



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS E GEODINÂMICA

**AVALIAÇÃO DO MODELO SSEB_{op} NA ESTIMATIVA DE
EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL DA CULTURA DO TRIGO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 155

ÉDIO ALBERTIN MALTA

BRASÍLIA-DF

2019



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS E GEODINÂMICA

AVALIAÇÃO DO MODELO SSEB_{op} NA ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL DA CULTURA DO TRIGO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília como requisito para a obtenção do título de Mestre em Geociências Aplicadas; Área de Concentração: Hidrogeologia e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Henrique Llacer Roig.

BRASÍLIA-DF

2019

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

AED 23a Albertin Malta, Édio
Avaliação do modelo SSEBop na estimativa de
evapotranspiração real da cultura do trigo / Édio Albertin
Malta; orientador Henrique Llacer Roig. -- Brasília, 2019.
98 p.

Dissertação (Mestrado - Mestrado em Geociências
Aplicadas) -- Universidade de Brasília, 2019.

1. Evapotranspiração. 2. trigo. 3. sensoriamento remoto.
4. SSEBop. 5. Landsat. I. Llacer Roig, Henrique, orient.
II. Título.

Cessão de direitos

Nome do Autor: Édio Albertin Malta

Título: Avaliação do modelo SSEBop na estimativa de evapotranspiração real da cultura do trigo

Ano: 2019

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desse relatório 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 desse relatório pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

ÉDIO ALBERTIN MALTA

**AVALIAÇÃO DO MODELO SSEB_{op} NA ESTIMATIVA DE
EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL DA CULTURA DO TRIGO**

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Henrique Llacer Roig

(Instituto de Geociências/UnB - Orientador)

Prof. Dr. João Jose da Silva Junior

(Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária/UnB – Examinador Interno)

Dr. Lineu Neiva Rodrigues

(Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/Embrapa – Examinador Externo)

BRASÍLIA-DF

2019

*Dedico este trabalho à minha avó, Irene, que tanto amo e sinto sua falta por ter nos deixado no meio deste mestrado (**in memoriam**).*

AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial, à minha mãe, Eliane, por todo amor, apoio e incentivo que me permitiram trilhar os mais diversos caminhos, inclusive este. Aos meus irmãos, Alberto e Luciana, pelo companheirismo. Ao meu avô, Édio, por ser um exemplo no qual me espelho. À minha tia, Elaine, por todo carinho.

Aos meus amigos que tornam a vida mais prazerosa.

Ao meu orientador, Roig, pela confiança depositada, ensinamentos e apoio. À professora, Marina, por toda ajuda.

Aos amigos de jornada na UnB. Em especial, ao Leandro por sua positividade que foi determinante para o sucesso de muitas etapas, por tanto que me auxiliou com o trabalho de campo e por todas discussões sobre o tema deste trabalho. Ao Diogo por todo apoio de campo e tantas conversas. À Bianca pelo apoio de campo e pelas discussões sobre o tema deste trabalho. Ainda não poderia deixar de agradecer nominalmente a todos que me ajudaram no trabalho de campo: Luciano, Guilherme e Andrey.

Aos amigos de ANA que também contribuíram com conhecimento, braços no campo e apoio: Morris, Wagner, Juliana e Adriano. E a todos os amigos da sala 109.

Ao técnico da UnB, Mendes, que tantas vezes foi ao campo comigo, pela sua solicitude.

À Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal pelo apoio a pesquisa desenvolvida por meio do financiamento do projeto “Estimativa e monitoramento da demanda de água pela agricultura irrigada por meio de imagens de sensoriamento remoto orbitais e Sistemas Aéreos Não Tripulados”, coordenado pela Professora Marina Bilich.

À CAPES pelo fomento ao programa de pós-graduação em Geociências Aplicada e Geodinâmica do Instituto de Geociências da UnB.

À Agencia Nacional de Águas pela oportunidade, pela liberação para a realização do mestrado e pela disponibilização das estações meteorológicas utilizadas neste trabalho.

À Administração da Fazenda Pamplona, do grupo SLC agrícola, pela disponibilização das áreas de estudo deste trabalho.

À Universidade de Brasília pelo conhecimento.

Errei mais de 9.000 cestas e perdi quase 300 jogos. Em 26 diferentes finais de partidas fui encarregado de jogar a bola que venceria o jogo... e falhei. Eu tenho uma história repleta de falhas e fracassos em minha vida. E é exatamente por isso que sou um sucesso.

Michael Jordan

AVALIAÇÃO DO MODELO SSEBop NA ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL DA CULTURA DO TRIGO

RESUMO

A evapotranspiração é um dos principais componentes do ciclo hidrológico, sendo o seu monitoramento de grande relevância para a gestão eficiente dos recursos hídricos, especialmente em sistemas agrícolas com grande demanda deste recurso. Diversos métodos podem ser utilizados na estimativa da evapotranspiração, em sua distribuição temporal e espacial. A razão de Bowen, fundamentada no balanço de energia, determina com precisão a evapotranspiração real (E_{Tr}) e também pode ser aplicada para testar o desempenho de modelos de sensoriamento remoto, que é uma das alternativas promissoras no cômputo desta variável em termo de escala regional. Portanto, o principal objetivo do presente trabalho é avaliar o desempenho do modelo SSEBop na estimativa da evapotranspiração para a cultura do trigo em condições de Cerrado. Para aplicação do modelo utilizou-se imagens obtidas pelos satélites Landsat 7 e Landsat 8, correspondendo ao período de cultivo do trigo nos anos de 2017, 2018 e 2019. Posteriormente, os resultados do modelo SSEBop foram comparados à evapotranspiração real determinada pelo método da razão de Bowen, calculada a partir de dados coletados por estações micrometeorológicas instaladas nos pivôs experimentais. A análise de desempenho do modelo SSEBop para todos os anos em conjunto apontou R² de 0,82 e coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe equivalente a 0,73, indicando um bom desempenho. O RMSE encontrado foi de 0,16 e pRMSE de 3,27%. Segundo o índice BIAS o modelo subestimou a E_{Tr} em 0,06 mm.d⁻¹, ou -5,53%. Com base nos resultados pode-se concluir que o algoritmo SSEBop apresenta bom desempenho na estimativa da E_{Tr} para a cultura do trigo.

