diária. As Figuras 16 e 17 trazem as variações estatísticas das medições aferidas durante todo o ciclo do trigo.

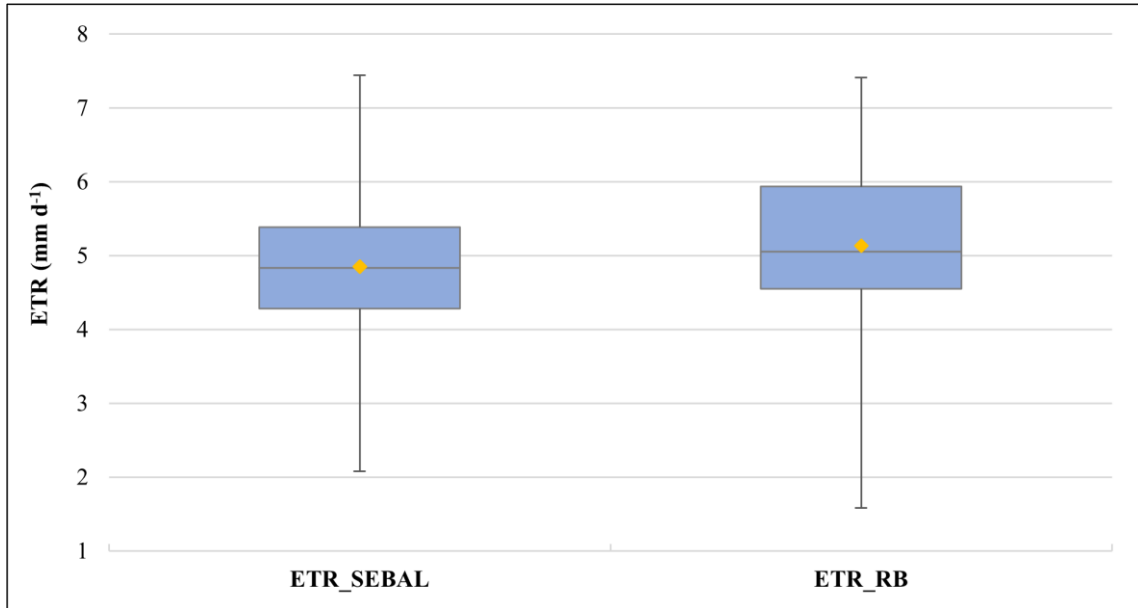


Figura 16. Gráfico tipo box plot da ETR_{SEBAL} e ETR_{RB} durante a safra de 2018.

Conforme apresentado na Figura 16, em 2018 a ETR_{SEBAL} em escala diária, teve como valor máximo, mínimo e médio de $7,43 \text{ mm d}^{-1}$, $2,66 \text{ mm d}^{-1}$ e $4,85 \text{ mm d}^{-1}$, respectivamente. A ETR_{RB} , mais sensível à umidade do solo, uma vez que fornece medidas pontuais, teve como valor máximo $7,41 \text{ mm d}^{-1}$, mínimo de $3,07 \text{ mm d}^{-1}$ e média de $5,14 \text{ mm d}^{-1}$, superior à mediana de $5,05 \text{ mm d}^{-1}$. Compreendendo toda a safra de 2018, a lâmina acumulada pela ETR_{SEBAL} foi de $451,56 \text{ mm}$, subestimando a ETR_{RB} em $15,6 \text{ mm}$.

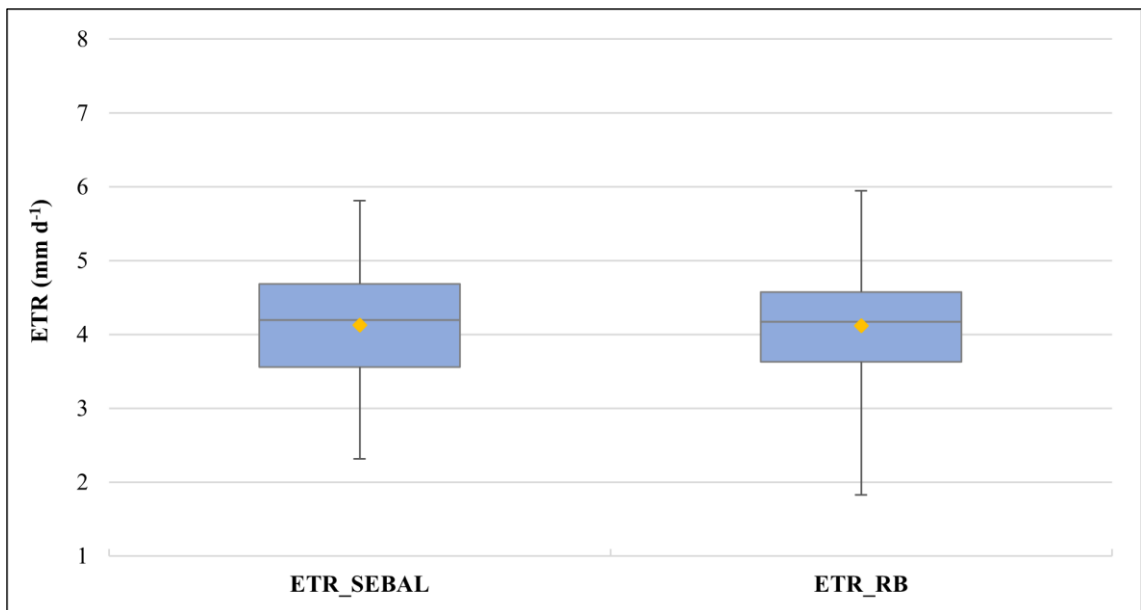


Figura 17. Gráfico tipo box plot da ETR_{SEBAL} e ETR_{RB} durante a safra de 2019.

No ano agrícola de 2019, o valor máximo determinado pela ETR_{SEBAL} foi de 5,80 mm d^{-1} , com mínimo de 2,31 mm d^{-1} e média 4,12 mm d^{-1} . Devido ao longo período sem eventos de irrigação, os valores da ETR_{RB} foram menores, comparativamente ao modelo. A máxima ETR_{RB} encontrada para o período foi de 5,94 mm d^{-1} , mínimo de 2,46 mm d^{-1} e média de 4,11 mm d^{-1} . De acordo com a Figura 17 é possível observar que a média entre o modelo e os dados de campo foram próximas. Ao todo, acumulou-se uma lâmina de 421,08 mm, superestimando a ETR_{RB} em 1,45 mm.

Por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov, verificou-se pelo p-valor $> 0,05$ que a distribuição da ETR_{SEBAL} se ajusta a distribuição normal. O p-valor $< 0,05$ da regressão em ambos os períodos indicam a significância estatística da regressão. Os indicadores de desempenho da ETR_{SEBAL} em escala diária estão demonstrados na Figura 18, 2018 (a) e 2019 (b), e na Tabela 7.

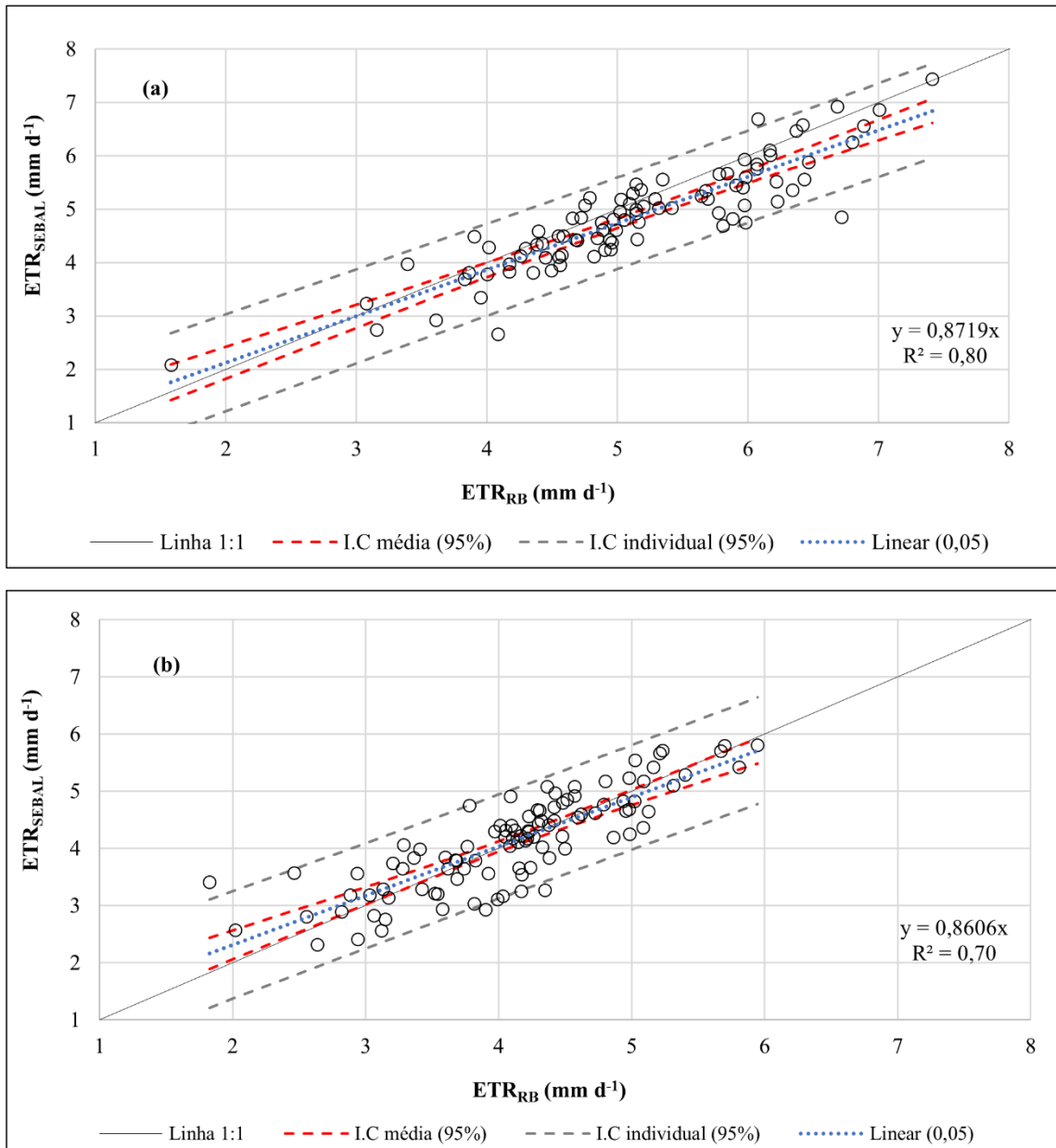


Figura 18. Correlação entre a ETR_{SEBAL} e a ETR_{RB} extrapolada para estimativas diárias para o ano agrícola de 2018 (a) e 2019 (b), no Intervalo de Confiança para a média e individual de 95 % a um nível de significância ($p < 0,05$).

Tabela 7. Indicadores da análise estatística de desempenho do modelo SEBAL extrapolado para estimativa diária.

	2018	2019
R²	0,80	0,70
RMSE	0,52	0,46
pRMSE	10,22	11,31
BIAS	-0,28	0,02
pBIAS	-5,4	0,35
E	0,72	0,66

As estimativas extrapoladas para aferição diária no decorrer do cultivo indicaram que o modelo foi capaz de representar 80% da variabilidade da ETR na safra de 2018, com RMSE de 0,52 mm e diferença percentual de 10,22%. Conforme a linha de tendência observa-se a sua proximidade com a reta 1:1, tendendo a subestimar os valores mais altos e superestimar os valores mais baixos. Em média, o SEBAL subestimou a ETR_{RB} em $-0,28 \text{ mm d}^{-1}$ ou $-5,4 \%$. Conforme coeficiente de eficiência E de 0,72 a ETR_{SEBAL} teve um desempenho satisfatório.

Em 2019 também se manteve um bom coeficiente de determinação de 0,70. Contudo, observa-se que na escala diária o modelo teve a maior diferença percentual de 11,31 % ou 0,46 mm e passou a superestimar a ETR_{RB} em 0,02 mm ou 0,35 %. A linha de tendência esteve mais próxima da reta 1:1 em relação as medidas pontuais verificadas no tópico anterior, pois na extrapolação propagou-se a superestimativa dos valores mais baixos alcançados pelo modelo. O coeficiente E de 0,66 foi o mais baixo da série histórica, mas ainda é classificado com um desempenho satisfatório.

De modo geral, os valores totais acumulados em ambos os ciclos possuem semelhança com as variações das lâminas encontradas para a cultura do trigo de inverno por outros estudos que aplicaram o modelo SEBAL, como pode ser observado na Tabela 8.

Tabela 8. Demanda hídrica do trigo de inverno por meio da aplicação do modelo SEBAL verificada na literatura

Autor	Área de Estudo	ETR_{SEBAL}	Desempenho
ZAWART; BASTIAANSSEN, (2007)	México	410 mm	Superestimativa de 8,8%
LI et al. (2008)	China	424 mm	Superestimativa de 4,3%
AHMED et al. (2010)	Sudão	396 mm	Subestimativa de $0,83 \text{ mm d}^{-1}$
YANG et al. (2015)	China	521,5 mm	$R^2: 0,88$
RAWAT et al. (2017)	Índia	Mínimo: 1,04 mm d^{-1} Máximo: 6,11 mm d^{-1}	$R^2: 0,85$ RMSE: $0,56 \text{ mm d}^{-1}$ BIAS: $0,26 \text{ mm d}^{-1}$

4.3 Aplicação do modelo SSEBop para estimativa da evapotranspiração real da cultura do trigo em condições de cerrado

Dado que a ETR_{SSEBop} é determinada como uma fração da ET_o , sua resposta é diretamente influenciada pelos dados de entrada requeridos pelo modelo. Possíveis contrariedades dos parâmetros de entrada no modelo SSEBop podem resultar em até 19% dos erros na estimativa da ETR, sugerindo grande impacto nos dados modelados (CHEN et al., 2016). Apesar da aplicação do modelo SSEBop nas mesmas condições e período por Malta (2019), fez-se necessário uma nova modelagem, a fim de garantir que os parâmetros de entrada fossem iguais aos aplicados no modelo SEBAL, bem como, por se tratar de uma estação meteorológica de referência mais próxima da área de estudo.

Para aplicação do modelo SSEBop, utilizou-se a mesma seleção das imagens Landsat 7 e Landsat 8, processadas anteriormente pelo algoritmo SEBAL, disponíveis no período de estudo, e na ausência de cobertura de nuvens para o correto mapeamento da ETR_{SSEBop} . O SSEBop demanda em sua metodologia, além das informações obtidas por sensoriamento remoto, parâmetros meteorológicos de entrada para a estimativa da ET_o e da dT . Na execução do modelo são definidas as condições de contorno, fundamentadas no balanço de energia, sendo predefinida para cada pixel a dT entre os pixels frio e quente de referência.

Inicialmente, a variabilidade espacial da ETR_{SSEBop} para a cultura do trigo foi determinada para os dias de passagem dos satélites, podendo o seu comportamento ao longo dos ciclos ser discutido utilizando as Figuras 19 e 20 para a safra de 2018 e Figuras 21 e 22 correspondendo ao ano agrícola de 2019.

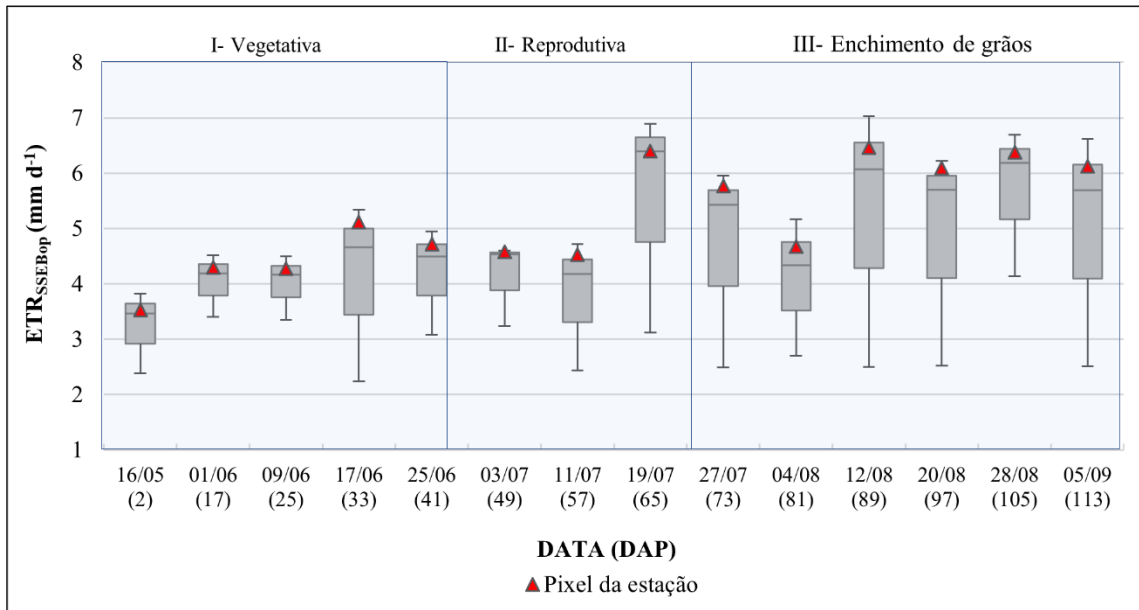


Figura 19. Distribuição temporal da ETR_{SSEBop} nos dias de passagem dos satélites com valores máximos, mínimos, médios e no pixel correspondente à estação micrometeorológica no pivô central do ciclo de 2018.