Palavras-chave: sensoriamento remoto, SSEBop, Landsat, razão de Bowen.

EVALUATION OF THE SSEBop MODEL IN THE REAL EVAPOTRANSPIRATION ESTIMATE OF WHEAT CROP

ABSTRACT

Evapotranspiration is one of the main components of the hydrological cycle, and its monitoring is of great relevance for the efficient management of water resources, especially in agricultural systems with high demand for this resource. Several methods can estimate evapotranspiration in its temporal and spatial distribution. The energy balance-based Bowen ratio accurately determines the actual evapotranspiration (ET_r) and can also be applied to test the performance of remote sensing models, which is one of the promising alternatives in calculating this variable at regional scale. Therefore, the main objective of the present work is to evaluate the performance of the SSEBop model in the estimation of evapotranspiration for wheat crop under Cerrado conditions. For the application of the model was used images obtained by Landsat 7 and Landsat 8 satellites, corresponding to the wheat cultivation period in 2017, 2018 and 2019. Subsequently, the SSEBop model results were compared to the actual evapotranspiration determined by the Bowen ratio method, calculated from data collected by micrometeorological stations installed in the experimental pivots. The performance analysis of the SSEBop model for all the years together indicated R² of 0.82 and Nash-Sutcliffe efficiency coefficient of 0.73, indicating good performance. The RMSE was 0.16 and pRMSE 3.27%. According to the BIAS index, the model underestimated the ET_r by 0.06 mm.d⁻¹, or -5.53%. Based on the results, it can be concluded that the SSEBop algorithm performs well in estimating ET_r for the wheat crop.

Keywords: remote sensing, SSEBop, Landsat, Bowen ratio.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localização da Fazenda Pamplona onde foi desenvolvido o experimento.	34
Figura 2. Estação micrometeorológica utilizada na obtenção dos dados para aplicação do método da razão de Bowen.	36
Figura 3. Radiação solar de ondas curtas incidente (medida pela estação meteorológica instalada no pivô) e a R_{so} calculada nos seguintes dias de céu claro 19, 20 e 21 de julho de 2018.	50
Figura 4. Radiação solar incidente obtida pela estação 1($R_{s\downarrow 1}$) e estação 2 ($R_{s\downarrow 2}$) no pivô de trigo em 2017.	51
Figura 5. Radiação solar incidente obtida pela estação 1($R_{s\downarrow 1}$) e estação 2 ($R_{s\downarrow 2}$) no pivô de trigo em 2018.	51
Figura 6. Radiação solar incidente obtida pela estação 1($R_{s\downarrow 1}$) e estação 2 ($R_{s\downarrow 2}$) no pivô de trigo em 2019.	52
Figura 7. Radiação solar refletida obtida pela estação 1($R_{s\uparrow 1}$) e estação 2 ($R_{s\uparrow 2}$) no pivô de trigo em 2017.	53
Figura 8. Radiação solar refletida obtida pela estação 1 ($R_{s\uparrow 1}$) e estação 2 ($R_{s\uparrow 2}$) no pivô de trigo em 2018.	53
Figura 9. Radiação solar refletida obtida pela estação 1($R_{s\uparrow 1}$) e estação 2 ($R_{s\uparrow 2}$) no pivô de trigo em 2019.	54
Figura 10. Valores de temperatura obtidos pelos sensores 1 (T1) e 2 (T2) das estações 1 (a) e 2 (b) em 2017.	55
Figura 11. Valores de temperatura obtidos pelos sensores 1 (T1) e 2 (T2) das estações.	56
Figura 12. Valores de temperatura obtidos pelos sensores 1 (T1) e 2 (T2) das estações.	56
Figura 13. Valores de umidade relativa obtidos pelos sensores 1 (UR1) e 2 (UR2) das estações 1 (a) e 2 (b) em 2017.	57
Figura 14. Valores de umidade relativa obtidos pelos sensores 1 (UR1) e 2 (UR2) das estações 1 (a) e 2 (b) em 2018.	57
Figura 15. Valores de umidade relativa obtidos pelos sensores 1 (UR1) e 2 (UR2) das estações 1 (a) e 2 (b) em 2019.	57
Figura 16. Curvas de evapotranspiração na cultura do trigo pelo método da razão de Bowen no ano de 2017 estimadas pelas estações 1 e 2.	60
Figura 17. Curvas de evapotranspiração na cultura do trigo pelo método da razão de Bowen no ano de 2018 estimadas pelas estações 1 e 2.	61
Figura 18. Curvas de evapotranspiração na cultura do trigo pelo método da razão de Bowen no ano de 2019 estimadas pelas estações 1 e 2.	61
Figura 19. Comportamento temporal da curva de evapotranspiração de referência (E _{To}).	63
Figura 20. Imagens de NDVI do pivô experimental de trigo do ano de 2017.	64
Figura 21. Gráfico dos valores de NDVI médio, máximo e mínimo de toda área do pivô experimental de 2017 e também do pixel da estação.	65
Figura 22. Imagens de NDVI do pivô experimental de trigo do ano de 2018.	65
Figura 23. Gráfico dos valores de NDVI médio, máximo e mínimo de toda área do pivô experimental de 2018 e também do pixel da estação.	66
Figura 24. Imagens de NDVI do pivô experimental de trigo do ano de 2019.	66
Figura 25. Gráfico dos valores de NDVI médio, máximo e mínimo de toda área do pivô experimental de 2019 e também do pixel da estação.	67
Figura 26. Imagens de T_s (K) do pivô experimental de trigo do ano de 2017.	69

Figura 27. Gráfico dos valores de Ts (K) médio, máximo e mínimo de toda área do pivô experimental de 2017 e também do pixel da estação.....	69
Figura 28. Imagens de Ts do pivô experimental de trigo do ano de 2018.....	70
Figura 29. Gráfico dos valores de Ts médio, máximo e mínimo de toda área do pivô experimental de 2018 e também do pixel da estação.....	70
Figura 30. Imagens de Ts do pivô experimental de trigo do ano de 2019.....	71
Figura 31. Gráfico dos valores de Ts médio, máximo e mínimo de toda área do pivô experimental de 2019 e também do pixel da estação.....	71
Figura 32. Imagens de $ET_{rSSEBop}$ do pivô experimental de trigo do ano de 2017.....	73
Figura 33. Gráfico dos valores de $ET_{rSSEBop}$ médio, máximo e mínimo de toda área do pivô experimental de 2017 e também do pixel da estação.....	74
Figura 34. Gráfico do ciclo de trigo de 2017 com as seguintes variáveis que afetam o modelo SSEBop: Temperaturas de superfície (Ts), de pixel frio (Tc), de pixel quente (Th) e ambiente (Ta), além da irrigação.....	75
Figura 35. Imagens de $ET_{rSSEBop}$ do pivô experimental de trigo do ano de 2018.....	76
Figura 36. Gráfico dos valores de $ET_{rSSEBop}$ médio, máximo e mínimo de toda área do pivô experimental de 2018 e também do pixel da estação.....	77
Figura 37. Gráfico do ciclo de trigo de 2018 com as seguintes variáveis que afetam o modelo SSEBop: Temperaturas de superfície (Ts), de pixel frio (Tc), de pixel quente (Th) e ambiente (Ta), além da irrigação.....	78
Figura 38. Imagens de $ET_{rSSEBop}$ do pivô experimental de trigo do ano de 2019.....	79
Figura 39. Gráfico dos valores de $ET_{rSSEBop}$ médio, máximo e mínimo de toda área do pivô experimental de 2019 e também do pixel da estação.....	79
Figura 40. Gráfico do ciclo de trigo de 2019 com as seguintes variáveis que afetam o modelo SSEBop: Temperaturas de superfície (Ts), de pixel frio (Tc), de pixel quente (Th) e ambiente (Ta), além da irrigação.....	81
Figura 41. Evapotranspiração real estimada pelo modelo SSEBop ($ET_{rSSEBop}$) em função da evapotranspiração real calculada pelo método da razão de Bowen (ET_{rRB}) para a cultura do trigo em 2017.....	82
Figura 42. Evapotranspiração real estimada pelo modelo SSEBop ($ET_{rSSEBop}$) em função da evapotranspiração real calculada pelo método da razão de Bowen (ET_{rRB}) para a cultura do trigo em 2018.....	82
Figura 43. Evapotranspiração real estimada pelo modelo SSEBop ($ET_{rSSEBop}$) em função da evapotranspiração real calculada pelo método da razão de Bowen (ET_{rRB}) para a cultura do trigo em 2019.....	83
Figura 44. Evapotranspiração real estimada pelo modelo SSEBop ($ET_{rSSEBop}$) em função da evapotranspiração real calculada pelo método da razão de Bowen (ET_{rRB}) para a cultura do trigo nos anos de 2017, 2018 e 2019.....	83
Figura 45. Evapotranspiração real diária estimada pelo modelo SSEBop para todos os anos do experimento (2017, 2018 e 2019) - com interpolação da ET_f multiplicada pela ET_o - em função da evapotranspiração real diária calculada pelo método da razão de Bowen (ET_{rRB}) para a cultura do trigo nos anos de 2017, 2018 e 2019.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Cronologia dos 3 anos de experimento com a cultura do trigo na fazenda Pamplona, informando para cada ano a data de plantio, de colheita e o período que a estação micrometeorológica ficou instalada no interior do pivô.....	35
Tabela 2. Média dos valores diários de fluxo de calor no solo para cada ciclo de trigo medido pelas estações 1 e 2 no período de 2017 a 2019.	55
Tabela 3. Percentual de inconsistências totais identificados nos dados de fluxo de calor latente (LE), fluxo de calor sensível (H) e razão de Bowen (β) nas estações 1 e 2 no período de 7 as 18 no ano de 2017 em duas situações: dados de umidade calibrados e não calibrados.....	58
Tabela 4. Percentual de inconsistências totais identificados nos dados de fluxo de calor latente (LE), fluxo de calor sensível (H) e razão de Bowen (β) nas estações 1 e 2 no período de 7 as 18 no ano de 2018 em duas situações: dados de umidade calibrados e não calibrados.....	59
Tabela 5. Percentual de inconsistências totais identificados nos dados de fluxo de calor latente (LE), fluxo de calor sensível (H) e razão de Bowen (β) nas estações 1 e 2 no período de 7 as 18 no ano de 2019 em duas situações: dados de umidade calibrados e não calibrados.....	59
Tabela 6. Indicadores de desempenho calculados para análise do modelo SSEBop.....	84
Tabela 7. Indicadores de desempenho calculados para análise do modelo SSEBop diário.	86
Tabela 8. Acumulado de ET_{RB} e ET_{SSEBop} para o período em que a estação agrometeorológica ficou no campo coletando os dados necessários para o cálculo da razão de Bowen.....	86

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Principais métodos diretos e indiretos utilizados na estimativa da evapotranspiração.	25
Quadro 2. Equipamentos instalados na estação micrometeorológica.	36
Quadro 3. Informações das bandas espectrais dos satélites Landsat 7 e Landsat 8 utilizadas neste trabalho.	45

LISTA DE ABREVIATURAS

ANA	Agência Nacional de Águas
BIAS	Erro médio
c	Fator de correção da imagem
CLP	Camada limite planetária
C _p	Calor específico
DN	Número digital
dT	Diferença predefinida entre as temperaturas de pixel quente e de pixel frio
E	Coefficiente de eficiência Nash e Sutcliffe
e _a	Pressão real de vapor
e _s	Pressão de vapor do ar saturado
ET	Evapotranspiração
ET _c	Evapotranspiração da cultura
ET _f	Fração de evapotranspiração da superfície
ET _o	Evapotranspiração de referência
ET _p	Evapotranspiração potencial
ET _r	Evapotranspiração real
ET _{rRB}	Evapotranspiração real calculada pela razão de Bowen
ET _{rSSEBop}	Evapotranspiração real estimada pelo modelo SSEBop
G	Fluxo de calor no solo
H	Fluxo de calor sensível
IAF	Índice de área foliar
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
k	Coefficiente que expressa a máxima evapotranspiração da cultura em relação à evapotranspiração de referência (ET _o)
LE	Fluxo de calor latente
L _λ	Radiância espectral
METRIC	Mapping Evapotranspiration at High Resolution and Internalized Calibration