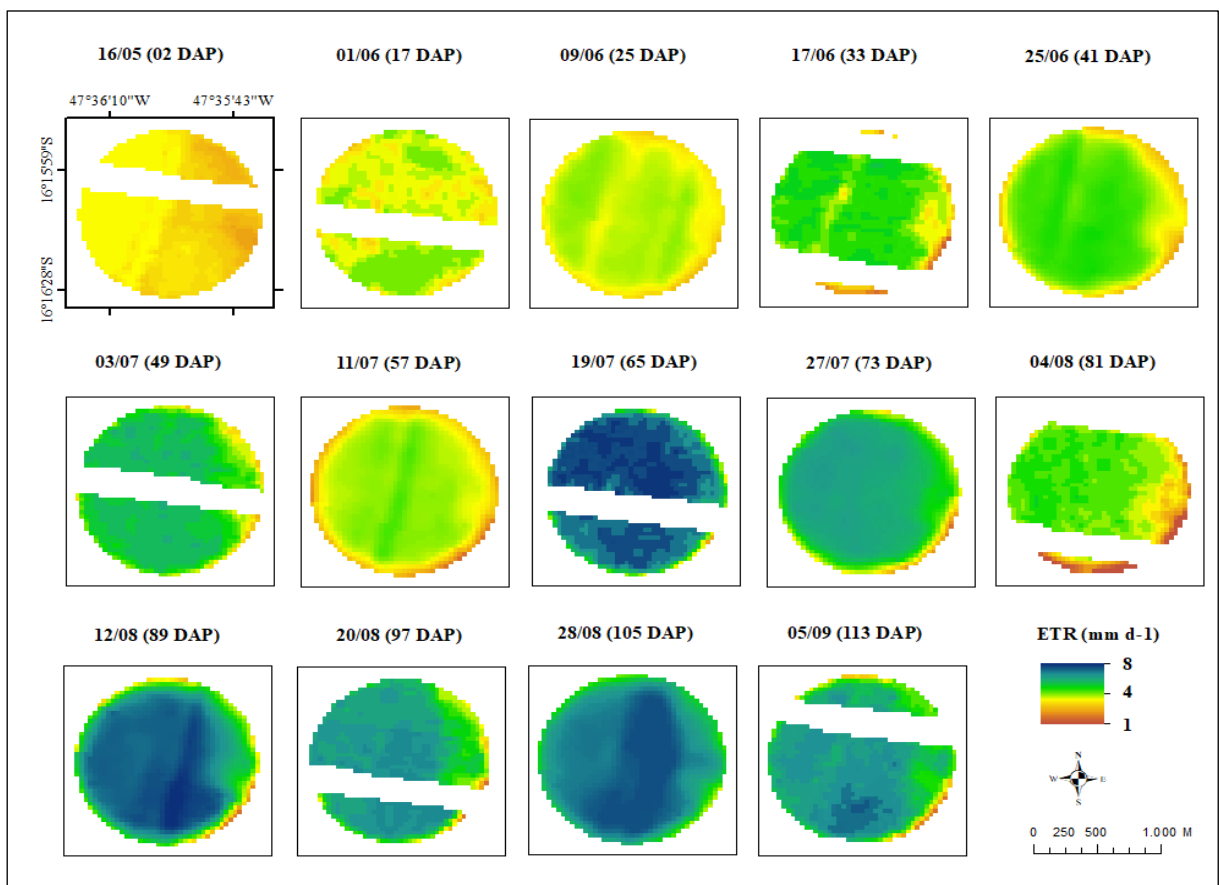


Figura 20. Distribuição espacial da ETR_{SSEBop} para o ciclo de desenvolvimento da cultura do trigo no ano agrícola de 2018 na região de Cristalina (GO).

Os resultados da ETR_{SSEBop} no ciclo de 2018 tiveram como valor máximo $7,03 \text{ mm d}^{-1}$, mínimo de $2,23 \text{ mm d}^{-1}$ e a média do ciclo foi de $4,20 \text{ mm d}^{-1}$. Conforme Figura 19, é possível notar que os valores do pixel correspondente à estação micrometeorológica estiveram, ao longo do ciclo, mais próximos dos valores médios dos pixels dentro do pivô central. Na data de 16/05 (02 DAP), a cultura encontrava-se na fase vegetativa com baixa cobertura vegetal, apresentando variações do NDVI entre 0,14 e 0,23. A demanda média da ETR_{SSEBop} na data em questão foi de $3,46 \text{ mm d}^{-1}$.

Em 19/07 (65 DAP), já na fase reprodutiva, que abrange o alongamento do colmo, emborrachamento e espigamento do trigo, observou-se as maiores demandas hídricas da cultura, com ETR_{SSEBop} média de $6,4 \text{ mm d}^{-1}$. Simultaneamente ao estágio fenológico, a boa disponibilidade hídrica e o aumento da exigência atmosférica também colaboraram para que as demandas se mantivessem altas no período. Nessa data, o NDVI alcançou o valor de 0,8, que representa o limite superior de desenvolvimento da biomassa fotossinteticamente ativa.

De acordo com as Figuras 19 e 20, é possível observar um declínio da ETR_{SSEBop} equivalente à data de 27/07 (73 DAP), quando o trigo estava no estágio reprodutivo de enchimento dos grãos. Apesar da ETR_{SSEBop} média entre os pixels do pivô central de $5,43 \text{ mm d}^{-1}$, a redução da estimativa deve-se à menor demanda atmosférica, com ETo de aproximadamente $3,62 \text{ mm d}^{-1}$ e TS mais amena, em torno de 296 K.

O modelo SSEBop considera que a dT entre a superfície do solo e do ar se relaciona de modo linear com a umidade do solo. Dessa forma, a ETR_{SSEBop} estabelece uma relação linear com a TS de cada pixel da imagem, variando proporcionalmente à dT dos pixels quente e frio (SADLER et al., 2000; SENAY et al., 2007). Essa relação, que também sofre influência da radiação solar e da cobertura vegetal, é ainda mais sensível à TS devido às variações de umidade dentro do pivô central, como pode ser visto na Figura 20 na data de 28/08 (105 DAP). Na referida data, observa-se claramente a variação da ETR_{SSEBop} na escala de valores mais elevados justamente nos pixels que apresentaram menores valores de TS. Diante do exposto, é possível afirmar que a ETR_{SSEBop} é mais sensível à TS do que ao NDVI, condição que é contrária às respostas do modelo SEBAL, que apresenta maiores variações espaciais conforme a cobertura vegetal.

Em 05/09 (113 DAP), a cultura do trigo já se encontrava no ponto de maturação de colheita. A TS mais elevada de 308 K foi constatada nessa data, o que resultou na ETR_{SSEBop} mínima de $2,51 \text{ mm d}^{-1}$ nas extremidades da borda do pivô central. A TS mais baixa de 298 K

no interior da área irrigada implicou em maior demanda hídrica de $6,62 \text{ mm d}^{-1}$. Equivalente ao período de maturação do trigo, o NDVI variou entre 0,47 e 0,23 nessa data.

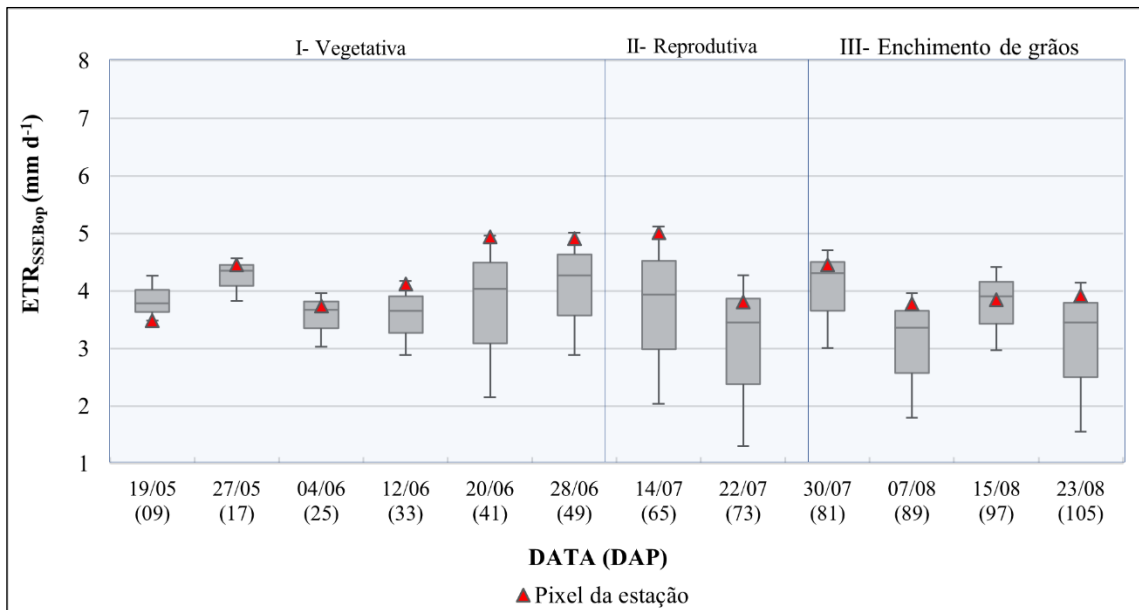


Figura 21. Distribuição temporal da ETR_{SSEBop} nos dias de passagem dos satélites com valores máximos, mínimos, médios e no pixel correspondente à estação micrometeorológica no pivô central do ciclo de 2019.

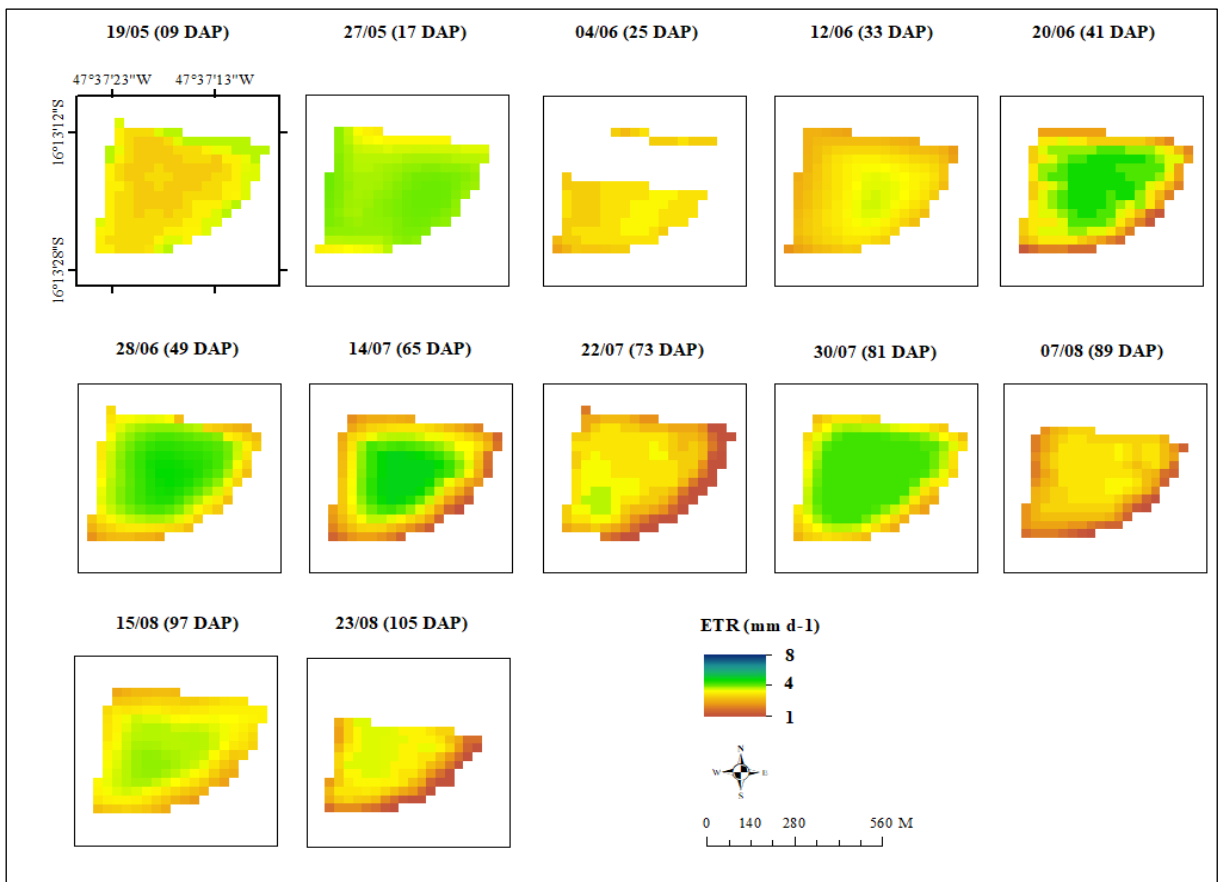


Figura 22. Distribuição espacial da ETR_{SSEBop} para o ciclo de desenvolvimento da cultura do trigo no ano agrícola de 2019 na região de Cristalina (GO).

No ciclo da cultura do trigo em 2019 a ETR_{SSEBop} teve como valor máximo $5,12 \text{ mm d}^{-1}$, mínimo de $1,02 \text{ mm d}^{-1}$ e média de $3,51 \text{ mm d}^{-1}$. No período inicial da cultura em 19/05/2018 (09 DAP) foi possível notar que a variação da ETR_{SSEBop} acompanhou as diferenças de temperatura no interior da área irrigada. O NDVI alternou entre 0,78 e 0,21, sendo 0,23 o valor encontrado no pixel referente à estação micrometeorológica. O valor mais alto de 0,78 logo no início do cultivo se deve à faixa de matéria seca, um resquício da cultura que antecedeu o plantio do trigo. A ETR_{SSEBop} média na data foi de $3,79 \text{ mm d}^{-1}$. O aumento da demanda hídrica foi percebido no dia 20/06 (41 DAP) com a cultura ainda na fase vegetativa, já tendo iniciado o perfilhamento, a ETR_{SSEBop} máxima foi de $4,96 \text{ mm d}^{-1}$. A TS e o NDVI em valores médios foram de 296 K e 0,66, respectivamente.

Em 22/07 (73 DAP) o trigo já se encontrava em estágio reprodutivo, e vale relembrar que devido à colheita das culturas que vinham sendo cultivadas no mesmo pivô central, a frequência e o volume de água aplicada reduziram, culminado em uma demanda hídrica mais baixa. A média da ETR_{SSEBop} foi de $3,46 \text{ mm d}^{-1}$ e NDVI no pixel da estação de 0,76. Notou-se também que nesse período a TS teve valores mais baixos, com mínimo de 292 K no interior do pivô e máximo de 300 K nos pixels da borda.

Com o trigo na fase de maturação dos grãos em 15/08 (97 DAP), percebeu-se uma maior demanda atmosférica e um suave aumento da TS, com média de 298 K. O NDVI médio foi de 0,63 e a ETR_{SSEBop} máxima de $4,42 \text{ mm d}^{-1}$. Como a maior parte do pivô estava com o solo descoberto, o trigo estava mais exposto ao aquecimento do ar, dificultando a uniformidade de distribuição da umidade, onde notou-se que os pixels das extremidades apresentaram valores de TS mais altos, conseqüentemente diminuindo a demanda hídrica que teve uma ETR_{SSEBop} mínima de $2,97 \text{ mm d}^{-1}$.

Natural ao processo de maturação dos grãos do trigo, a biomassa fotossinteticamente ativa reduziu, resultando em um NDVI médio de 0,39. A ETR_{SSEBop} média encontrada em 23/08 (105 DAP) foi de $3,46 \text{ mm d}^{-1}$, máxima de $4,14 \text{ mm d}^{-1}$ e mínimo de $1,56 \text{ mm d}^{-1}$, localizado nos pixels da extremidade da borda do pivô central.

4.3.1 Análise de desempenho do modelo SSEBop

Inicialmente, foi realizada a análise de desempenho do modelo SSEBop na estimativa da ETR para a cultura do trigo nos dias de passagem dos satélites. Os resultados da ETR_{SSEBop} referente ao pixel da estação micrometeorológica foram então comparados com dados de campo, pelo método da razão de Bowen. O p-valor $> 0,05$ encontrado pelo teste de Shapiro-Wilk confirma a distribuição normal das estimativas. A Figura 23 apresenta a variabilidade encontrada entre os dados observados e modelados para 2018 (a) e 2019 (b), bem como são trazidos na Tabela 9 os indicadores de desempenho da ETR_{SSEBop} .

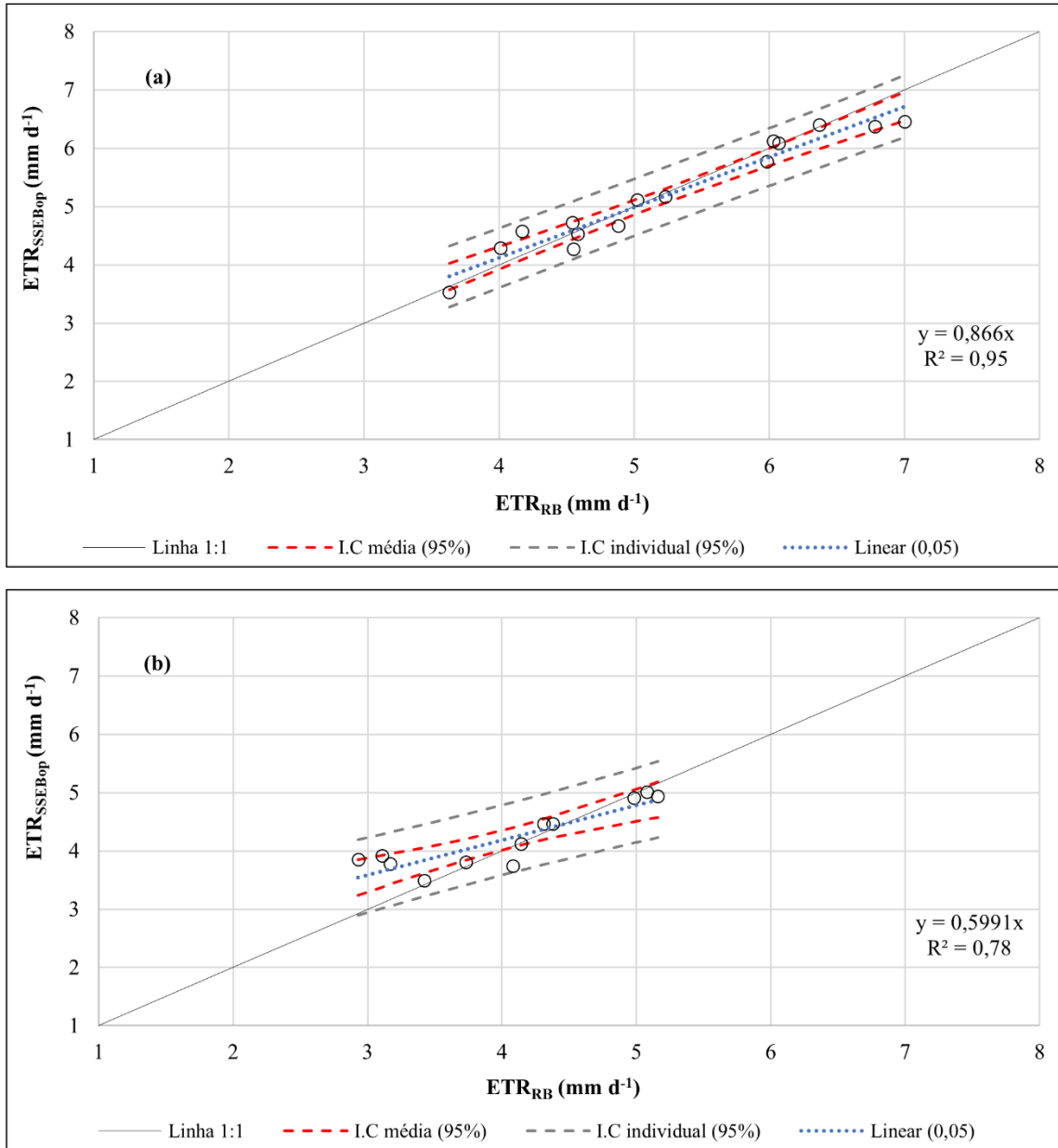


Figura 23. Correlação entre a ETR_{SSEBop} e a ETR_{RB} nas datas de passagem dos satélites para o ano agrícola de 2018 (a) e 2019 (b), no Intervalo de Confiança para a média e individual de 95 % a um nível de significância ($p < 0,05$).