NDVI	Índice 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
Rn	Saldo de radiação
Rs↓	Radiação solar de ondas curtas incidente
Rso	Radiação solar em dias claros
SAFER	Simple Algorithm model For Evapotranspiration Retrieving
SEBAL	Surface Energy Balance Algorithm for Land
SMAP	Soil Moisture Accounting Procedure
SSEBop	Operational Simplified Surface Energy Balance
T	Temperatura
Ta	Temperatura do ar
Tc	Temperatura de superfície estimada para a condição de pixel frio
Th	Temperatura de superfície estimada para a condição de pixel quente
Tmax	Temperatura máxima do ar
Ts	Temperatura de superfície
u	Velocidade do vento
UR	Umidade relativa do ar
USGS	United States Geological Survey
z	Altitude local
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

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1 A cultura do trigo	19
2.2 A evapotranspiração	20
2.3 Métodos aplicados na estimativa da evapotranspiração.....	23
2.5 Modelos que utilizam sensoriamento remoto para estimar a evapotranspiração	28
3.1 Localização da Área experimental	34
3.2 Materias utilizados	35
3.3 Evapotranspiração real diária calculada pelo método da razão de Bowen.	37
3.4 Evapotranspiração real calculada pelo modelo SSEBop	40
3.4.1 Dados meteorológicos.....	44
3.4.2. Dados de sensoriamento remoto	44
3.5 Avaliação de desempenho do modelo SSEBop	48
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1 Análise dos dados das estações meteorológicas	50
4.2 Estimativa da evapotranspiração real pelo método da razão de Bowen.....	60
4.3 Dados para implementar o modelo SSEBop.....	62
4.3.1 Evapotranspiração de referência.....	62
4.3.2. Dados de sensoriamento remoto	63
4.3.2.1. NDVI.....	64
4.3.2.2. Temperatura de Superfície – Ts	68
4.4. Evapotranspiração real da cultura de trigo gerada pelo modelo SSEBop.....	72
4.4.1 Resultados da $ET_{rSSEBop}$ para o ano de 2017	72
4.4.2 Resultados da $ET_{rSSEBop}$ para o ano de 2018.....	76
4.4.3 Resultados da $ET_{rSSEBop}$ para o ano de 2019.....	78
4.5. Avaliação de desempenho do modelo SSEBop	81
4.6. Avaliação de desempenho do modelo SSEBop diário	85
5. CONCLUSÕES	88
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	89
7. REFERÊNCIAS	90

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por alimentos, água e energia em um cenário de mudanças climáticas, colaboram para a insuficiência destes recursos. A agricultura é responsável pelo abastecimento mundial de alimentos, e para garantir essa produção é o setor de maior demanda de água. Segundo a FAO (2017) essa atividade é responsável por cerca de 70% do uso de água doce no mundo.

O Brasil está entre os 10 países com maior área irrigada no mundo e o volume anual captado atribuído à irrigação é superior a 35 km³ (FAO, 2016). Apesar de ser um dos países com maior área irrigada - 6,95 milhões de hectares, em 2015 - (ANA, 2017a), o Brasil ainda não atingiu seu potencial e vem expandindo a área irrigada. Em 2006 eram 4,55 milhões de hectares (IBGE, 2006) e as projeções apontam que em 2030 serão 10,09 milhões de hectares (ANA, 2017b). Diante deste cenário, para que haja disponibilidade de água para todos e se evite conflitos pelo uso é primordial quantificar a demanda hídrica das culturas para que os agricultores não desperdicem água aplicando quantidades maiores do que o necessário, bem como para que os órgãos gestores de recursos hídricos consigam avaliar as demandas adequadamente. Uma das formas de quantificar a demanda hídrica das culturas agrícolas é por meio da estimativa da evapotranspiração (REYES-GONZÁLEZ et al., 2018).

Compreender a variação temporal e espacial da evapotranspiração é relevante para o gerenciamento de bacias hidrográficas, uma vez que a água disponível – no solo e nos rios – é significativamente deplecionada pela transferência de água para atmosfera realizada pelas culturas agrícolas irrigadas e de sequeiro, além da vegetação natural (BASTIAANSEN et al., 2005).

Segundo Allen et al., (1998) esse fenômeno da evapotranspiração é o somatório da evaporação de água contida na superfície do solo com a transpiração das plantas. Existem diversos métodos diretos e indiretos para estimativa da evapotranspiração, a medição por lisímetros é uma das alternativas (JENSEN, 1968). A aplicação de modelos matemáticos é outra possibilidade, a exemplo do método de Penman-Monteith (PENMAN, 1948) que considera aspectos aerodinâmicos e termodinâmicos, incluindo a resistência de calor sensível que adaptado no documento FAO-56 (ALLEN et al., 1998) se tornou uma equação padrão largamente utilizada para estimativa da evapotranspiração.

Outro método físico-matemático é a razão de Bowen (BOWEN, 1926), que está apoiada no princípio do balanço de energia, expondo a relação entre os fluxos de calor sensível e latente. Este método tem como principal elemento a radiação solar admitida na superfície terrestre, sendo bastante aplicada pela praticidade do seu desenvolvimento metodológico, determinando com precisão a evapotranspiração das culturas agrícolas em distintas condições climáticas. No entanto, a necessidade de instalação de estação meteorológica em campo é um fator limitante devido ao custo dos equipamentos, bem como a necessidade de mão de obra especializada para operação da estação.

Nesse contexto, a utilização do sensoriamento remoto para estimativa da evapotranspiração é uma alternativa promissora, já que a sua aplicação tem custos relativamente menores quando comparado a outros métodos e sua cobertura espacial é superior às medições de campo (ALLEN et al., 2011). Essa técnica tem sido aperfeiçoada nos últimos anos com o desenvolvimento de sensores orbitais, proporcionando a determinação da evapotranspiração em áreas heterogêneas com estádios fenológicos distintos apresentados pelas culturas agrícolas (WARREN et al., 2014; YANG et al., 2013; MINACAPILLI et al., 2009).

Segundo Gebremichael et al., (2010) a evapotranspiração não é estimada diretamente por sensores orbitais, mas pode ser medida a partir da radiação da superfície com modelos semi-empíricos, a princípio fundamentados no fluxo de calor latente como parâmetro residual do balanço de energia. A elevada aplicabilidade do sensoriamento remoto induziu a criação de diversos modelos para estimativa da evapotranspiração, um deles é o algoritmo SSEBop (*Operational Simplified Surface Energy Balance*) embasado na temperatura de superfície e no índice de vegetação foliar (SENAY, 2013).

Elaborado por Senay et al., (2013), o modelo SSEBop determina a evapotranspiração real das culturas agrícolas em condições de contorno predefinidos para a temperatura de superfície onde o fluxo de calor latente atinge gradientes máximos e mínimos. A vantagem de sua aplicação está relacionada a parametrização simples quando comparada a modelos como o SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*) (BASTIAANSEN et al., 1998). Estudos apontam o modelo SSEBop com boa precisão na estimativa da evapotranspiração nos locais avaliados (SENAY et al., 2014; SINGH et al., 2014; SENAY et al., 2016).

Embora o modelo SSEBop tenha sido aplicado com sucesso em algumas regiões do mundo, ainda são poucos os trabalhos desenvolvidos na região do cerrado brasileiro. Na região do cerrado, Paula et al. (2019) encontrou bom desempenho ($R^2 = 0,88$ e $RMSE = 0,62\text{mm.d}^{-1}$)

para o modelo com as culturas de soja e feijão em 2016. Lopes et al (2019) testou o modelo com a cultura do trigo para o ano de 2017 e concluiu que o modelo é confiável ($R^2 = 0,82$ e $RMSE = 0,89\text{mm.d}^{-1}$) para estimar evapotranspiração real. No entanto, esses dois trabalhos acompanharam apenas um ciclo de cada cultura o que torna as conclusões estatisticamente pouco robustas. Existe uma carência de series mais longas para garantir a confiabilidade do modelo SSEBop para estimar a evapotranspiração real e sua aplicabilidade no auxílio do manejo de culturas agrícolas e na gestão de recursos hídricos.

O prosseguimento da avaliação do modelo SSEBop com a cultura do trigo nos anos de 2018 e 2019, amplia a série de avaliação de evapotranspiração da cultura pelo modelo para 3 anos, permitindo sua avaliação sob variações de tipo de solo (argiloso e cascalhoso), já que, em cada ciclo, foram utilizados pivôs centrais diferentes. A avaliação dos 3 ciclos de trigo deve permitir demonstrar sua confiabilidade e aplicabilidade do modelo SSEBop na estimativa da evapotranspiração real da cultura do trigo.

Diante do contexto e da relevância da evapotranspiração no ciclo hidrológico e na determinação da demanda de água pelas culturas agrícolas, o presente estudo tem por objetivo:

- Avaliar o desempenho do modelo SSEBop na estimativa da evapotranspiração real da cultura do trigo em sistema irrigado nas condições do Cerrado por um período de três ciclos da cultura.

Para atingir esse objetivo as seguintes etapas foram desenvolvidas:

1. Determinar a evapotranspiração real do trigo pelo método da razão de Bowen;
2. Determinar a evapotranspiração real do trigo pelo SSEBop; e
3. Avaliar o modelo SSEBop em comparação ao método da razão de Bowen.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A cultura do trigo

Relatos históricos indicam que o trigo teve origem a partir do cruzamento entre espécies silvestres de gramíneas presentes nos arredores dos rios Tigre e Eufrates, região da Mesopotâmia (atual Iraque, Síria e Turquia), há cerca de 10.000 a 15.000 a.c, tornando-a uma das primeiras culturas de cereais cultivadas (SILVA et al., 1996). O trigo tem importância significativa para a economia global, justamente por se tratar de um dos três cereais mais cultivados no mundo, assim como, o milho e o arroz (TAKEITI, 2015).

O trigo é uma cultura da família *Gramineae*, da tribo *Triticae* e do gênero *Triticum* (CRUZ; KOBLIZ, 2011). É uma planta monocotiledônea e seu ciclo produtivo é definido em períodos de: emergência, perfilhamento, alongação, emborrachamento, espigamento, floração e amadurecimento. A variação da duração do ciclo varia de acordo com a cultivar estabelecida, disponibilidade de água e condições climáticas (LIMA, 2010). A elevada adaptação edafoclimática do trigo permite seu cultivo tanto em regiões de clima desértico quanto em regiões extremamente úmidas (RIBEIRO JÚNIOR et al., 2007).

É um alimento básico da alimentação humana, que possui um histórico de cultivo muito associado ao desenvolvimento das civilizações e capaz de fornecer 20% de todas as calorias consumidas pelo homem. O grande diferencial desta cultura é possuir um tipo de proteína com certa elasticidade, chamada glúten, não encontrada em outros grãos (DA SILVA, 2011).

No Brasil, o cultivo do trigo teve início no ano de 1534 na Capitania Hereditária de São Vicente, que hoje é o Estado de São Paulo. Devido às diversas condições climáticas do país, especialmente a predominância do clima quente, a expansão da cultura foi dificultada. Somente na metade do século XVIII que o trigo começou a se desenvolver no Rio Grande do Sul (ABITRIGO, 2019).

Atualmente a região sul do país é o local onde mais se produz trigo no Brasil, seguidos por Sudeste e Centro-Oeste. Em cerca de 90% dessas áreas plantadas, é utilizado o sistema de plantio direto, onde se promove o menor revolvimento possível do solo, reduzindo perdas de água e preservação de características geomorfológicas (RUBERT, 2013).

A região do Cerrado do Brasil avaliada neste estudo tem grande potencial para a expansão da cultura de trigo, por oferecer ótimas condições de clima e solo, posição estratégica

de mercado e capacidade de industrialização, além de poder ser colhido na entressafra da produção (ALBRECHT et al., 2007).