Tabela 9. Indicadores da análise estatística de desempenho do modelo SSEBop nas datas de passagem dos satélites.

	2018	2019
R²	0,95	0,78
RMSE	0,25	0,41
pRMSE	4,76	10,32
BIAS	-0,05	0,16
pBIAS	-0,96	4,12
E	0,93	0,69

De acordo com a Figura 23 (a), é possível verificar a boa correlação da ETR_{SSEBop} com a ETR_{RB} em 2018, caracterizado pelo intervalo de confiança mais estreito, com R^2 0,95. Essa concordância pode ainda ser observada na linha de tendência, que se manteve paralela à linha 1:1, demonstrando a boa capacidade do modelo em representar os dados de campo. O modelo SSEBop tendeu a subestimar a ETR_{RB} em $-0,05 \text{ mm d}^{-1}$ ou $-0,96 \%$. O RMSE encontrado foi de $0,25 \text{ mm}$ ou $4,76\%$. Conforme o indicador de desempenho E de 0,93, pode-se afirmar que para as datas de passagem de satélite no ciclo de 2018, o modelo SSEBop teve um bom desempenho.

Na análise de 2019, verifica-se na Figura 23 (b) que a ETR_{SSEBop} , em comparação com a ETR_{RB} , apresentou um R^2 de 0,78, com bom desempenho. O p-valor $< 0,05$ da regressão indica a significância estatística do modelo. O SSEBop teve um RMSE de $0,41 \text{ mm}$ ou $10,32\%$. Em conformidade com os dados trazidos na Tabela 9, os indicadores estatísticos demonstram que a ETR_{SSEBop} superestimou em $0,16 \text{ mm d}^{-1}$ ou $4,12\%$ a ETR_{RB} , que também pode ser percebido pelo distanciamento da linha de tendência com a reta 1:1 e pela dilatação do intervalo de confiança. O coeficiente E, de 0,69, indica que nas datas de passagem dos satélites o SSEBop teve um desempenho satisfatório. Vale ressaltar que devido à cobertura de nuvens em 2019, dispôs-se de uma quantidade menor de imagens processadas para comparação em campo com os dados da ETR_{RB} .

4.3.2 Demanda hídrica do trigo durante o período experimental estimada pelo modelo SSEBop

A fim de determinar a demanda hídrica da cultura do trigo por meio do algoritmo SSEBop, a ETR_{SSEBop} foi também determinada para os dias entre a obtenção das imagens. De acordo com Senay et al. (2016), a extrapolação das estimativas para resultados em escala diária deve ser feita com base nos dados da ET_o da estação de referência, multiplicando-se pelas frações evapotranspirativas alcançadas nos dias de aquisição das imagens. As Figuras 24 e 25 trazem as distribuições aferidas pelo SSEBop e pela razão de Bowen durante todo o ciclo da cultura do trigo.

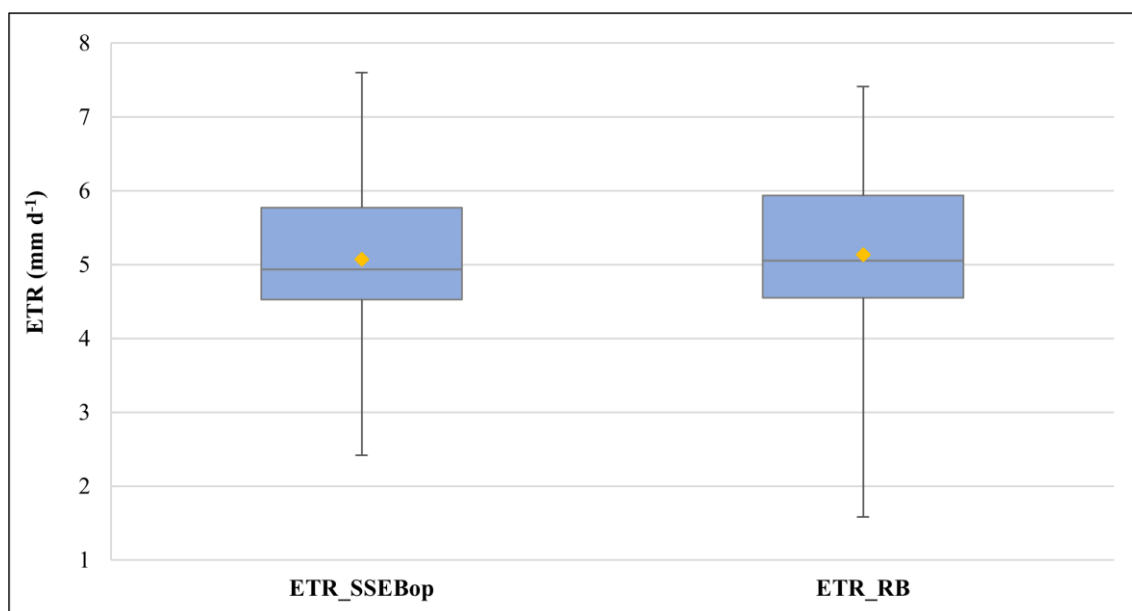


Figura 24. Gráfico tipo box plot da ETR_{SSEBop} e ETR_{RB} durante a safra de 2018.

Conforme apresentado na Figura 24, a ETR_{SSEBop} no ciclo de 2018 teve como valor máximo $7,60 \text{ mm d}^{-1}$, mínimo de $3,02 \text{ mm d}^{-1}$ e média do ciclo de $5,07 \text{ mm d}^{-1}$. Os valores mínimos na série da ETR_{SSEBop} de $2,41 \text{ mm d}^{-1}$ e de $1,57 \text{ mm d}^{-1}$ na ETR_{RB} foram encontrados já no período de maturação do trigo, decorrente de uma menor demanda atmosférica na data de 16/08/2018 (98 DAP). De modo geral, os limites superior, inferior e médio da ETR_{SSEBop} muito se aproximaram dos limites estabelecidos com as medições em campo da ETR_{RB} , que teve a lâmina máxima de $7,40 \text{ mm d}^{-1}$, mínimo de $3,07 \text{ mm d}^{-1}$ e média de $5,13 \text{ mm d}^{-1}$. Compreendendo toda a safra de 2018, a lâmina acumulada pela ETR_{SSEBop} foi de $461,72 \text{ mm}$, subestimando a ETR_{RB} em $5,43 \text{ mm}$.

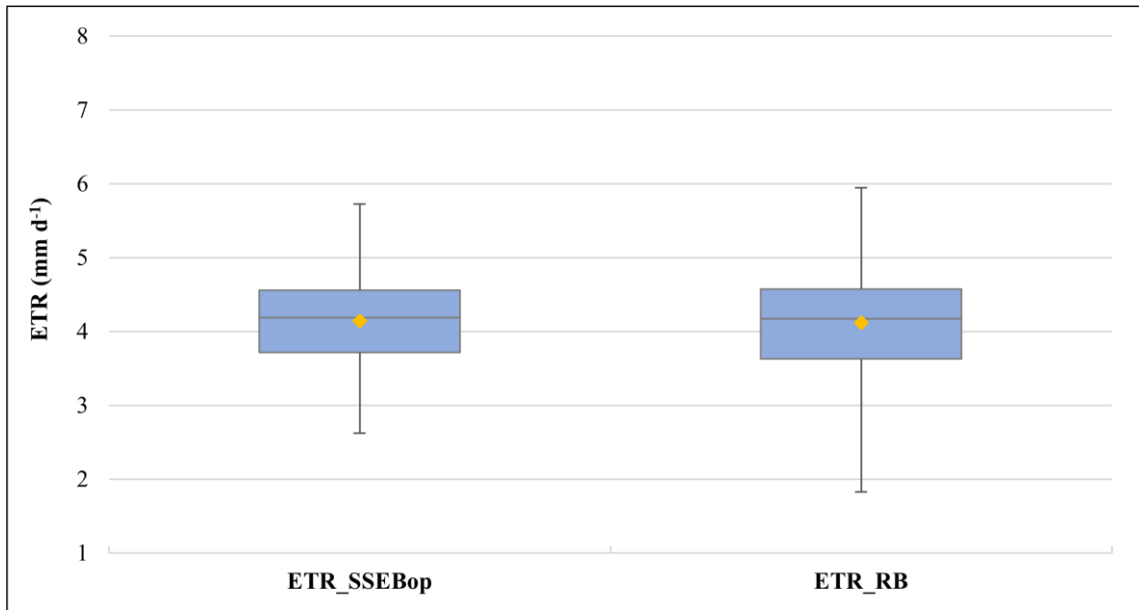


Figura 25. Gráfico tipo box plot da ETR_{SSEBop} e ETR_{RB} durante a safra de 2019.

Em 2019, a estimativa máxima obtida pela ETR_{SSEBop} foi de $5,72 \text{ mm d}^{-1}$, mínima de $2,61 \text{ mm d}^{-1}$ e média de $4,14 \text{ mm d}^{-1}$. A baixa umidade volumétrica do solo na fase de maturação da cultura, em decorrência da ausência de eventos de irrigação, explica os valores de $2,01 \text{ mm d}^{-1}$ e $1,82 \text{ mm d}^{-1}$ encontrados pela ETR_{RB} . De modo geral, tanto as estimativas da ETR_{SSEBop} quanto da ETR_{RB} foram inferiores aos resultados apresentados em 2018, por se tratar de um cultivo experimental, as lâminas de água e a frequência da irrigação no pivô estudado em 2019 foram menores. Essa condição resultou em uma demanda hídrica menor ao longo de todo o cultivo, que acumulou a ETR_{SSEBop} de $422,61 \text{ mm}$, superestimando a ETR_{RB} em $2,98 \text{ mm}$.

Pelo teste de Kolmogorov-Smirnov o p-valor foi maior que o nível de significância de $0,05$, confirmando a distribuição normal. Os indicadores de desempenho da ETR_{SSEBop} em escala diária estão demonstrados na Figura 26, 2018 (a) e 2019(b), e na Tabela 10.

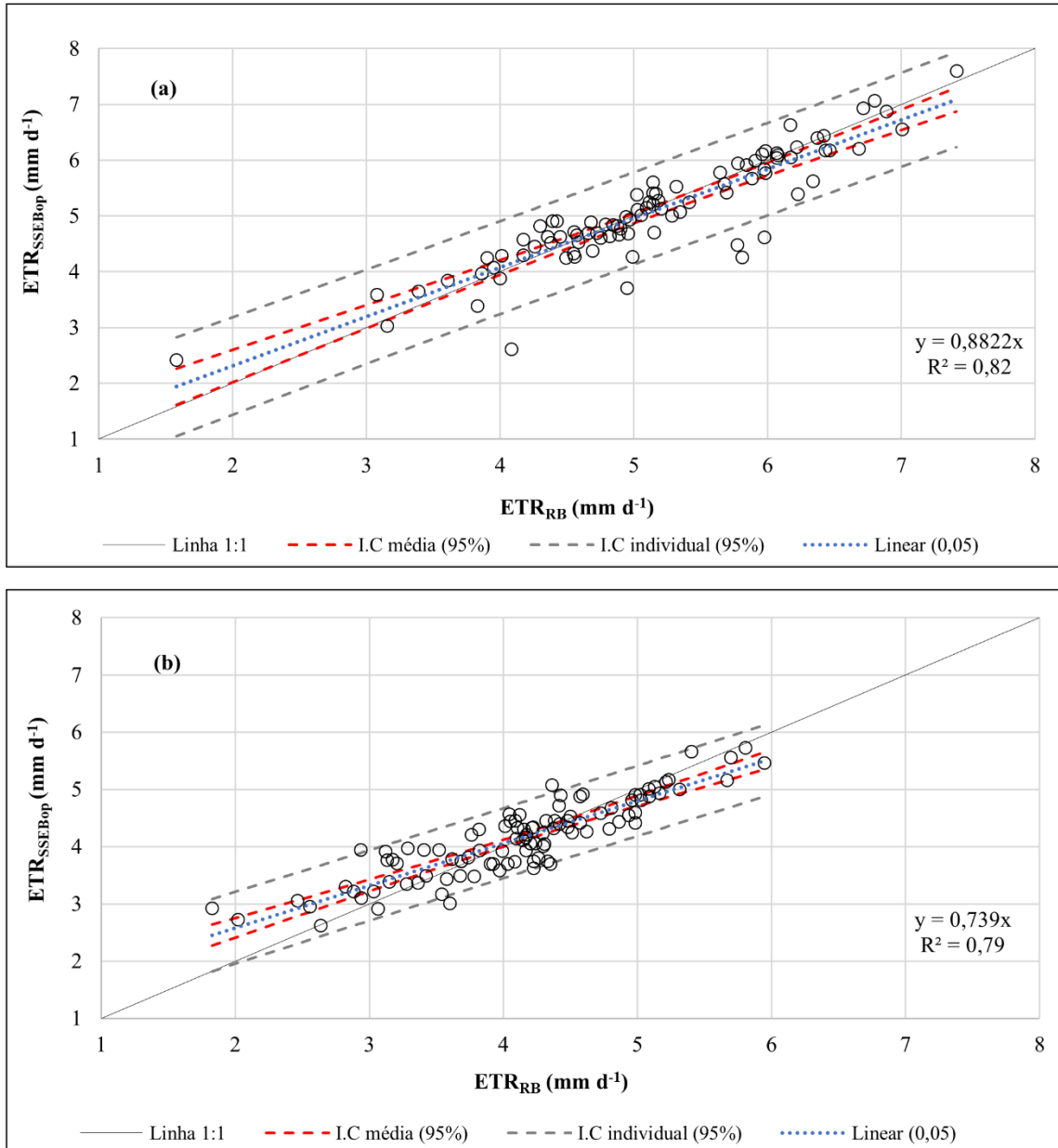


Figura 26. Correlação entre a ETR_{SSEBop} e a ETR_{RB} extrapolada para estimativas diárias para o ano agrícola de 2018 (a) e 2019 (b), no Intervalo de Confiança para a média e individual de 95% a um nível de significância ($p < 0,05$).

Tabela 10. Indicadores da análise estatística de desempenho do modelo SSEBop extrapolado para estimativa diária.

	2018	2019
R^2	0,82	0,79
RMSE	0,43	0,36
pRMSE	8,36	8,98
BIAS	-0,06	0,03
pBIAS	-1,16	0,71
E	0,80	0,78

Verifica-se na Figura 26 (a) que o R^2 de 0,82 indica que o modelo SSEBop simulou de forma adequada a evapotranspiração real da cultura do trigo, sugerindo que a variabilidade observada da ETR pôde ser bem representada pelo modelo. Afirmativa que foi confirmada pelo p-valor $< 0,05$ da regressão linear, bem como, pela proximidade da linha de tendência com a reta 1:1. Os indicadores apresentados na Tabela 10, respectivos ao ciclo de 2018, demonstram por meio do BIAS que, de modo geral, o SSEBop subestimou a ETR em $-0,06 \text{ mm d}^{-1}$ ou $-1,16 \%$. O erro quadrático médio produzido pelo modelo foi de $0,43 \text{ mm}$ ou $8,36 \%$. O indicador de desempenho E de 0,80 obtido na extrapolação diária, confirma o bom desempenho do modelo SSEBop tanto para a análise pontual quanto na escala diária no experimento de 2018.

Na extrapolação da ETR_{SSEBop} realizada no ciclo de 2019, obteve-se o R^2 de 0,79, indicando a boa relação entre o dado modelado e o observado. O p-valor $< 0,05$ da ANOVA permite concluir que nem todas as médias dos valores preditos foram iguais as médias observadas. O indicador RMSE, utilizado para representar a média da magnitude do erro gerado pelo SSEBop, apresentou a diferença em valores reais de $0,36 \text{ mm}$ e percentuais de $8,98\%$. As variações do erro médio entre a ETR_{SSEBop} e a ETR_{RB} e a inclinação da linha de tendência mais afastada evidenciaram uma estimativa do modelo de $0,03 \text{ mm d}^{-1}$ ou $0,71 \%$ a mais em relação aos dados estimados pelo método da razão de Bowen. O coeficiente E de 0,78 aponta o bom desempenho da ETR_{SSEBop} em escala diária nas avaliações de 2019.