A demanda maior do que a produção nacional gera a possibilidade de expansão da área cultivada de trigo para atender o mercado interno, incentivando a busca por soluções de aumento de produtividade da cultura. Para auxiliar nesta questão, o melhoramento genético cumpre um importante papel, visando o desenvolvimento de cultivares adaptadas, capazes de resistir a maiores níveis de toxicidade do solo, resistentes às pragas e doenças e diversas condições edafoclimáticas e com maior produtividade de grãos (DA SILVA, 2011).

Além do melhoramento genético, o controle da irrigação também é uma atividade que contribui para o aumento de produtividade da cultura. Frizzone et al. (1985) já citavam a importância da irrigação para trigo cultivado na região do Cerrado Brasileiro, através de estudos sobre os efeitos de distintas frequências e lâminas de irrigação.

A fim de adotar um sistema de controle de irrigação mais eficiente é relevante conhecer a taxa de evapotranspiração das plantas cultivadas, pois com base nesse fator é determinada a quantidade de água que deve ser disponibilizada para as plantas. Para a estimativa deste é necessário conhecer principalmente as condições atmosféricas locais, disponibilidade hídrica e os fatores biológicos de cada planta. (SUYKER; VERMA, 2018)

A evapotranspiração, porém, é de difícil obtenção de maneira experimental, devido aos diversos parâmetros envolvidos na estimativa deste processo biológico (PEREIRA et al., 1997). O uso de modelos físicos associados ao sensoriamento remoto para o cálculo desta variável é uma alternativa para estimar a necessidade hídrica dos cultivares no campo sem a necessidade de instalação de equipamentos onerosos no campo e sua constante manutenção. São, portanto, alguns destes modelos o objeto de estudo nesta pesquisa.

2.2 A evapotranspiração

É estimado que entre 59% e 67% (OKI e KANAE, 2006; CHURCH, 1996; DAI et al., 2009; TRENBERTH et al., 2007) do volume total de água precipitada no solo retorna à atmosfera por meio da evapotranspiração, portanto é um parâmetro fundamental do ciclo hidrológico, atuando como agente regulador nos níveis de bacias hidrográficas (KITE; DROOGERS, 2000). O fenômeno da evapotranspiração (ET) consiste no deslocamento de água

presente na superfície terrestre em direção à atmosfera, combinando o processo de evaporação da água na superfície (solo, vegetação e corpos hídricos) com a transpiração da cobertura vegetal (ALLEN et al., 1998).

A evaporação não ocorre na ausência de energia, que é primordialmente fornecida pela radiação solar. Além da energia, outro fator que influencia a liberação de vapor de água pela superfície evaporante é a diferença de pressão de vapor entre a superfície evaporante e o ar atmosférico no entorno da superfície (ALLEN et al., 1998). Considerando os fatores que afetam a evaporação, Allen et al. (1998) afirma que a radiação solar, temperatura do ar, humidade do ar e velocidade do vento são os parâmetros climatológicos a serem considerados ao se estimar a evaporação.

A transpiração pode ser definida como a vaporização da água existente nos tecidos das plantas, que é absorvida pelas raízes e transportada pela planta e sua liberação para a atmosfera é controlada pelos estômatos presentes nas folhas. Quase toda água absorvida pela planta é liberada na transpiração e apenas uma pequena fração é incorporada aos tecidos das plantas. Os mesmos fatores climatológicos que afetam a evaporação são considerados para estimar a transpiração – radiação solar, temperatura do ar, humidade do ar e velocidade do vento – no entanto a transpiração também é influenciada pela disponibilidade de água no solo, condutividade do solo e características fisiológicas da planta (ALLEN, et al., 1998).

A introdução do termo evapotranspiração no meio científico foi apresentada pelo cientista Charles Warren Thornwaite no começo da década de 40, expressando a simultaneidade da transpiração das plantas e evaporação de água das camadas do solo. Em 1948 Howard Penman iniciou em suas obras o conceito de evapotranspiração potencial (ETp) definida pela transferência de água para atmosfera através do complexo solo-planta em condições padronizadas onde a superfície natural é totalmente coberta por vegetação baixa, distribuída uniformemente, agregada de elevado índice de área foliar (IAF) e crescimento ativo em estágio adulto (GONSAGA et al., 2011).

O método combinado associa termos diabáticos como o saldo de energia na superfície e adiabáticos com processos de transferência pelos componentes aerodinâmicos da evaporação. Em 1960 Monteith inclui ao método combinado utilizado por Penman, a função de resistência da superfície para a transferência de vapor (ALLEN et al., 1998). Além de conciliar os aspectos aerodinâmicos e termodinâmicos o ajuste incluiu a resistência de calor sensível e a resistência

do dossel da planta à transferência de vapor de água, possibilitando a estimativa direta da evapotranspiração da cultura (ET_c) (DOORENBOS; PRUITT, 1975).

A intensificação dos estudos referentes à evapotranspiração ocorreu na década de 90 onde foi padronizado o conceito de evapotranspiração de referência (ET_o), sendo um parâmetro indicativo da demanda hídrica das plantas em determinado período e local (PEREIRA et al., 1997).

A evapotranspiração é conduzida por vários fatores atmosféricos e a partir de suas interações possibilitam a ocorrência do fenômeno. Nos períodos de maior disponibilidade de energia solar, temperatura e velocidade do vento e baixas porcentagens de umidade relativa, a demanda evaporativa da atmosfera será maior e aumentará a taxa de evapotranspiração, isso se a umidade do solo não for agente restritivo (TAGLIAFERRE et al., 2015). A radiação solar exerce maior influência sobre o fenômeno e quando disponível é a principal fonte de energia em sistemas naturais, colaborando à perda de água em superfícies sob cobertura vegetal (PEREIRA et al., 2014). Contudo, nem toda energia que alcança a superfície é aproveitada no processo da evapotranspiração, parte (que depende da quantidade de umidade presente no solo) é transformada em energia térmica e aquece o solo e a atmosfera (ALLEN et al., 1998).

Dentre os fatores climáticos que regem a evapotranspiração, a temperatura do ar em seu acréscimo provoca no sistema um aumento na energia cinética das moléculas ampliando a pressão de saturação de vapor, desprendendo as moléculas do corpo líquido. Outro fator de influência é a umidade relativa do ar, compreendida como a quantidade de vapor de água relacionada à capacidade máxima de armazenamento do ar em determinadas temperaturas. Em ponto de saturação sua capacidade evaporativa se reduz, não havendo espaço para incorporação de moléculas de água, por isso, em regiões tropicais com predominância de clima úmido, a capacidade evaporativa do sistema é prejudicada, mesmo na presença de alta disponibilidade de energia (MEDEIROS, 2008).

O vento conforme sua velocidade apura a camada de ar na superfície evaporativa, reduzindo a resistência aerodinâmica e aumentando a evapotranspiração (ALLEN et al., 1998). Regiões onde há ocorrência de fortes advecções influenciam o processo de evaporação e reduzem a importância da radiação líquida, onde o movimento de calor sensível vindo de áreas circunvizinhas alteram a evapotranspiração, agora com mais energia, ressaltando a importância da umidade relativa e da velocidade do vento (CHANG, 1968; SILVA et al., 2005)

O fornecimento de água ao sistema via irrigação, também pode interferir na demanda evapotranspirativa, pois, modifica a conjunção climática ao provocar o resfriamento do ar e assim, influenciando a evapotranspiração local (ALLEN; PRUITT, 1986). Outros fatores não climáticos que também afetam a evapotranspiração das culturas estão relacionados à fertilidade e salinidade do solo, rugosidade do dossel das plantas, reflexão e cobertura do solo (ALLEN et al., 1998).

2.3 Métodos aplicados na estimativa da evapotranspiração

A mensuração da ET é importante para as atividades agrícolas, tendo em vista que para haver um manejo eficiente da irrigação é necessário a avaliação da demanda hídrica das culturas agrícolas. Portanto, uma alternativa viável e muito difundida é a determinação da evapotranspiração (Rana and Katerji, 2000; Verstraeten et al., 2008; Wang and Dickinson, 2012). São várias as possibilidades para sua estimativa, incluindo métodos diretos como a utilização de lisímetros, indiretos por meio de modelos teóricos físico-matemáticos e orbitais utilizando sensoriamento remoto aplicado a algoritmos.

Considerando os métodos diretos, a aplicação de lisímetros é um dos mais comuns, inclusive sua utilização é apresentada para calibração e validação de outros modelos de evapotranspiração (WANG e DICKINSON, 2012). Allen e colaboradores (2011) citam que valores como 0,02 a 0,6mm são a precisão encontrada para lisímetros de pesagem, entretanto é preciso gerenciar adequadamente as variáveis ambientais, caso contrário o sistema perde a acurácia e pode apresentar valores subestimando ou superestimando a ET em mais de 50%. A partir das variáveis que são controladas num experimento com lisímetro, como escoamento, percolação, infiltração e precipitação, é possível mensurar a evapotranspiração real (ET_r) ou potencial (ET_p). Quando o interesse é determinar a ET_r as condições naturais de umidade do solo são mantidas. Já na determinação da ET_p é necessário a aplicação da irrigação na cultura de interesse, mantendo o solo em sua total capacidade de campo (TUCCI, 2001).

Os modelos empíricos adotam variáveis meteorológicas associadas a condições edáficas das plantas, podendo determinar o fluxo de vapor de água dentro do sistema solo-planta e assim determinar a evapotranspiração potencial e de referência (ROJAS; SHEFFIELD, 2013). Contudo, diversos dados utilizados nos modelos não estão amplamente disponíveis, fato que dificulta sua aplicação e exige o uso de modelos simplificados, como é o caso da equação de

Penman-Monteith bastante utilizada devido sua calibração e diversos testes por uma variedade de lisímetros. Porém, os dados requeridos para sua aplicação, especialmente em países em processo de desenvolvimento, por vezes não estão disponíveis, ou a densidade de estações que os coletam são baixas. No caso de ausência de alguns parâmetros climáticos, Allen et al. (1998) recomenda equações menos exigentes quanto aos dados de entrada, como alternativa para a estimativa da evapotranspiração de referência, uma delas é a equação de HARGREAVES & SAMANI (1985).

Modelos de balanço de energia com dados micrometeorológicos é outra alternativa. A aproximação da razão de Bowen é a mais comum, solucionando a equação do balanço de energia ao utilizar gradientes de temperatura e pressão de vapor. Quando o objetivo do estudo aborda curtos períodos de tempo, a instrumentação necessária e o desenvolvimento técnico geralmente tendem a limitar o método. Para escalas temporais de anuidade os resultados obtidos são eficientes, já que as medições são precisas e obtidas em condições de ambiente natural (JENSEN; BURMAN; ALLEN, 1989).

A estimativa da evapotranspiração por meio de sensoriamento remoto envolve o desenvolvimento de algoritmos específicos podendo ser utilizados em sistemas agrícolas. São métodos com aplicação relativamente simples devido ao dossel, altura e vigor das plantas estarem distribuídos uniformemente. A interdependência dos fatores atmosféricos e climáticos, e variabilidade temporal e espacial, impedem a elaboração de um modelo que abranja os diferentes tipos de culturas em condições ambientais variadas, portanto a recomendação é que seja adotado o algoritmo mais eficiente na estimativa da evapotranspiração, que considere além das características intrínsecas das plantas, a altitude do local de referência (ROJAS; SHEFFIELD, 2013).

De acordo com os procedimentos apresentados, a Quadro 1 traz um compilado dos principais métodos de medida direta e indireta para estimativa da evapotranspiração. Neste estudo não se pretende analisar de forma exaustivas todos os métodos para a quantificação da ET, assim o foco será a razão de Bowen e o uso de sensoriamento remoto (modelo SSEBop).

Quadro 1. Principais métodos diretos e indiretos utilizados na estimativa da evapotranspiração.

Medida	Tipo	Método	Escala temporal	Escala espacial
DIRETA	Lisímetro	Pesagem	0,5 horas- anual	Pontual
		Drenagem		
	Empírico	Thorntwaite	Mensal	Regional
		Camargo		
		Hargreaves- Samani		
INDIRETA	Micrometeorológica	Jensen- Haise	Diário	Regional
		Priestley- Taylor		
INDIRETA	Combinado	Razão de Bowen	0,5 horas- anual	>20:1 ^a
		Penman-Monteith	Diário	Regional
		Penman Monteith- FAO 56		
INDIRETA	Orbital	Sensoriamento	Diário	Global
		Remoto		

^a 20:1 = 20 metros de bordadura a cada 1 metro de elevação na vertical.