A Tabela 11 apresenta as demandas hídricas da cultura do trigo de inverno relatadas em outros trabalhos que utilizaram o modelo SSEBop. As lâminas relatadas nos trabalhos desenvolvidos no Cerrado possuem variação semelhante com as demandas estimadas no presente estudo.

Tabela 11. Demanda hídrica do trigo de inverno por meio da aplicação do modelo SSEBop verificada na literatura

Autor	Área de Estudo	ETR_{SSEBop}	Desempenho
SENAY et al. (2016)	Estados Unidos	384 mm	$R^2: 0,84$ RMSE: $0,54 \text{ mm d}^{-1}$
LOPES et al. (2019)	Brasil (Cerrado)	466 mm	$R^2: 0,66$ RMSE: $0,95 \text{ mm d}^{-1}$ Superestimativa de $5,5\%$
MALTA (2019)	Brasil (Cerrado)	415 mm	$R^2: 0,82$ RMSE: $0,16 \text{ mm d}^{-1}$ Subestimativa de $5,53\%$

OLIVEIRA-GUERRA et al. (2020)	Marrocos	408,16 mm	R ² : 0,95 RMSE: 44 mm
MUKHERJEE et al. (2021)	Índia	Mínimo: 1,14 mm d ⁻¹ Máximo: 2,64 mm d ⁻¹	R ² : 0,76 RMSE: 0,48 mm d ⁻¹

Considerando as análises estatísticas realizadas para os dois anos agrícolas, pode-se afirmar que o modelo SSEBop representou de forma adequada os dados observados, tanto para medidas pontuais nas datas de passagem dos satélites quanto na extrapolação de medidas em escala diária. Apesar de ser um modelo de maior facilidade operacional, é importante que se aplique os parâmetros de entrada requeridos pelo modelo que melhor possam representar as condições climáticas da área de estudo, já que são utilizados para determinar os principais parâmetros de calibração do modelo, sendo o coeficiente c e a dT . Essa ressalva pôde ser confirmada no presente estudo, uma vez que se utilizou dados meteorológicos de referência de uma estação mais próxima da área experimental, garantindo um desempenho mais satisfatório que os resultados alcançados na literatura, em semelhantes condições de estudo.

4.4 Avaliação comparativa das estimativas da evapotranspiração real da cultura do trigo por meio dos modelos SEBAL e SSEBop.

Após análise individual de cada modelo de sensoriamento remoto procurou-se verificar, por comparação, as diferenças nas medições encontradas pelos dados modelados, em relação a metodologia de campo. As Tabelas 12 e 13 apresentam os valores máximos, mínimos e média dos modelos para as duas safras estudadas, respectivas aos anos de 2018 e 2019, compreendendo todo o ciclo da cultura, ou seja, valores considerando também as datas entre as passagens dos satélites.

Tabela 12- Valores máximo, mínimo e média dos modelos aplicados na safra de 2018.

MODELO	ETR (mm d ⁻¹)			TOTAL
	MÁXIMO	MÍNIMO	MÉDIA	
ETR _{RB}	7,41	3,07	5,14	467,15 mm (560,58 m ³)
ETR _{SEBAL}	7,43	2,66	4,85	451,56 mm (541,87 m ³)
ETR _{SSEBop}	7,60	3,02	5,07	461,72 mm (554,06 m ³)

De acordo com a Tabela 12, observa-se que as estimativas realizadas pelo modelo SEBAL estiveram mais distantes das medidas de campo e das aferições do SSEBop. No cultivo de 2018, devido à proximidade do pivô com uma extensa área sem cobertura vegetal, logo, mais quente e seca, a cultura estava mais exposta ao efeito advectivo do vento no campo. Comportamento verificado pelo método da razão de Bowen pelos constantes valores negativos de H, que resultaram em uma fonte adicional de calor, elevando os valores de LE, que muitas vezes suplantaram a radiação líquida disponível.

Tal efeito de advecção não pôde ser contabilizado pelo algoritmo SEBAL, prejudicando ao longo do ciclo o somatório das lâminas requeridas pela cultura, condição que também foi observada por Sing & Senay (2016). Mkhwanazi et al. (2015), atribuíram a subestimativa da ETR em condições advectivas pelo fato do modelo SEBAL desconsiderar a advecção como outra fonte de energia disponível para a evaporação.

A lâmina acumulada em 2018 pelo algoritmo SEBAL demonstrou uma subestimativa de 18,71 m³, representada em um pivô de 120 ha. De acordo com a Figura 27 nota-se que as subestimativas mais acentuadas expressas pelo modelo ocorreram principalmente no início e no final do ciclo, justamente quando os valores de NDVI são mais baixos, seja pela pouca cobertura vegetal ou pelo decréscimo da biomassa fotossinteticamente ativa no período de senescência.

Já o modelo SSEBop, em 2018, apresentou valores mais altos durante o ciclo, com maior proximidade da ETR_{RB}, como pode ser verificado na Figura 27, devido ao bom suprimento de água durante o desenvolvimento da cultura, que foi percebido pela sensibilidade do modelo às variações da TS dentro do pivô. Essa sensibilidade colaborou para que a demanda hídrica do trigo estimada pelo SSEBop apresentasse uma subestimativa de 6,52 m³, uma diferença menor em relação ao modelo SEBAL para o mesmo ano. Ainda com relação à Figura 27, observa-se que dos 70 aos 73 DAP os valores da ETR_{SEBAL} e ETR_{SSEBop} se descolam dos dados da ETR_{RB}, período em que a cultura iniciou a fase de enchimento de grãos o que naturalmente eleva as taxas evapotranspirativas. Contudo, ambos os modelos subestimaram os dados de campo nesse período, o que auxilia na compreensão da presença de valores estimados menos confiáveis da modelagem.

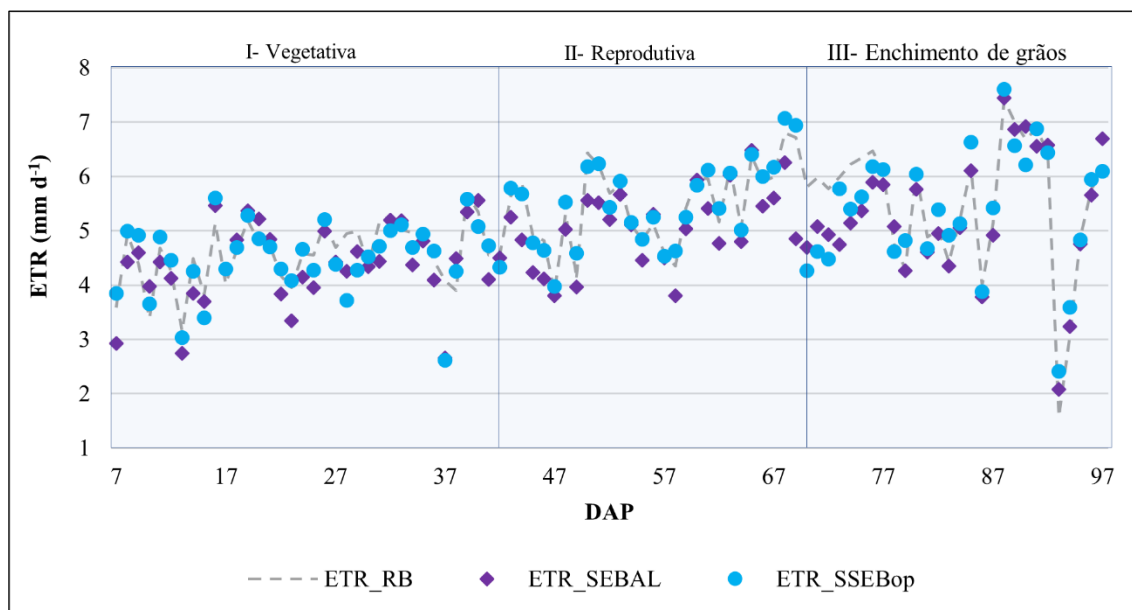


Figura 27. Distribuição da ETR_{RB} , ETR_{SEBAL} e ETR_{SSEBop} para a cultura do trigo avaliada durante a safra de 2018 na região de Cristalina (GO).

Tabela 13- Valores máximo, mínimo e média dos modelos aplicados na safra de 2019.

MODELO	ETR (mm d ⁻¹)			TOTAL
	MÁXIMO	MÍNIMO	MÉDIA	
ETR_{RB}	5,94	2,46	4,11	419,63 mm (60,13 m ³)
ETR_{SEBAL}	5,80	2,31	4,12	421,08 mm (60,34 m ³)
ETR_{SSEBop}	5,72	2,61	4,14	422,61mm (60,56 m ³)

No cultivo de 2019, a ausência de advecção colaborou para que a lâmina acumulada pelo modelo SEBAL apresentasse uma diferença menor em relação aos resultados observados em campo. Em razão das baixas frequências e volumes aplicados por irrigação após a colheita das culturas adjacentes, que vinham sendo cultivadas no mesmo pivô central, as taxas evapotranspirativas do trigo diminuiriam, como pode ser observado na Figura 28, de modo que elevou a TS no perímetro irrigado. Nota-se ainda que entre o final da fase vegetativa e início da fase reprodutiva, os valores estimados pelo SEBAL se distanciam dos resultados da ETR_{RB} e da ETR_{SSEBop} , justificando o desempenho inferior do modelo no ano em questão.

Em ambas as metodologias, espera-se que a fração evapotranspirativa tenha um comportamento constante no dia da passagem do satélite, de forma que possa ser aplicado para ampliar as estimativas instantâneas da ETR para escala diária. Contudo, essa suposição pode

não ser válida para condições de restrição hídrica, como é o caso do cultivo de 2019, já que as frações estimadas nas datas de passagem foram utilizadas em mais dias consecutivos entre as aquisições. O aumento da TS colaborou para um maior aquecimento do ar e do solo e a pouca representatividade da fração evapotranspirativa adotada como constante durante o período de baixa disponibilidade hídrica, contribuíram para que os modelos propagassem uma superestimativa de $0,21 \text{ m}^3$ para o SEBAL e de $2,98 \text{ m}^3$ para o SSEBop, para $\frac{1}{4}$ do pivô com parcela de 14,33 ha. Ambos os modelos tiveram um desempenho inferior, ainda que satisfatórios, para o ciclo de 2019, com coeficiente E de 0,66 e 0,69 para o SEBAL e SSEBop, respectivamente.

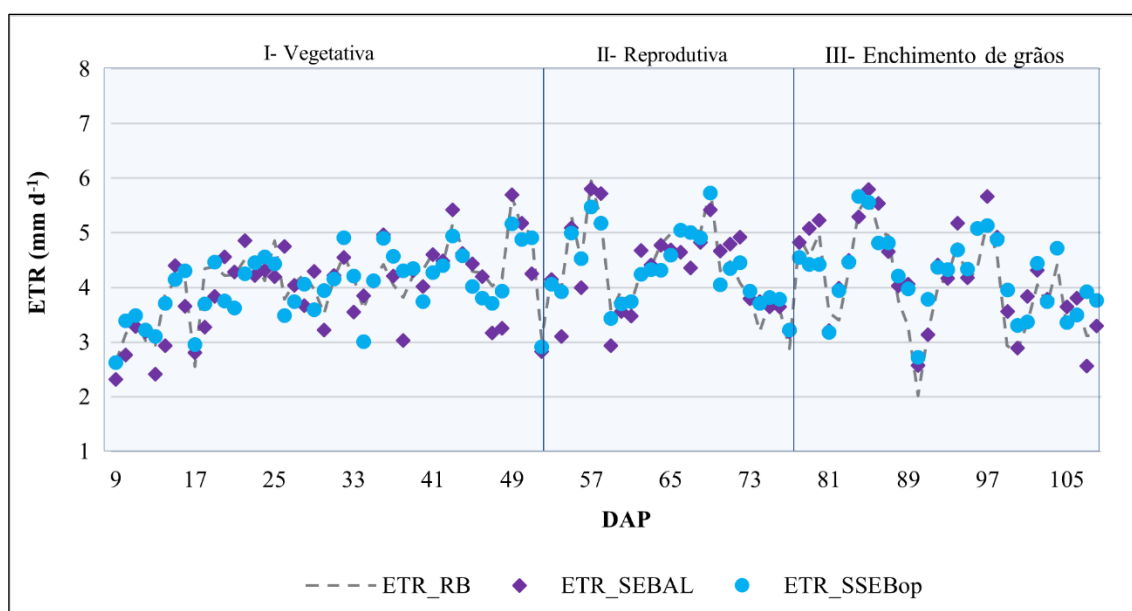
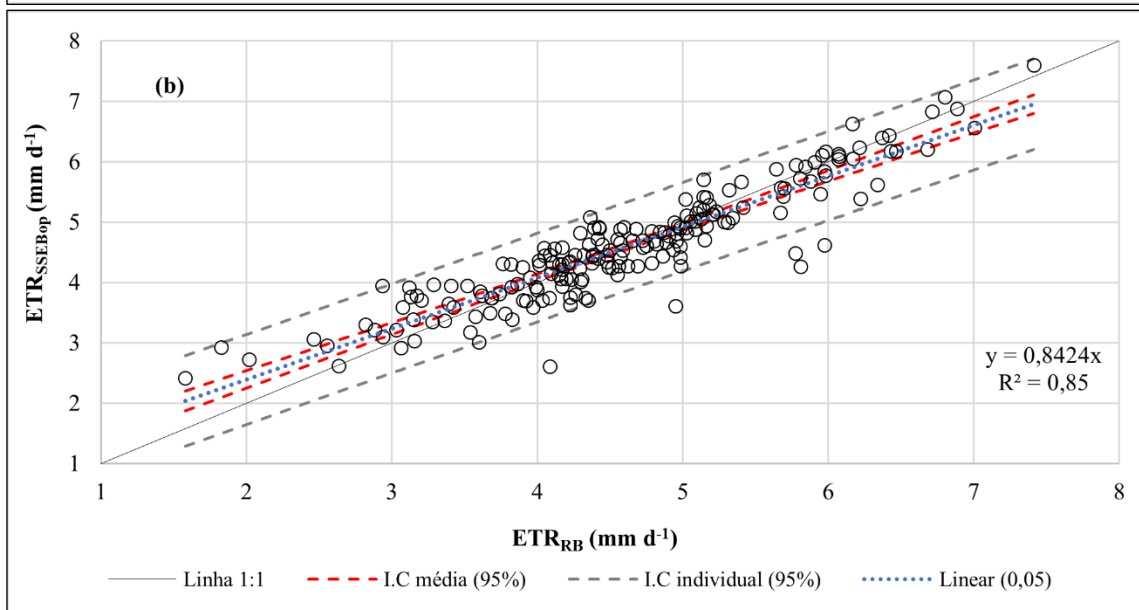
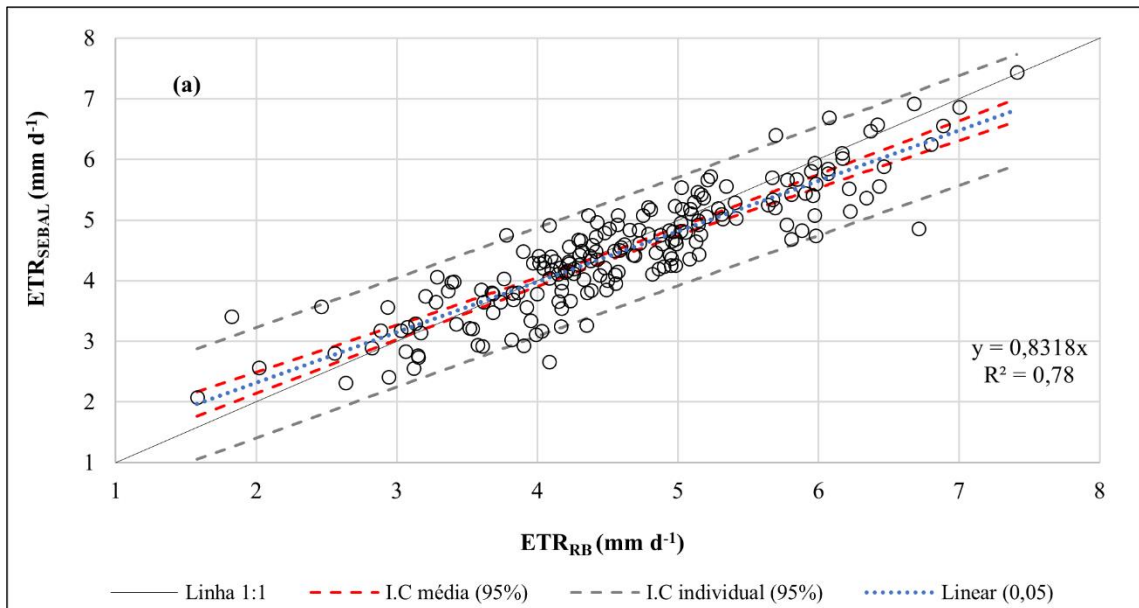


Figura 28. Distribuição da ETR_{RB} , ETR_{SEBAL} e ETR_{SSEBop} para a cultura do trigo avaliada durante a safra de 2019 na região de Cristalina (GO).

O desempenho dos modelos SEBAL e SSEBop, também foram verificados em análise conjunta para as duas safras experimentais, e estão apresentados na Figura 29, bem como, na Tabela 14.



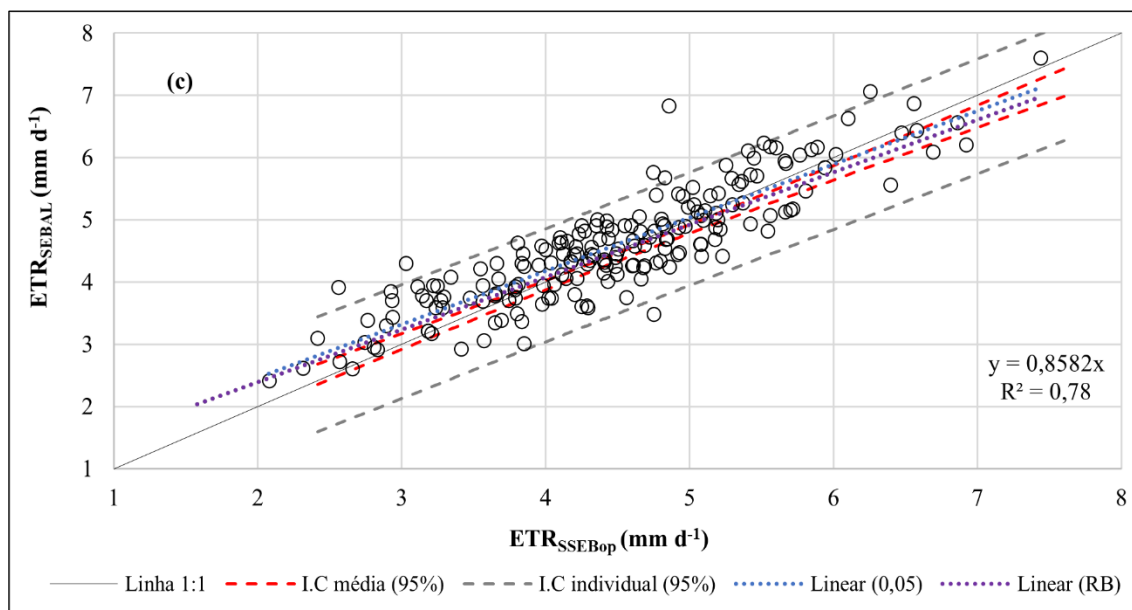


Figura 29. Correlação entre a ETR_{SEBAL} (a) e da ETR_{SSEBop} (b) com a ETR_{RB} em análise conjunta para as duas safras experimentais e a correlação entre a ETR_{SEBAL} e a ETR_{SSEBop} (c), no Intervalo de Confiança para a média e individual de 95 % a um nível de significância ($p < 0,05$).

Tabela 14. Indicadores da análise estatística de desempenho dos modelos SEBAL e SSEBop extrapolado para estimativa diária e conjunta das duas safras da cultura do trigo.

	SEBAL	SSEBop
R²	0,78	0,85
RMSE	0,49	0,40
pRMSE	10,81	8,77
BIAS	-0,12	-0,014
pBIAS	-2,65	-0,31
E	0,76	0,84

De acordo com a Figura 29 (a e b), na avaliação conjunta das safras, observa-se que ambos os modelos apresentaram uma forte correlação positiva quando confrontados com a metodologia de campo. Nesta avaliação das duas safras aumentou-se o tamanho da população, que seguiu uma distribuição normal confirmada pelo p-valor $> 0,05$ por meio do teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov. Conforme a regressão linear apresentada na letra (c), observou-se uma tendência estatisticamente significativa entre os modelos SEBAL e SSEBop, que apresentam um coeficiente de determinação R^2 de 0,78 na avaliação conjunta. A inclinação da linha de ajuste demonstra as variações de magnitude distintas entre os dados modelados.

A modelagem dos dados por meio do SEBAL em avaliação conjunta, indica que o modelo pôde representar 78% das variações da ETR observadas em campo nas duas safras. Considerando os dois períodos estudados, o SEBAL tendeu a subestimar a ETR, como pode ser

acompanhado pelo comportamento da linha de tendência, no viés de 0,12 mm d⁻¹ ou 2,65%, com valor real do erro produzido pelo modelo de 0,49 mm ou na variação de 10,81%, sendo o desempenho satisfatório do SEBAL confirmado pelo coeficiente E de 0,76.

Conforme apresentado na Tabela 14, nota-se pelo resultado de R² que o SSEBop foi capaz de explicar 85% da variabilidade da ETR no decorrer das duas safras. Dessa forma, é possível afirmar que o modelo simulou de forma adequada a ETR para a cultura do trigo irrigado em condições de cerrado. De certo modo, o modelo também subestimou a ETR_{RB} em -0,014 ou -0,31 %. O erro produzido pelo SSEBop foi de 0,40 mm ou 8,77 em termos percentuais. A ANOVA da análise conjunta demonstrou um p-valor de 0,90, maior que 5%, indicando que não houve diferença significativa entre a ETR_{RB} e a ETR_{SSEBop} no período estudado.

O modelo SSEBop teve um desempenho melhor e mais satisfatório, com E de 0,84. Na fase vegetativa do trigo em 2018 e 2019, quando a maior parte do solo tinha uma cobertura vegetal menor, observou-se que o modelo SSEBop apresentou a tendência de superestimar a ETR, e de acordo com Senay et al. (2011), a suposição de que as diferenças da TS devem-se principalmente ao teor de água no solo e à cobertura vegetal, pode provocar um aumento da ETR, uma vez que na maioria das superfícies dos solos descobertos há um intenso fluxo de calor.

De modo geral, houve diferenças nos padrões espaciais expressas pelos modelos SEBAL e SSEBop, e a distinção entre os dados modelados devem-se à sensibilidade de cada modelo aos parâmetros de entrada, bem como, diferem-se nas abordagens para aumento da ETR instantânea para diária, o que pode ocasionar um maior viés. Para melhor demonstrar tais variações, foram selecionadas imagens referentes às fases fenológicas da cultura do trigo nas safras de 2018 e 2019. A diferença nos padrões espaciais da ETR_{SEBAL} e da ETR_{SSEBop} estão apresentadas na Figura 30 para o ano de 2018 e Figura 31 respectiva ao ciclo de 2019.

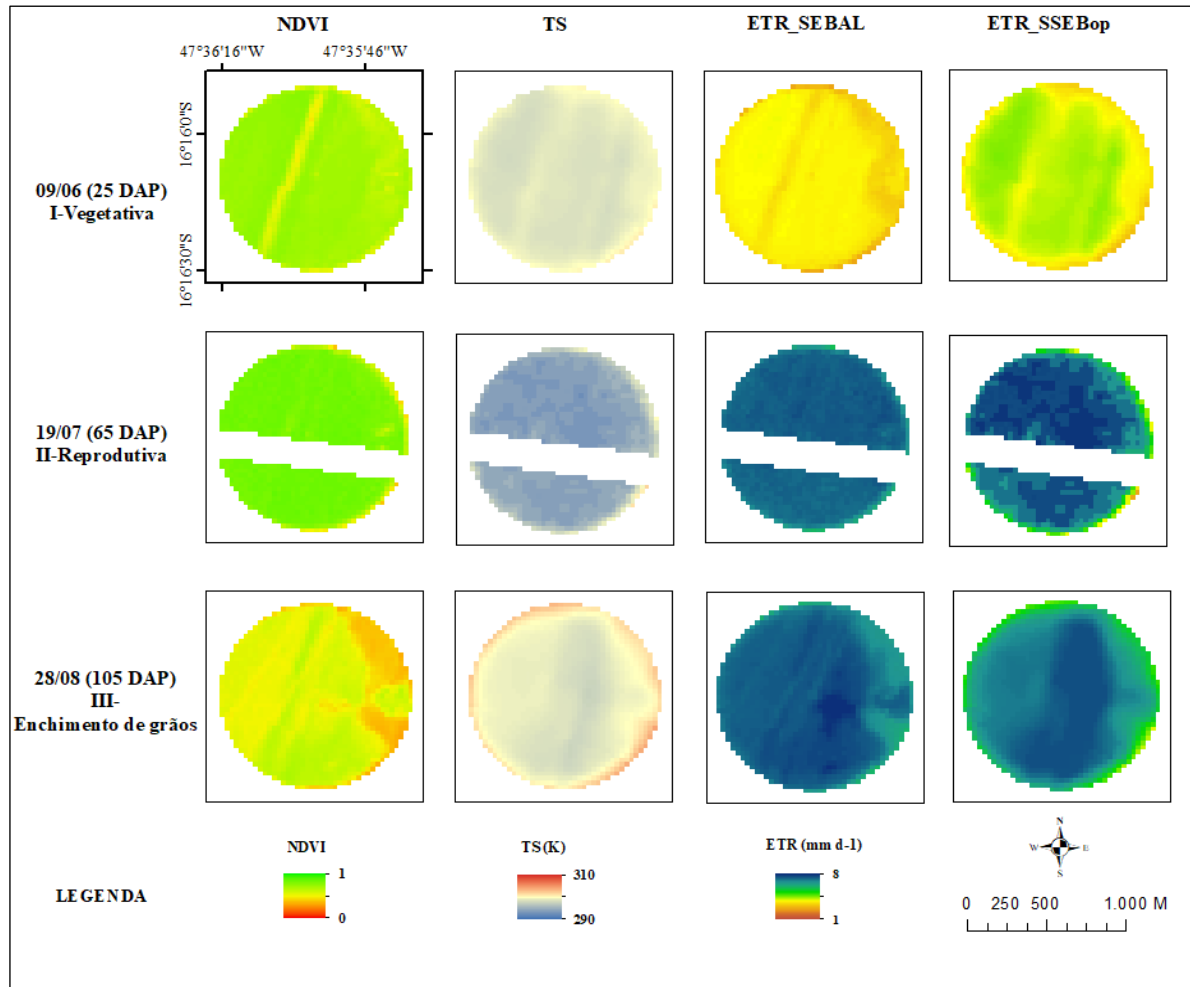


Figura 30. Distribuição espacial da ETR_{SEBAL} e da ETR_{SSEBop} para o ciclo de desenvolvimento da cultura do trigo nos estágios fenológicos da safra de 2018 estimados na região de Cristalina (GO).

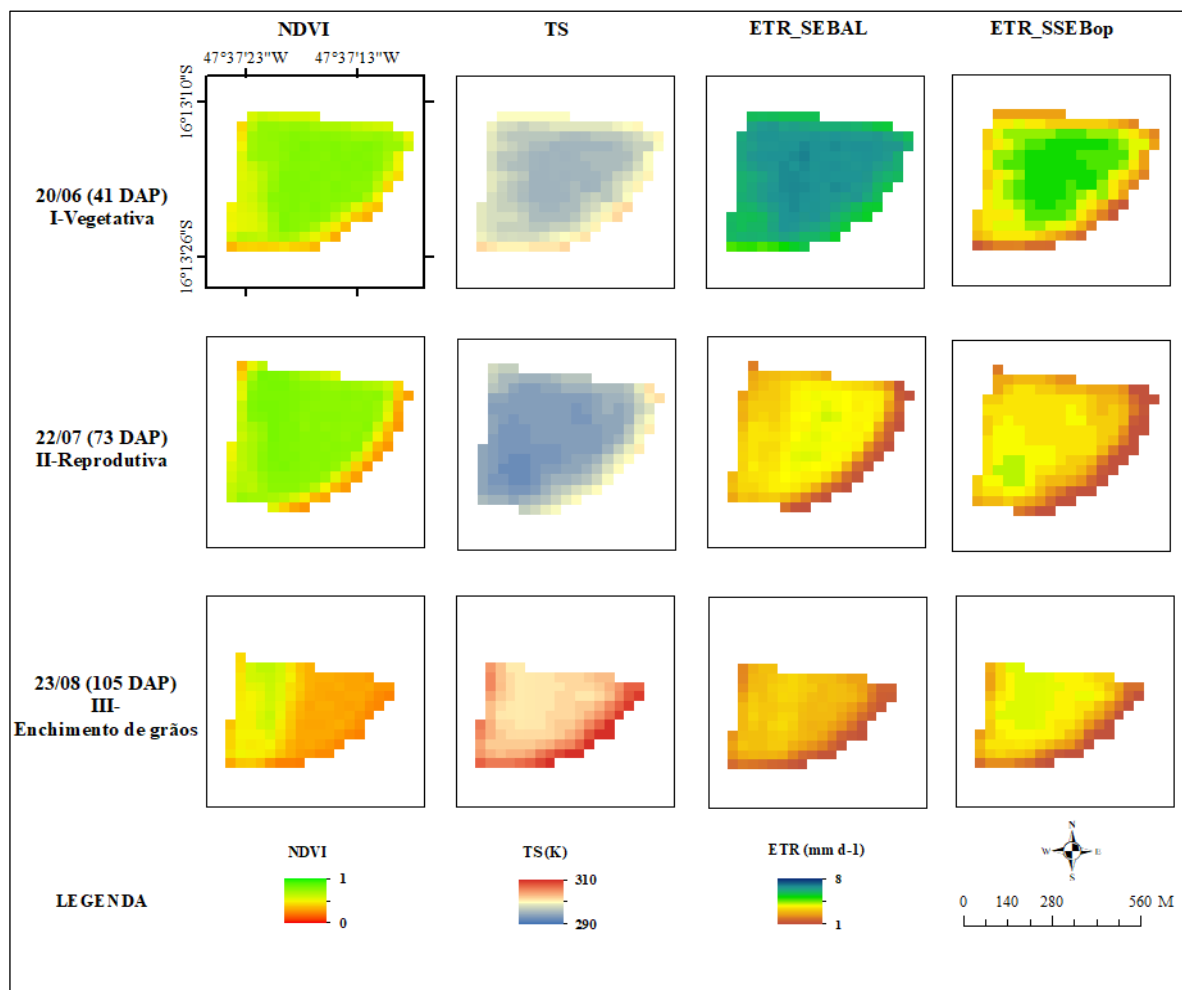


Figura 31. Distribuição espacial da ETR_{SEBAL} e da ETR_{SSEBop} para o ciclo de desenvolvimento da cultura do trigo nos estágios fenológicos da safra de 2019 estimados na região de Cristalina (GO).

Avaliando-se as Figuras 30 e 31, nota-se que ambos os modelos foram capazes de captar os fluxos instantâneos da fração evapotranspirativa. Nas duas safras da cultura do trigo que foram avaliadas, as variações no padrão espacial expressas pelo modelo SEBAL foram maiores, e foi percebido que a variabilidade da ETR_{SEBAL} esteve mais intimamente relacionada ao NDVI, refletindo a distribuição dos pixels pelo processo de crescimento vegetativo e de maturação, que ocorrem de forma irregular. Esse comportamento linear com o NDVI também pôde ser observado por Yang et al. (2015), nas fases intermediárias e final do ciclo da cultura do trigo. Vale destacar que a TS também exerce grande impacto na variabilidade da ETR_{SEBAL} , mais propriamente na função que esse parâmetro tem na escolha dos pixels âncoras e, conseqüentemente, na determinação de H.

A ETR_{SSEBop} , ao longo das safras, apresentou maior variabilidade dos dados espaciais em função da umidade do solo, refletida pela variação da TS dentro do perímetro irrigado. Isso

acontece porque em sua concepção estendeu-se a premissa de que a dT entre a superfície do solo e do ar está relacionada de forma linear à unidade volumétrica do solo (SENAY et al., 2013). Ainda que o modelo estime a ETR por meio de aplicações de condições de contorno fundamentadas no balanço de energia, o modelo não o resolve de modo completo. Por essa razão, o algoritmo foi revisado por Senay (2018) que concluiu que o princípio da psicrometria de satélites, ou seja, a pressão de vapor de água na atmosfera, pode explicar mais efetivamente a modelagem do SSEBop do que o próprio princípio do balanço de energia.

O modelo SSEBop, ao assumir um limite predefinido de dT , elimina a necessidade de ancoragem dos pixels extremos. Dessa forma, a sensibilidade do modelo ao erro de dT variará conforme a condição de umidade do solo, de modo que a ETR_{SSEBop} será pouco sensível ao erro de dT em caso de bom suprimento hídrico e muito sensível se o solo estiver seco. Essa abordagem permite explicar o melhor desempenho do SSEBop em 2018, em que o pivô recebeu com mais frequência lâminas de irrigação. Considera-se que o valor de dT não se modifica de um ano para o outro na mesma localidade, razão pela qual o modelo apresentou maior sensibilidade ao dT em 2019, devido à restrição hídrica, condição que implicou em menor acurácia do SSEBop na estimativa diária da ETR.

O desempenho dos modelos que aplicam dados de sensoriamento remoto depende de inúmeros fatores, que podem incluir a estrutura da modelagem, dados de entrada e a própria experiência do operador. Apesar do SSEBop assumir alguns princípios do modelo SEBAL, eles também se diferem no cálculo da radiação líquida.

No cômputo do parâmetro dT , segundo a metodologia do SSEBop, considera-se o saldo de radiação líquida obtido por meio de dados de entrada fornecidos por estação meteorológica. Dessa forma, a representatividade das condições climáticas da superfície torna-se maior. Assim como a vegetação exerce influência na temperatura, na umidade e nas oscilações térmicas do solo, o dossel também influi na distribuição de R_n .

O presente estudo, ao aplicar a metodologia do algoritmo SEBAL, não utilizou dados de R_n medidos em campo, logo esse parâmetro foi calculado com base na média diária da radiação solar extraterrestre, transmitância atmosférica e albedo, todos alcançados por meio de informações remotas. Comumente, é utilizado para o aumento da ETR de escala instantânea em diária, a R_n média com base na equação empírica, o que pode não ser adequado se houver alguma nebulosidade, durante ou antes/depois da passagem do satélite (SINGH; SENAY, 2016), justamente porque a variabilidade temporal da ETR capta a interferência do comportamento sazonal da radiação solar.

As diferenças encontradas na estimativa da ETR são justificadas por possíveis imprecisões geradas pelo modelo SEBAL. Alguns estudos apontam que a origem dessa incerteza é devido à subjetividade na seleção dos pixels âncoras (LONG; SINGH, 2013; PAUL et al. 2013). Nesse trabalho, a seleção dos pixels de referência foi feita de forma manual, de modo que o diferencial de temperatura mínimo nos pixels mais frios e máximo nos pixels quentes pudessem ser ancorados ao fluxo de calor sensível nas duas extremidades.

Contudo, nem sempre o pixel mais quente da cena pôde ser aplicado na estimativa do H inicial, para que se introduzisse o processo iterativo de correção de estabilidade atmosférica para momentum e transferência de calor sensível, de modo a gerar valor de H mais adequado. Isso porque, nesses casos, o pixel quente estava localizado em uma superfície muito heterogênea e, de acordo com Timmermans et al. (2007), nesses casos o comportamento linear entre a TS e a dT seria comprometido. Os autores relataram que a sensibilidade na rugosidade do pixel mais quente propagou erros na regressão linear, que é utilizada para estabelecer a variável dT. A subjetividade que existe na escolha dos pixels âncoras pode induzir o operador a não necessariamente escolher o pixel mais quente da cena. Segundo Silva (2013), reduções de apenas 1,5 K no pixel mais quente subestimam a ETR nas regiões mais secas e tendem a superestimar nas áreas de vegetação média. Long et al. (2011) indicam em seu estudo que um acréscimo de 2 K na TS pode gerar um aumento médio de 27,7% nas estimativas de H.

As estimativas alcançadas pelo SEBAL na região do Cerrado concordam com a variabilidade dos coeficientes de determinação relatados em outros trabalhos (LI et al., 2008; YANG et al., 2015; RAWAT et al., 2017). Diante dos resultados aqui apresentados, é possível verificar que apesar da solução completa do balanço de energia e da complexidade operacional do modelo SEBAL, o seu desempenho ainda que satisfatório, não foi o mais adequado para representar a variabilidade espacial da ETR para a cultura do trigo nas condições avaliadas, principalmente na ocorrência de advecção de calor sensível.

As variações da ETR_{SSEBop} retrataram bem os dados coletados em campo e concordam com as lâminas totais demonstradas nos estudos desenvolvidos na mesma região anteriormente (LOPES et al., 2019; MALTA, 2019). O desempenho do SSEBop verificado no presente estudo, confirma a capacidade satisfatória do modelo na estimativa da ETR para a cultura do trigo irrigado. Considerando o período de estudo que abrangeu a estação seca na região do Cerrado, que é climatologicamente bem definida, a aplicação das metodologias foi facilitada tanto pela baixa cobertura de nuvens nas imagens quanto pela clareza em que se pôde selecionar as

condições de contorno do pixel frio, dada a ausência da contribuição das chuvas na oferta hídrica.

5. CONCLUSÕES

O balanço de energia pelo método da razão de Bowen, para os ciclos de 2018 e 2019, puderam ser mensurados pelos dados experimentais, indicando a viabilidade de aplicação da metodologia para verificação de dados provenientes do sensoriamento remoto. Os resultados da partição de energia pelo método da razão de Bowen, encontrados para a cultura do trigo no Cerrado em condições de presença ou ausência de advecção, concordam com as proporções verificadas na literatura. A demanda hídrica da cultura estimada foi de 560,58 m³ em 2018 e 60,13 m³ em 2019.

O desempenho do SEBAL na estimativa da ETR para a cultura do trigo foi satisfatório. Contudo, o modelo subestimou os dados de campo na presença de advecção de calor sensível e na ausência do efeito advectivo superestimou a demanda da cultura. Considerando sua complexidade operacional e a necessidade de ancoragem dos pixels nas condições extremas, o modelo não foi o mais adequado para estimar as lâminas requeridas pela cultura. O modelo acumulou a demanda hídrica de 541,87 m³ na safra de 2018 e 60,34 m³ no experimento de 2019.

As estimativas realizadas pelo SSEBop tiveram maior proximidade com a razão de Bowen. Apesar do modelo também ter subestimado a demanda hídrica da cultura do trigo em um ano com maior frequência de advecção, seu desempenho não foi prejudicado pela sensibilidade que ele apresenta com relação a umidade do solo. No entanto, em um período de restrição hídrica no cultivo de 2019 a fração da evapotranspiração adotada como constante para extrapolação nos dias entre as passagens dos satélites propagou maior viés. O modelo determinou a lâmina de 554,06 m³ no ano de 2018 e 60,56 m³ em 2019.

Diante do exposto, considera-se que os objetivos inicialmente traçados puderam ser alcançados no presente estudo e as informações apresentadas podem auxiliar na compreensão das fontes de variações que implicam nos produtos dos dados modelados.

Visto que, tantos fatores intervenientes podem trazer maior complexidade na estimativa da ETR, torna-se de extrema importância aprimorar o desempenho dos modelos, por meio de calibrações e verificações, e a disponibilidade dos produtos de sensoriamento remoto que são fornecidos gratuitamente. Frente à capacidade de produção do trigo de inverno no Cerrado, pode-se afirmar que o modelo SSEBop tem uma aplicação viável, devido à simplicidade operacional, e é adequado para determinar o consumo hídrico da cultura do trigo. O modelo torna-se, portanto, uma ferramenta de grande importância tanto para os produtores rurais e pesquisadores quanto para os órgãos competentes de fiscalização de uso da água, colaborando

para que exista maior eficiência na distribuição desse recurso natural tão precioso, especialmente em uma bacia onde há predominância de pivô central.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Manual de procedimentos técnicos e administrativos de outorga de direito de uso de recursos hídricos**. Brasília, 2013. 252 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Estimativas de evapotranspiração real por sensoriamento remoto no Brasil**. Brasília, 2020. 41 p.
- ABOUKHALED, A.; ALFARO, A.; SMITH, M. **Lysimeters**. Rome: FAO, 1982. 68 p. (Irrigation and Drainage, Paper 39).
- AHMED, B. M.; TANAKAMARU, H.; TADA, A. Application of remote sensing for estimating crop water requirements, yield and water productivity of wheat in the Gezira Scheme, **International Journal of Remote Sensing**, v. 31, n.16, p.4281– 4294, 2010.
- AKDIM, N.; ALFIERI, S. M.; HABIB, A.; CHOUKRI, A.; CHERUIYOT, E.; LABBASSI, K.; MENENTI, M. Monitoring of Irrigation Schemes by Remote Sensing: Phenology versus Retrieval of Biophysical Variables Monitoramento de Esquemas de Irrigação por Sensoriamento Remoto: Fenologia versus Recuperação de Variáveis Biofísicas. **Remote Sensing**, v. 6, p. 5815-5851, 2014.
- 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.
- ALBRECHT, J. C.; CHAGAS, J. H.; SOBRINHO, J. S.; SCHEEREN, P. L.; FRONZA, V. **Trigo BRS 394: cultivar para o Cerrado do Brasil Central**. Brasília: Embrapa, 2020. 12. (Circular Técnica 44).
- ALENCAR, L. P. de.; SEDIYAMA, G. C.; MANTOVANI, E. C. Estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o padrão FAO), para Minas Gerais, na ausência de alguns dados climáticos. **Revista Engenharia Agrícola**, v.35, n.1, p. 39-50, 2015.
- ALFONSI, R. R.; SANTOS FILHO, B. G.; PEDRO JÚNIOR, M. J.; BRUNINI, O.; CAMARGO, M. B. P. Balanço de energia em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 21, n. 12, p. 1233-1235, dez. 1986.
- 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. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma: FAO, 2006. 323 p. (Estudio FAO Riego Y Drenaje, 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.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (Irrigation and Drainage Paper, 56).

ALLEN, R.; TASUMI, M.; TREZZA, R. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) - Advanced Training and Users Manual - **Idaho Implementation**, v.1, 2002a, 97p.

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.

ALVES, A. V.; AZEVEDO, P. V. de.; SILVA, B. B. da. Balanço de energia e reflectância de um cultivo de melão. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.6, n.2, p.139-146, 1998.

ARAÚJO, A. L. de.; SILVA, M. T.; SILVA, B. B. da.; SANTOS, C. A. C. dos.; AMORIM, M. R. B. Modelagem Simplificada Para Estimativa do Balanço de Energia à Superfície em Escala Regional (R-SSEB). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 3, p. 433-446, 2017.

AZEVEDO, J.A.; SILVA, D.B.; ANDRADE, J.M.V.; ANDRADE, L.M. Aplicação da tensiometria no manejo de água de irrigação em lavoura de trigo irrigado no Vale do Pamplona. Planaltina: EMBRAPA - Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados, 1997a. p.106-8. (Relatório Técnico Anual do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados 1991-1995).

AZEVEDO, J. A. **Níveis de tensão de água no solo e suspensão da irrigação em três períodos de crescimento do trigo irrigado em solo de cerrado: efeito sobre a produtividade, componentes de produção, desenvolvimento e uso de água.** 1988. 157 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 1988.

BALA, A.; PAWAR, P. S.; MISRA, A. K.; RAWAT, K. S. Estimation and validation of actual evapotranspiration for wheat crop using SEBAL model over Hisar district, Haryana, India. **Current Science**, v. 113, n.1, p.134–141, 2017.

BASTIAANSSEN, W. G. M. **Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climate.** PhD. Dis., CIP Data Koninklijke Bibliotheek, Den Haag, the Netherlands. 272 p., 1995.

BASTIAANSSEN, 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.

BASTIAANSSEN, W. G.; CHANDRAPALA, L. Water balance variability across Sri Lanka for assessing agricultural and environmental water use. **Agricultural Water Management**, v. 58, p. 171–192, 2003.

BASTIAANSSEN, W. G. M.; NOORDMAN, E. J. M.; PELGRUN, 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**, ASCE, p. 85-93, 2005.

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

BENGTSON, C.; LARSSON, S.; LILJENBERG, C. Effects of Water Stress on Cuticular Transpiration Rate and Amount and Composition of Epicuticular Wax in Seedlings of Six Oat Varieties. **Physiologia Plantarum**, v. 44, n.4, p. 319-324, 1978.

BERLATO, M. A.; MOLION, L. B. **Evaporação e evapotranspiração**. Porto Alegre: IPAGRO, 1981. 95 p. (IPAGRO. Boletim técnico, 7).

BERNARDO, S. **Manual de Irrigação**. 6.ed. Viçosa: UFV, 2002. 657p.

BERNARDO, S.; SOUSA, E. F.; CARVALHO, J. A. **Estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o), para as “áreas de baixada e de tabuleiros” da região Norte Fluminense**. Campos dos Goytacazes: UENF, 1996. 14 p. Boletim Técnico

BEZERRA, B. G, SILVA, B. B., FERREIRA, J.N. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM-Landsat 5. **Revista Brasileira de Meteorologia** v. 23, n.3, p. 305-317, 2008.

BHATTARAI, N.; SHAW, S. B.; QUACKENBUSH, L. J.; IM, J.; NIRLAULA, R. Evaluating five remote sensing based single-source surface energy balance models for estimating daily evapotranspiration in a humid subtropical climate. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 49, p. 75-86, 2016.

BIGGS, T. W.; MARSHALL, M.; MESSINA, A. Mapping daily and seasonal evapotranspiration from irrigated crops using global climate grids and satellite imagery: Automation and methods comparison. **Water Resources Research**, v.52, p. 7311-7326, 2016.

BIUDES, M. S.; VALENTINI, C. M. A.; CAMPELO JÚNIOR, J. H.; NOGUEIRA, J. de S. Estimativa da evapotranspiração numa pastagem mista, em condições de cerrado, pelos métodos de razão de Bowen e Penman-Monteith. **Ciência e Natura**, v.30, n.1, p.71-86, 2008.

BLANEY, H. F.; CRIDDLE, W. O. **Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data**. Washington, D.C.: Soil Conservation Service, 1950. 48p.

BORGES JÚNIOR, J. C. F.; ANJOS, R. J.; SILVA, T. J. A.; LIMA, J. R. S. L.; ANDRADE, C. L. T. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para a microrregião de Garanhuns, PE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.4, p. 380-390, 2012.

BOSCHINI, A. P. M.; SILVA, C. L.; OLIVEIRA, C. A. S.; OLIVEIRA JÚNIOR, M. P.; MIRANDA, M. Z.; FAGIOLI, M. Aspectos quantitativos e qualitativos do grão de trigo influenciados por nitrogênio e lâminas de água. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.5, p.450-457, 2011.

BOWEN, I.S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. **Physical Review**, New York, v.27, p.779-87, 1926.

BURMAN, R. D., NIXON, P. R., WRIGHT, J. L. O. **Water Requirements**. In: Jensen, M.E. (ed.). Design and operation of farm irrigation systems. St. Joseph: ASAE, p.189-232, 1983.

CAI, J.; LIU, Y.; LEI, T.; PEREIRA, L.S. Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman–Monteith equation using daily weather forecast messages. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 145, p. 22–35, 2007.

CAMARGO, A. P. de.; CAMARGO, M. B. P. de. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. **Bragantia**, 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.

CARGNIN, A.; SOUZA, M.A. de; FRONZA, V.; ALBRECHT, J.C.; SILVA, M.S. e; SOARES SOBRINHO, J.; YAMANAKA, C.H.; FOGAÇA, C.M. **Progressos do melhoramento genético do trigo de sequeiro no cerrado de Minas Gerais entre 1976 e 2005**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2009. 17p. (Embrapa Cerrados. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 242).

CARRILLO-ROJAS, G.; SILVA, B.; CÓRDOVA, M.; CÉLLERI, R.; BENDIX, J. Dynamic mapping of evapotranspiration using an energy balance-based model over an andean Paramo catchment of southern Ecuador. **Remote Sensing**, v. 8, n. 2, p. 1-24, 2016.

CARVALHO, D. F.; SILVA, L. D. B.; GUERRA, J. G. M.; CRUZ, F. A.; SOUZA, A. P. Instalação, calibração e funcionamento de um lisímetro de pesagem. **Engenharia Agrícola**, v.27, n.2, p. 363-372, 2007.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. L.; HELDER, D. L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113, 893-903. 2009.

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, 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.

CUNHA, A. R. da.; ESCOBEDO, J. F.; KLOSOWSKI, E. S. Estimativa do fluxo de calor latente pelo balanço de energia em cultivo protegido de pimentão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n.6, p. 735-743, 2002.

CHOUDHURY, G. L.; LUCANTONI, D. M.; WHITT, W. Multidimensional transform inversion with applications to the transient M/G/1 QUEUE. **The Annals of Applied Probability**, v.4, n.3, p. 719-740, 1994.

CHOW, V. T. **Handbook of Applied Hydrology**. Nova York: Mc Graw-Hill, 1964.

COLLISCHONN, W.; TASSI, R. Introduzindo hidrologia. 6. ed. Porto Alegre, RS: IPH UFRGS, 2008. 274 p.

COMINI, B.; ANDRADE, E.; MAILLARD, P. Estimativa da evapotranspiração via sensoriamento remoto no sistema aquífero Urucuia. In: Simpósio Brasileiro de Recursos

Hídricos, 22., 2017, Florianópolis. **Anais... SBRH 2017**. Florianópolis: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2017. p. 1-8.

CONCEIÇÃO, M. A. F.; MANDELLI, F. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência em Bento Gonçalves, RS. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 13, n. 2, p.303-307, 2005.

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

COURAULT, D.; SEGUIN, B.; OLIOSO, A. Review on estimation of evapotranspiration from remote sensing data: from empirical to numerical modelling approaches. *Irrigation and Drainage System*, v. 19, p. 223-249, 2005.

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.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Efeito da água no rendimento das culturas. Tradução: GHEYI, H.R. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1994. 306 p. (Estudos da FAO, Irrigação e Drenagem, 33)

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. Crop water requirements. Rome: FAO, 1977. 179 p. (Irrigation and Drainage Paper, 24).

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. Guidelines for predicting crop water requirements. Rome: FAO, 1984. 178 p. (FAO. Irrigation and drainage paper, 24).

DU, J.; SONG, K.; WANG, Z.; ZHANG, B.; LIU, D. Evapotranspiration estimation based on MODIS products and surface energy balance algorithms for land (SEBAL) model in Sanjiang Plain, Northeast China. *Chinese Geographical Science*, v. 23, n. 1, p. 73–91, 2013.

DUCHEMIN, B.; HADRIA, R.; ERRAKI, S.; BOULET, G.; MAISONGRANDE, P.; CHEHBOUNI, A.; ESCADAFAL, R.; EZZAHAR, J.; HOEDJES, J. C. B.; KHARROU, M.H.; KHABBA, S.; MOUGENOT, B.; OLIOSO, A.; RODRIGUEZ, J. C.; SIMONNEUAUX, V. Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco: On the use of relationships between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely-sensed vegetation indices. *Agricultural Water Management*, v. 79, n. 1, p. 1–27, 2006.

ER-RAKI, S.; CHEHBOUNI, A.; DUCHEMIN, B. Combining satellite remote sensing data with the FAO-56 dual approach for water use mapping in irrigated wheat fields of a semi-arid region. *Remote Sensing*, v. 2, n. 1, p. 375–387, 2010.

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 - WWC. WHITE PAPER. **Towards a Water and Food Secure Future: Critical Perspectives for Policy-makers**. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Rome, 2015. WORLD WATER COUNCIL Marseille, 2015. 62 p.

FARIAS, S. E. M. de.; MEIRELLES, M. L.; FRANCO, A. C.; NOGUEIRA, J. L. M.; GUERRA, A. F.; MANZI, A. O. Balanço de energia em cultivo de milho no cerrado. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.12, n.2, p. 227-233, 2004.

FARIAS, A.R.; MINGOTI, R.; HOLLER, W.A.; SPADOTTO, C.A.; LOVISI FILHO, E.; DE MORI, C.; CUNHA, G.R. da; DOSSA, A.A.; FERNANDES, J.M.C.; SILVA, M.S. e. **Potencial de produção de trigo no Brasil a partir de diferentes cenários de expansão da área de cultivo**. Passo Fundo: Embrapa Trigo 2016. 40p.

FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A. B.; PAZ, R. L. Da.; AMORIM, A. de. O. **Evapotranspiração: uma revisão sobre os métodos empíricos**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2010. 44 p. (Documentos 263).

FIETZ, C. R.; SILVA, F. C. da.; URCHEI, M. A. Estimativa da evapotranspiração de referência diária para região de Dourados, MS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 13, n. 2, p. 250-255, 2005.

FISHER, M. L.; CUNHA, T. ROCHA. DA.; ROSANELI, C. F.; BICUDO, R. M.; SGANZERLA, A. Crise hídrica em publicações científicas: olhares da bioética ambiental. **Revista Ambiente & Água**, v.11, n.3, p. 586-600, 2016.

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.

FONTANA, D.C., BERLATO, M.A., BERGAMASCHI, H. Balanço de energia em soja irrigada e não irrigada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.26, n.3, p.403-10, 1991.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **Water for Sustainable Food and Agriculture: A report produced for the G20 Presidency of Germany**. Rome, 2017.

FOOLADMAND, H. R.; AHMADI, S. H. Monthly spatial calibration of Blaney-Criddle equation for calculating monthly ETo in south of Iran. **Irrigation and Drainage**, v.58, n.2, p.234-245, 2009.

FRANÇA E SILVA, N. R.; MORAES, E. C.; MOURA, M. S. B. de.; OLIVEIRA, G. de.; CARVALHO, H. F. de. S.; OLIVEIRA, B. S. Análise do modelo METRIC na estimativa da evapotranspiração em área de cana-de-açúcar irrigada. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 19., 2019, Santos. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2019. p. 1244-1247

FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A.; BERGAMASCHI, H. Balanço de energia em soja irrigada e não irrigada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.26, n.3, p.403-10, 1991.

FUMIS, T. de. F.; PEDRAS, J. F.; SAMPAIO, A. C. Análise de crescimento em cultivares de trigo (*Triticum aestivum* L.) submetidos a déficits hídricos, na região de Bauru-SP. **Irriga**, v.2, n.3, p. 101-114, 1997.

GATES, D. M. Transpiration and leaf temperature. **Annual Review of Plant Physiology**, v.19, n.1, p. 211-238, 1968.

GAVILÁN, P.; LORITE, I.J.; TORNERO, S.; BERENGENA, J. Regional calibration of Hargreaves equation for estimating reference ET in a semiarid environment. **Agriculture Water Management.**, v.81, p.257-281, 2006.

GAVILAN, P.; BERENGENA, J. Accuracy of the Bowen ratioenergy balance method for measuring latent heat flux in a semiarid advective environment. **Irrigation Science**, v.25, p.127-140, 2007.

GAVILAN, P.; BERENGENA, J.; ALLEN, R.G. Measuring versus estimating net radiation and soil heat flux: impact on Penman–Monteith reference ET estimates in semiarid regions. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, n. 89 n. 3, p. 275–286, 2007.

GHARBIA, S. S.; SMULLEN, T.; GILL, L.; JOHNSTON, P.; PILLA, F. Spatially distributed potential evapotranspiration modeling and climate projections. **Science of The Total Environment**, v. 633, p. 571 – 592, 2018.

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.

GOWDA, P. H.; CHAVEZ, J. L.; COLAIZZI, P. D.; EVETT, S. R.; HOWELL, T. A.; TOLK, J. A. ET mapping for agricultural water management: Present status and challenges. **Irrigation Science**, v. 26, n. 3, p. 223–237, 2008.

GUERRA, A. F.; RODRIGUES, G. C.; ROCHA, O. C.; EVANGELISTA, W. Necessidade hídrica no cultivo de feijão, trigo, milho e arroz sob irrigação no bioma Cerrado. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, n. 100, 2003.

HALLAL, M. O. C.; SCHOFFEL, E. R.; BRIXNER, G. F.; CUNHA, A. R. da. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para Pelotas, Rio Grande do Sul. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 60, p. 1-10, 2017.

HARGREAVES, G.H. **Precipitation dependability and potentials for an agricultural production for Northeast Brazil**. Cusushash: EMBRAPA and Utah State University, 1974. 123p.

HARGREAVES, G.H. **Climate and irrigation requirements for Brazil**. Logan: Utah State University, 1976. 44p.

HENDRICKX, J. M. H.; HONG, S-H.; FRIESEN, J.; COMPAORE, H.; GIESEN, N. V. de.; RODGERS, C.; VLEK, P. L. G. Mapping energy balance fluxes and root zone soil moisture in the White Volta Basin using optical imagery. *Targets and Backgrounds XII: Characterization and Representation*, v. 6239, p. 62390Q–1–62390Q–12, 2006.

HOFFER, R.M. Biological and Physical Considerations in Applying Computer-Aided Analysis Techniques to Remote Sensor Data. In: SWAIN, Philip H.; DAVIS, Shirley M. (Org.). **REMOTE SENSING: The Quantitative Approach**. [S.l.]: McGraw-Hill International Book Co., 1978. cap. 5, p. 227-289.

HONG, S.; HENDRICKX, J.; BORCHERS, B. Up-scaling of SEBAL derived evapotranspiration maps from Landsat (30 m) to MODIS (250 m) scale. **Journal of Hydrology**, v. 370, p. 122-138, 2009.

- HORIE, T.; LUCHIARI JR., A. **Evapotranspiration rates from an irrigated soybean field in cerrados as measured by energy balance method**. p. 149-181. In: Japan International Cooperation Agency. Relatório do Projeto da Cooperação em Pesquisa Agrícola nos Cerrados do Brasil. Planaltina, DF, Brazil. EMBRAPA-CPAC/JICA (English). 1981.
- HORST, T. W.; WEIL, J. C. Footprint estimation for scalar flux measurements in the atmospheric surface layer. *Bound. Layer Meteorol.* v. 59, p. 279–296, 1992.
- 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.
- HUETE, A. DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X.; FERREIRA, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, v.83, n.1-2, p.195–213, 2002.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA- IBGE. Levantamento sistemático da produção agrícola. **IBGE**, p.1-148, 2019.
- IDSO, S. B.; SCHMUGGE, T. J.; REGINATO, R. J. The utility of surface temperature measurements for remote sensing of soil water studies. *Journal of Geophysical Research*, v.80, n.21, p. 3044-3049, 1975.
- KALMA, J. D.; MCVICAR, T. R.; MCCABE, M. F. Estimating land surface evaporation: A review of methods using remotely sensed surface temperature data. *Surveys in Geophysics*, p. 421-469, v. 29, 2008.
- KAMBLE, B.; KILIC, A.; HUBBARD, K. Estimating crop coefficients using remote sensing-based vegetation index. *Remote Sensing*, v.5, n.4, p. 1588-1602, 2013.
- KARIMI, P.; BASTIAANSEN, W. G. M. Spatial evapotranspiration, rainfall and land use data in water accounting. Part 1: Review of the accuracy of the remote sensing data. *Hydrology and Earth System Sciences*, v.19, p. 507-532, 2015.
- 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.
- KILIC, A.; ALLEN, R.; TREZZA, R.; RATCLIFFE, I.; KAMBLE, B.; ROBISON, C.; OZTURK, D. Sensitivity of evapotranspiration retrievals from the METRIC processing algorithm to improved radiometric resolution of Landsat 8 thermal data and to calibration bias in Landsat 7 and 8 surfaces temperature. *Remote Sensing of Environment*, v. 185, p. 198–209, 2016.
- KITE, G. W.; DROOGERS, P. Comparing evapotranspiration estimates from satellites, hydrological models and field data. *Journal of Hydrology*. v. 229, p. 3-18, 2000.
- KLAR, A.E.; DENADAI, I.A.M. Resistência à seca em cultivares de trigo: qualidade e rendimento dos grãos e medições fisiológicas. *Irriga*, v.1, n.2, p.1-25, 1996.
- KLEIN, S. A. Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces. *Solar Energy*, v. 19, p. 325 - 329, 1977.

KOLMOGOROV, A. N. Sulla determinazione empirica di una legge di distribuzione. **Giornale dell'Instituto Italiano degli Attuari**, v.4 , p. 83-91, 1933.

KUSTAS, W. P.; NORMAN, J. M. Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces. **Hydrological Sciences Journal**, v. 41, n.4, p. 495-516, 1996.

LAIPELT, L.; RUHOFF, A. L.; FLEISCHMANN, A. S.; KAYSER, R. H. B.; KICH, E. de. M.; ROCHA, H. R. da.; NEALE, C. M. U. Assessment of an Automated Calibration of the SEBAL Algorithm to Estimate Dry-Season Surface-Energy Partitioning in a Forest-Savanna Transition in Brazil. **Remote Sensing**, v. 12, n.7, p. 1108, 2020.

LEE, X.; YU, Q.; SUN, X.; LIU, J.; MIN, Q.; LIU, Y.; ZHANG, X. Micrometeorological fluxes under the influence of regional and local advection: a revisit. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.122, p.111–124, 2004.

LEMO 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.

LI, F.; LYONS, T.J. Estimation of Regional Evapotranspiration through Remote Sensing. **Journal of Applied Meteorology**, v. 38, p. 1644-1654, 1999.

LI, Z. L.; TANG, R.; WAN, Z.; BI, Y.; ZHOU, C.; TANG, B.; YAN, G.; ZHANG, X. A review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation from remotely sensed data. **Sensors**, v.9, n.5, p. 3801-3853, 2009.

LI, H.; ZHENG, L.; LEI, Y.; LI, C.; LIU, Z.; ZHANG S. Estimation of water consumption and crop water productivity of winter wheat in North China Plain using remote sensing technology. **Agricultural Water Management**, v. 95, p. 1271–1278, 2008.

LIANG, S. **Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces**. Wiley-Interscience, 2004, 534 p.

LIMA, J. E. F. W.; SILVA, E. M. Estimativa da contribuição hídrica superficial do Cerrado para as grandes regiões hidrográficas brasileiras. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2007. São Paulo/SP. **Anais...** São Paulo: ABRH, 2007.

LIMA, J. R. de. S.; ANTONINO, A. C. D.; LIRA, C. A. B. de. O.; SOUZA, E. S. de.; SILVA, I. de. F. da.; Balanço de energia e evapotranspiração de feijão caupi sob condições de sequeiro. **Revista Ciência Agrônômica**, v.42, n.1, p.65-74, 2011.

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**, v.16, n.1, p. 17-27, 2014.

LIMA JÚNIOR, J. C. de.; ARRAES, F. D. D.; OLIVEIRA, J. B. de.; NASCIMENTO, F. A. L. do.; MACÊDO, K. G. de. Parametrização da equação de Hargreaves e Samani para estimativa

da evapotranspiração de referência no Estado do Ceará, Brasil. **Revista Ciência Agronômica**, v.47, n.3, p. 447-454, 2016.

LIMA, R. N. de. S.; RIBEIRO, C. B. de. M.; ROTUNNO FILHO, O. C. Modelagem histórica da evapotranspiração através da computação em nuvem: Resultados preliminares na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul (1987 a 2017). In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 19., 2019, Santos. **Anais... SBSR 2019**. São José dos Campos: INPE, 2020. p. 1962-1965.

LOPES, J. D. **Avaliação e aprimoramento de métodos para estimativa da evapotranspiração real por sensoriamento remoto**. 2018. 79 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2018.

LOPES, J. D.; RODRIGUES, L. N.; IMBUZEIRO, H. M. A.; PRUSKI, F. F. Performance of SSEBop model for estimating wheat actual evapotranspiration in the Brazilian Savannah region. **International Journal of Remote Sensing**, v. 40, n.18, p. 6930-6947, 2019.

LONG, D.; SINGH, V. P.; LI, Z. L. How sensitive is SEBAL to changes in input variables, domain size and satellite sensor? **Journal Geophysical Research**, v. 116, p.1-20, 2011.

LONG, D.; SINGH, V. P. Assessing the impact of end-member selection on the accuracy of satellite-based spatial variability models for actual evapotranspiration estimation. **Water Resources Research**, v. 49, p. 2601-2618, 2013.

LOSGEDARAGH, S.; RAHIMZADEGAN, M. Evaluation of SEBS, SEBAL, and METRIC models in estimation of the evaporation from the freshwater lakes (Case study: Amirkabir dam, Iran). **Journal of Hydrology**, v. 561, p. 523-531, 2018.

LUCHIARI JR., A.; RIHA, S. J.; GOMIDE, R.L. Energy balance in irrigated wheat in the cerrados region of Central Brazil. **Scientia Agricola**, v. 54, p. 78-88, 1997.

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.

MACHADO, R. E.; MATTOS, A. Construção e instalação de um lisímetro com sistema de drenagem. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.9, n.1, p. 147-151, 2001.

MAFRON, P. A.; LAZZAROTTO, C.; MEDEIROS, S. L. P. TRIGO – Aspectos agrometeorológicos. **Ciência Rural**, v.23, n.2, p. 233-239, 1993.

MALTA, E. A. **Avaliação do modelo SSEBop na estimativa de evapotranspiração real da cultura do trigo**. 2019. 98p. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas e Geodinâmica) – Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

MARIN, F. R.; ANGELOCCI, L. R.; PEREIRA, A. R.; SENTELHAS, P. C.; VILLA NOVA, N. A. Balanço de energia e consumo hídrico em pomar de lima ácida ‘Tahiti’. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 17, n.2, p. 219-228, 2002.

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.

MASCARENHAS, L. M. de. A.; FERREIRA, M. E.; FERREIRA, L. G. Remote sensing as law enforcement and environmental protection tool: remnant vegetation analysis in the Araguaia River Basin. **Sociedade e Natureza**, v. 21, n.1, p. 5-18, 2009.

MATZENAUER, R. Evapotranspiração de plantas cultivadas e coeficientes de cultura. In: BERGAMASCHI, H. Agrometeorologia aplicada à irrigação. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 1992, cap 3, p. 33 – 47.

MCMAHON, T. A.; PEEL, M. C.; LOWE, L.; SRIKANTHAN, R.; MCVICAR, T. R.; Estimating actual, potential, reference crop and pan evaporation using standard meteorological data: a pragmatic synthesis. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, p. 1331-1363, 2013.

MCSHANE, R. R.; DRISCOLL, P. K.; SANDO, R. **A Review of Surface Energy Balance Models for Estimating Actual Evapotranspiration with Remote Sensing at High Spatiotemporal Resolution over Large Extents**; Scientific Investigations Report 2017–5087; U.S. Geological Survey: Reston, VA, USA, 2017; 19p.

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

MENENTI, M.; CHOUDHURY, B. Parameterization of Land Surface Evapotranspiration Using a Location Dependent Potential Evapotranspiration and Surface Temperature Range. Exchange Processes at the Land Surface for a Range of Space and Time Scales, **IAHS Publication**, v.212, p. 561-568, 1993.

MILTON, E. J. Principles of Field Spectroscopy. **International Journal of Remote Sensing**, v.8, n.12, p. 1807-1827, 1987.

MKHWANAZI, M.; CHÁVEZ, J. L.; ANDALES, A. A. SEBAL-A: A Remote Sensing ET Algorithm that Accounts for Advection with Limited Data. Part I: Development and Validation. **Remote Sensing**, v. 7, p. 15046-15067, 2015.

MONTEIRO, P. F. C.; FONTANA, D. C.; SANTOS, T. V. dos.; ROBERTI, D. R. Estimativa dos componentes do balanço de energia e da evapotranspiração para áreas de cultivo de soja no sul do Brasil utilizando imagens do sensor TM Landsat 5. **Bragantia**, v.73, n.1, p. 72-80, 2014.

MONTEITH, J. L. Evaporation and environment. **Symposia of the Society for Experimental Biology**, n. 19, p. 205 - 234, 1965.

MONTEITH, J. L. Evaporation and surface temperature. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.107, p.1-27, 1981.

MONTEITH, J. L.; UNSWORTH, M. H. **Principles of environmental Physics**, 2^a ed., Edward Arnold, 291p. 1990.

MOREIRA, J. A. A.; STONE, L. F.; TRINDADE, M. da. G.; CANOVAS, A. D. A cultura do trigo irrigado no Sistema de Plantio Direto. **Circular Técnica**, n. 78, 2006.

MOREIRA, M.A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**. 3. ed. Viçosa, MG: UFV, 2003. 307 p.

MOREIRA, L. C. J.; DURAND, B. J.; TEIXEIRA, A. dos. S.; ANDRADE, E. M. Variabilidade local e regional da evapotranspiração estimada pelo algoritmo SEBAL. **Engenharia Agrícola**, v.30, n.6, p. 1148-1159, 2010.

MOURA, A. R. C.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ANTONINO, A. C. D.; AZEVEDO, J. R. G. de; SILVA, B. B. da.; OLIVEIRA, L. M. M. de. Evapotranspiração de referência baseada em métodos empíricos em bacia experimental no Estado de Pernambuco – Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.28, n.2, p.181-191, 2013.

MUKHERJEE, J.; SHARMA, A.; DHAKAR, R.; SEHGAL, V. K.; CHAKRABORTY, D.; DAS, D. K. Estimation and Validation of Actual Evapotranspiration (Eta) of Maize Wheat Cropping System Using SSEBop Model Over IARI Research Farm, New Delhi, India. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v.49, p. 1-15, 2021.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION – NASA. Landsat 7 Science Data Users Handbook. 2016. Disponível em: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/wp-content/uploads/2016/08/Landsat7_Handbook.pdf>.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v.10, n.3, p. 282–290, 1970.

NORMAN, J. M., KUSTAS, W. P., AND HUMES, K. S. A two-source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes from observations of directional radiometric surface temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.77, p. 263-293, 1995.

OLIVEIRA-GUERRA, L.; MERLIN, O.; ER-RAKI, S. Irrigation retrieval from Landsat optical/thermal data integrated into a crop water balance model: A case study winter wheat fields in a semi-arid region. **Remote Sensing of Environment**, v. 239, p. 1-18, 2020.

OLIVEIRA NETO, A. A.; SANTOS, C. M. R. **A cultura do Trigo**. Brasília-DF: CONAB, 2017, 218p.

OLIVEIRA, L. M. M. de.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SILVA, B. B. da.; ANTONINO, A. C. D.; MOURA, A. E. S. S. de. Evapotranspiração real em bacia hidrográfica do Nordeste brasileiro por meio do SEBAL e produtos MODIS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.10, p. 1039-1046, 2014.

OLIVEIRA, R. Z.; OLIVEIRA, L. F. C. de.; WEHR, T. R.; BORGES, L. B.; BONOMO, R. Comparação de metodologias de estimativa da evapotranspiração de referência para a região de Goiânia,GO. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.21, n.3, p.19-27, 2005.

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 Meteorological**, v.81, p.131-143, 1996.

PALARETTI, L. F.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C. Comparação entre métodos de estimativa de evapotranspiração de referência (ETo) em regiões citrícolas paulista. **Engenharia Agrícola**, v.34, n.1, p. 38-47, 2014.

PAUL, G.; GOWDA, P.H.; VARA PRASAD, P.V.; HOWELL, T. A.; STAGGENBORG, S. A.; NEALE, C. M. U. Lysimetric evaluation of SEBAL using high resolution airborne imagery from BEAREX08. **Advances in Water Resources**, v.59, p. 157–168, 2013.

PAULA, A. C. P. de; SILVA, C. L. da.; RODRIGUES, L. N.; SCHERERWARREN, M. Performance of the SSEBop model in the estimation of the actual evapotranspiration of soybean and bean crops. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.54, p. 1-11, 2019.

PAUWELS, V. R. N.; SAMSON, R. Comparison of different methods to measure and model actual evapotranspiration rates for a wet sloping grassland. **Agricultural Water Management**, v. 82, p. 1-24, 2006.

PASINATO, A.; CUNHA, G. R. da.; FONTANA, D. C.; MONTEIRO, J. E. B. de. A.; NAKAI, A. M. de. Potential area and limitations for the expansion of rainfed wheat in the Cerrado biome of Central Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.53, n.7, p. 779-790, 2018.

PAYERO, J. O.; IRMAK, S. Daily energy fluxes, evapotranspiration and crop coefficient of soybean. **Agricultural Water Management**, v. 129, p. 31-43, 2013.

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.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Update world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, p. 1633-1644, 2007.

PEREIRA, A. R.; SEDIYAMA, G. C.; VILLA NOVA, N. A. **Evapotranspiração**. Campinas: Fundag, 2013. 323p.

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

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

PEREZ, P. J.; CASTELLVI, F.; MARTÍNEZ-COB, A. A simple model for estimating the Bowen ratio from climatic factors for determining latent and sensible heat fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, p. 25-37, 2008.

PETKOVIC, 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.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. 2. ed. São Paulo: [s.n.]. p.176, 2012.

PREVEDELLO C. L.; MAGGIOTTO, S. R.; LOYOLA, J. M. T.; DIAS, N. L.; BEPLER NETO, G. Balanço de água por aquisição automática de dados em cultura de trigo (*Triticum aestivum* L.). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1-8, 2007.

PRICE, J.C. The potential af remotely sensed thiermal infrared data to iníer mil moisture and evaporation. **Water Resources Research**, v.16, n.4, p. 787-95, 1980.

PROFETA, A. L.; FARIA, S. D.; IMBUZEIRO, H. M. A. Estimativa da evapotranspiração real em área de relevo acidentado utilizando o SEBAL. **Resvista Brasileira de Cartografia**, v.70, n.4, p. 1437-1469, 2018.

PROJETO MAPBIOMAS. **Mapeamento da superfície de água no Brasil** (2021), (Coleção 1). Disponível em: < https://mapbiomas-br-site.s3.amazonaws.com/MapBiomias_A%CC%81gua_Agosto_2021_22082021_OK_v2.pdf >. Acesso em: 27 Ago de 2021.

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.

RAWAT, K. S.; BALA, A.; SINGH, S. K.; PAL, R. K. Quantification of wheat crop evapotranspiration and mapping: a case study from Bhiwani District of Haryana, India. **Agricultural Water Management**, v.187, p. 200-209, 2017.

REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera**. 4 ed. São Paulo: Fundação Cargill, 1985, 445p.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, 2004. 478 p.

RIBEIRO, A. A.; SIMEÃO, M.; SANTOS, A. R. B. Comparação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência no período chuvoso e seco em Piripiri (PI). **Revista Agrogeoambiental**, v. 8, n. 3, p. 89-100, 2016.

RITCHIE, J. T.; BURNETT, E. Dryland evaporative flux in a subhumid climate: II. Plant influences. **Agronomy Journal**, v. 63, p.56-62, 1971.

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.

ROSÁRIO, C. R. **Consumo de água e componentes da evapotranspiração da cultura do trigo em diferentes cenários climáticos: Uma aproximação ao modelo SIMdualKc**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria. Rio Grande do Sul, p.75. 2019.

ROSENBERG, N.J.; BLAD, B.L.; VERMA, S.B. **Microclimate: the biological environment**. 2° ed. Boston: Awiley- Interscience, 1983. 495p.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE SYMPOSIUM, 3., 1973, Washington. **Proceedings**. Washington: NASA, 1973. v.1, p.309-317.

RUHOFF, A. L.; PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W.; ARAGAO, L. E. O. C.; ROCHA, H. R.; MALHI, Y. S. A MODIS-Based Energy Balance to Estimate Evapotranspiration for Clear-Sky Days in Brazilian Tropical Savanas. **Remote Sensing**, v.4, p.703-725, 2012.

SADLER, E. J.; BAUER, P. J.; BUSSCHER, W. J.; MILLEN, J. A. Site-specific analysis of a droughted corn crop: water use and stress. **Agronomy Journal**, v. 92, p. 403-410, 2000.

SALES, D. L. A.; JÚNIOR, J. A.; CASAROLI, D.; EVANGELISTA, A. W. P.; SOUZA, J. M. F. Estimativa de evapotranspiração e coeficiente de cultura do tomateiro industrial utilizando o algoritmo SAFER. **Irriga**, Botucatu, v.22, n.3, p. 629-640, 2017.

SALGADO, E. **Curso relación agua planta ediciones universitarias**. Valparaíso de la Universidad Católica Valparaíso. Santiago de Chile, 2001. 25p.

SALLES, L. A. S. **Sensoriamento remoto e análise espacial na determinação de processos hidrológicos no bioma Cerrado**. 2020. 180p. Tese (Doutorado em Geociências Aplicadas e Geodinâmica)- Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

SANTOS, F. X. dos.; RODRIGUES, J. J. V.; MONTENEGRO, A. A. de. A.; MOURA, R. F. de. Desempenho de lisímetros de pesagem hidráulica de baixo custo no Semi- Árido nordestino. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.28, n.1, p. 115-124, 2008.

SANTOS, T. V. dos.; FONTANA, D. C.; ALVES, R. C. M. Avaliação de fluxos de calor e evapotranspiração pelo modelo SEBAL com uso de dados do sensor ASTER. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.45, n.5, p. 488-496, 2010.

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.

SCHMIDT, E. W.; VALIATI, M. I. Avaliação do manejo de irrigação para a cultura de feijão (*Phaseolus vulgaris*) irrigada por pivô central na Agrícola Wehrmann em Cristalina - GO. **Revista Campo Digital**, v.1, n.1, p.23-31, 2006.

SCHNEIDER, A. D.; HOWELL, T. A.; MOUSTAFA, A. T. A.; EVETT, S. R.; ABOU-ZEID, W. A simplified weighing lysimeter for monolithic or reconstructed soils. **American Society of Agricultural Engineers**, v.14, n.3, p.267-73, 1998.

SCHUURMANS, J. M.; TROCH, P. A.; VELDHUIZEN, A. A.; BASTIAANSEN, W. G. M.; BIERKENS, M. F. P. Assimilation of remotely sensed latent heat flux in a distributed hydrological model. **Advances in Water Resources**, v. 26, p. 151-159, 2003.

SEEVERS, P. M.; OTTMANN, R. W. Evapotranspiration estimation using a normalized difference vegetation index transformation of satellite data. **Hydrological Sciences Journal**, v. 39, n. 4, p. 333-345, 1994.

SENAY, G. B. Satellite Psychrometric Formulation of the Operational Simplified Surface Energy Balance (SSEBop) Model for Quantifying and Mapping Evapotranspiration. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 34, p. 555-566, 2018.

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.; BUDDE, M. E.; VERDIN, J. P. Enhancing the Simplified Surface Energy Balance (SSEB) Approach for Estimating Landscape ET: Validation with the METRIC model. **Agricultural Water Management**, v. 9, p. 606-618, 2011.

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.; 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.

SENAY, G. B.; SCHAUER, M.; FRIEDRICHS, M.; VELPURI, N. M.; SINGH, R. K. Satellite-based water use dynamics using historical Landsat data (1984-2014) in the southwestern United States. **Remote Sensing of Environment**, v. 202, p. 98-112, 2017.

SENTELHAS, P. C. Agrometeorologia aplicada à irrigação. In: Miranda, J.H.; Pires, R.C.M. (eds.). **Irrigação**. Piracicaba, SP: FUNEP, 2001. 4p. (Série Engenharia Agrícola).

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, Canadá. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 5, p. 635-644, 2010.

SETTE, D. M. Os climas do cerrado do centro-oeste. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.1, n.1, p. 29-42, 2005.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An Analysis of Variance Teste for Normality (Complete Samples). **Biometrika**, v. 52, n. 3.4, p. 591-611, 1965.

SHUKLA, J.; MINTZ, Y. Influence of Land-Surface Evapotranspiration on the Earth's Climate. **Science**, v. 2015, n. 4539, p. 1498-1501, 1982.

SILVA, E. M. Balanço de energia e estimativa da evapotranspiração em culturas irrigadas de maracujazeiro pelo método da razão de Bowen. **Engenharia Agrícola**, v.27, n.2, p.392-403, 2007.

SILVA, L. B. da.; FOLEGATTI, M. V.; VILLA NOVA, N. A. Evapotranspiração do capim Tanzânia obtida pelo método de razão de Bowen e lisímetro de pesagem. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.3, p. 705-712, 2005.

SILVA, V. de. P. R. da.; AZEVEDO, P. V. de.; SILVA, B. B. da.; BASSOI, L. H.; TEIXEIRA, A. H. de. C.; SOARES, J. M.; SILVA, J. A. M. Estimativa da evapotranspiração da mangueira com base no balanço hídrico do solo. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v.5, n.3, p. 456-462, 2001.

SILVA, L. P. V. da. **Automatização da Seleção dos Pixels Âncora no Cálculo da Equação de Balanço de Radiação na Superfície do Algoritmo SEBAL**. Dissertação (Mestrado em Informática) – Departamento de Ciência da Computação, Universidade de Brasília. Brasília, 96p. 2013.

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.

SLAFER, G. A.; RAWSON, H. M. Sensitivity of wheat phasic development to major environmental factors: a re-examination of some assumptions made by physiologists and modellers. **Australian Journal of Plant Physiology**, v. 21, p.393-426, 1994.

SMITH, M. **Report on the expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements**. Rome: FAO, 1991. 45 p.

SMITH, W. K.; GELLER, G. N. Plant transpiration at high elevations: theory, field measurements, and comparisons with desert plants. **Oecologia**, v. 41, p.109-122, 1979.

SOUZA, J. M. F. **Aplicação do algoritmo SAFER na obtenção da evapotranspiração atual das culturas em condições de Cerrado**. 2016. 92p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Goiás, Goiás, 2016.

SOUZA, L. S. B. de.; MOURA, M. S. B. de.; SEDIYAMA, G. C.; SILVA, T. G. F. da. Balanço de energia e controle biofísico da evapotranspiração na Caatinga em condições de seca intensa. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.50, n.8, p.627-636, 2015.

SOUZA, R. G de.; VIEIRA FILHO, J. E. R. **Produção de trigo no Brasil: Indicadores regionais e políticas públicas**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. 41 p. 2020.

SPERA, S. A.; GALFORD, G. L.; COE, M. T.; MACEDO, M. N.; MUSTARD, J. F. Land-use change affects water recycling in Brazil's last agricultural frontier. **Global Change Biology**, v. 22, p. 3405-3413, 2016.

STANNARD, D.I. A theoretically based determination of bowenratio fetch requirements. *Boundary Layer Meteorology*, v.83, p.375-406, 1997.

STERN, W. Evapotranspiration of safflower at three densities of sowing. **Journal of Agriculture Research**, v. 16, p. 961–971, 1965.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. **Determinação da evapotranspiração para fins de irrigação**. EMBRAPA-CNPAP, Goiânia. 49p. 1995.

STOWE, D.; LAMHAMED, M.; MARGOLIS, H. Water relations, cuticular transpiration, and bud characteristics of air-slit containerized *Picea glauca* seedlings in response to controlled irrigation regimes. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 31, p. 2200- 2212, 2011.

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.

SVENNINGSSON, M.; LILJENBERG, C. Changes in cuticular transpiration rate and cuticular lipids of oat (*Avena sativa*) seedlings induced by water stress. **Physiologia Plantarum**, v. 66, p. 9 -14, 2006.

SWENSON, S.; WAHR, J. Estimating Large-Scale Precipitation Minus Evapotranspiration from GRACE Satellite Gravity Measurements. **Journal of Hydrometeorology**, v. 7, n. 2, p. 252–270, 2006.

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**, v. 23, n. 3, p. 251-260, 2015.

TANNER, C. B.; PELTON, W. L. Potential evapotranspiration estimates by approximate energy balance method of Penman. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 65, n.10 p. 3391-3413, 1960.

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

TASUMI, M.; TREZZA, R.; ALLEN, R. G.; WRIGHT, J. L. Operational aspects of satellite-based energy balance models for irrigated crops in the semi-arid U.S. **Irrigation and Drainage Systems**, v. 19, p. 355–376, 2005.

TEIXEIRA, A. H. C.; AZEVEDO, P. V.; SILVA, B. B.; SOARES, J. M. Balanço de energia na cultura da videira, cv. “Itália”. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.2, p.137-141, 1997.

TEIXEIRA, A. H. C. Determining regional actual evapotranspiration of irrigated and natural vegetation in the São Francisco river basin (Brazil) using remote sensing an Penman-Monteith equation. **Remote Sensing**, v. 2, n. 5, 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.

TEIXEIRA, A. H. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; LOPES, H. L.; SCHERER-WARREN, M.; BASSOI, L. H. **Modelagem espaço temporal dos componentes dos balanços de energia e de água no Semiárido brasileiro**. Documentos: 99 - Embrapa Monitoramento por Satélite, Campinas, SP. 32p. 2013b.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, v.38, n.1, p.55-94, 1948.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, 1955. 104p.

THORNTHWAITE, C. W.; WILM, H. G. Report of the committee on evapotranspiration and transpiration. **Transactions of the American Geophysical Union**, v. 25, p. 686-693, 1944.

TIMMERMANS, W. J.; KUSTAS, W. P.; ANDERSON, M. C.; FRENCH, A. N. An intercomparison of the surface energy balance algorithm for land (SEBAL) and the two-source energy balance (TSEB) modeling schemes, **Remote Sensing of Environment**, v. 108, p. 369–384, 2007.

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

TREZZA, R.; ALLEN, R. G.; TASUMI, M. Estimation of actual evapotranspiration along the Middle Rio Grande of New Mexico using MODIS and landsat imagery with the METRIC model. **Remote Sensing**, v. 5, n. 10, p. 5397–5423, 2013.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3 ed. Porto Alegre: Ed. Da UFRGS/ABRH, 2004. 943p.

TUCCI, C. E. M.; BELTRAME, L. F. S. Evaporação e Evapotranspiração. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (ABRH), 2000. p. 253-287.

TURCO, J. E .P.; PERECIN, D.; PINTO JÚNIOR, D. L. P. Influência da acurácia de instrumentos de medidas na comparação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência. **Irriga**, v.13, n.1, p.63-80,2008.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY – USGS. **Landsat 8 (L8) data users handbook**. Six Falls, South Dakota, 2016.

VAN LIEW, M. W.; VEITH, T. L.; BOSCH, D. D.; ARNOLD, J. G. Suitability of SWAT for the Conservation effects assessment project: A comparison on USDA-ARS watersheds. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 12, n. 2, p. 173-189, 2007.

VELOSO, G. A.; FERREIRA, M. E.; SILVA, B. B. da. Determinação da evapotranspiração real diária em áreas irrigadas do projeto Jaíba (Minas Gerais, Brasil), mediante imagens Landsat 5-TM. **Revista Cerrados**, v.15, n.1, p.53-76, 2017.

VICTORIA, D. C. **Estimativa da evapotranspiração da bacia do Ji-Paraná (RO) através de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento**. 2004. 88p. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Agrossistemas) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2004.

XING, Z.; CHOW, L.; MENG, F.R.; REES, H.W.; STEVENS, L.; MONTEITH, J., Validating evapotranspiration equations using Bowen Ratio in New Brunswick, Maritime Canada. **Sensors**, v.8, n. 1. p. 412-428, 2008.

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.

ZWART, S.; BASTIAANSEN, W. SEBAL for detecting spatial variation of water productivity and scope for improvement in eight irrigated wheat systems. **Agricultural Water Management**, v. 89, p. 287-296, 2007.

ZHOU, X.; BI, S.; YANG, Y.; TIAN, F.; REN, D. Comparison of ET estimations by the three-temperature model, SEBAL model and eddy covariance observations. **Journal of Hydrology**, v. 519, p. 769–776, 2014.

WANG, K.; DICKINSON, R. E. A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability. **Reviews of Geophysics**, v. 50, n. 2, p. 1-54, 2012.

WEISER, R. L.; ASRAR, G.; MILLER, G.P.; KANEMASU, E.T. Assessing grassland biophysical characteristics from spectral measurements. **Remote Sensing of Environment**, v.20, n.2, p. 141-152, 1986.

WELIGEPOLAGE, K. **Estimativa da distribuição espacial e temporal da evapotranspiração por sensoriamento remoto por satélite**. Dissertação (Mestrado em Ciências da Geoinformação e Observação da Terra em Recursos Hídricos e Gestão Ambiental), ITC, Instituto Internacional de Ciências da Geoinformação e Observação da Terra, Enschede, 2005, 114p.

YANG, J. Y.; MEI, X. R.; HUO, Z. G.; YAN, C. R.; HUI, J. U.; ZHAO, F. H.; QIN, L. I. U. Water consumption in summer maize and winter wheat cropping system based on SEBAL model in Huang-Huai-Hai Plain, China. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 14, n. 10, p. 2065- 2076, 2015.

YANG, Y.; LONG, D.; SHANG, S. Remote estimation of terrestrial evapotranspiration without using meteorological data. **Geophysical Research Letters**, v. 40, 3026-3030, 2013.

YI, J. L. R.; SHIMABUKURO, Y. E.; QUINTANILHA, J. A. Identificação e mapeamento de áreas de milho na região sul do Brasil utilizando imagens MODIS. **Engenharia Agrícola**, v.27, n.3, p.753-763, 2007.

YIN, L.; WANG, X.; FENG, X.; FU, B.; CHEN, Y. A Comparison of SSEBop-Model-Based Evapotranspiration with Eight Evapotranspiration in the Yellow River Basin, China. **Remote Sensing**, v.12, n.16, 2528, 2020.