Fonte: Adaptado de Wang e Dickinson (2012).

2.4 Balanço de energia e a razão de Bowen

O método da razão de Bowen estima o fluxo de calor latente de uma superfície medindo radiação solar, fluxo de calor no solo e gradientes de temperatura do ar e pressão de vapor na camada de ar logo acima da superfície evapotranspirante de interesse (ALLEN et al, 2011; TODD et al., 1998).

O método do balanço de energia na superfície é procedente do princípio de conservação de energia e presume que parte da radiação líquida disponível (Rn) na superfície terrestre se distribua em forma de fluxo de calor no solo (G), fluxo de energia na forma de calor sensível (H), fluxo de energia na forma de calor latente de evaporação (LE), além das atividades metabólicas e a fotossíntese. O modelo do balanço de energia pode ser descrito pela Equação 1 (PEREZ et al., 1999; TOOD et al., 2000):

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

Em que: Rn - Saldo de radiação (Wm^{-2}); G - Fluxo de calor no solo (Wm^{-2}); H - Fluxo de calor sensível (Wm^{-2}); LE - fluxo de calor latente (Wm^{-2}).

Um dos primeiros estudos sobre balanço de energia foi realizado por Bowen (1926), designando a relação entre os fluxos de calor sensível e latente sobre os gradientes de pressão de vapor e temperatura na superfície da terra. Essa relação nominada razão de Bowen (β), trata-se de um método indireto para mensurar a evapotranspiração das culturas (ETc). Muito utilizado devido a simplicidade de sua aplicação, praticidade e robustez, além de determinar de forma precisa a evapotranspiração das culturas em diversas condições ambientais (MALEK et al., 1992; FARAHANI e BAUSCH, 1995).

A razão de Bowen (β) pode ser determinada a partir do produto da constante psicométrica (γ) e a razão entre os gradientes verticais de temperatura (ΔT) e pressão de vapor do ar (Δe), adquiridos na região superior da superfície de interesse (BOWEN, 1926). Assume-se em geral que quando o valor de β for superior a 1, maior será o fluxo de energia que retorna à atmosfera em forma de calor sensível, apontando como característica um clima seco. Em situação contrária, quando β for inferior a 1, admite-se um ambiente com maior teor de umidade, em que a maioria do fluxo de energia que retorna à atmosfera seja em forma de calor latente (IRMAK et al., 2014).

Para garantir que as medidas dos gradientes de pressão e temperatura se enquadrem na camada limite de equilíbrio, considera-se a diferença entre ΔT e Δe tomadas em dois níveis distintos de altura acima da superfície com vegetação, pois, neste caso o fluxo vertical é ajustado à superfície e considerado constante (EUSER et al., 2014; IRMAK et al., 2014). Para tanto, é presumido que a superfície de interesse esteja em condições de homogeneidade de calor

e também que sua movimentação ocorra na direção vertical, sem que haja participação de gradientes horizontais (TODD et al., 2000).

As estimativas corretas dos fluxos de calor sensível e latente derivam da precisão encontrada na razão de β , que depende dos aspectos qualitativos das medidas obtidas pelos equipamentos. Por isso, é necessário analisar as possibilidades de erro relativas ao método e conhecer a probabilidade de interferência desses erros nos resultados (PEREZ et al., 1999).

Com a finalidade de evitar as possibilidades de erro na estimativa do fluxo de calor latente e, por conseguinte na evapotranspiração, é recomendado que os valores dentro do intervalo $(-1,3 < \beta < -0,7)$ sejam descartados (ORTEGA-FARIA; CUENCA, 1996). Geralmente, os erros experimentais do método estão relacionados à limitação de qualidade e precisão dos equipamentos, má instalação e operação dos equipamentos, além de variabilidade meteorológica, descuido na avaliação dos dados ou a própria limitação do método em condições determinadas (HU et al., 2014).

A estimativa da evapotranspiração por razão de Bowen aponta diferenças entre os resultados obtidos no período diurno e noturno. A variação no saldo de radiação no período diurno e seu efeito sobre o fluxo de calor latente e sensível estão relacionados com essas diferenças. Considerando que o fluxo de calor latente é maior nesse período, a razão de β é favorecida em sua estabilidade. Durante a noite o saldo de radiação é relativamente menor e alcança medições negativas, ocasionando fortes variações no resultado de β e diminuição do fluxo de calor sensível e latente. Apesar de suas limitações, o método é bastante utilizado em estudos que objetivam determinar o balanço de energia em culturas agrícolas (LIN et al., 2016).

Silva et al., (2007) quantificaram a atuação da energia solar e a evapotranspiração na cultura do maracujá em diferentes orientações de plantio na região de Piracicaba- SP, adotando o balanço de energia pelo método da razão de Bowen. Outro objetivo do estudo foi a avaliação de um modelo para identificar e posteriormente excluir dados inconsistentes de β . Os autores concluíram que no balanço de energia o elemento com maior participação foi o calor latente de evaporação, aproveitando aproximadamente 100% da energia solar disponibilizada. Concluíram ainda que quando há exclusão dos intervalos onde a razão de Bowen costuma falhar por apresentar valores menores que 1, melhorou a qualidade dos dados e permitiu a observação na diferença da evapotranspiração do maracujá, em que o cultivo na direção norte-sul exibiu valores expressivamente mais elevados em relação a direção leste-oeste.

Um estudo mais recente realizado por Lima et al. (2017) na área de Caatinga preservada no agreste pernambucano avaliou a variação dos fluxos de energia e a evapotranspiração de referência, usando a razão de Bowen. Os autores concluíram nessas condições, que a maior parte do saldo de radiação foi aproveitada pelo fluxo de calor sensível e controlada pela variação sazonal da precipitação e da umidade disponível no solo. Em consequência da boa disponibilidade hídrica do solo no período avaliado a evapotranspiração aferida apresentou valores elevados. Apontaram o método do balanço de energia pela razão de Bowen como adequado e satisfatório na análise das variações diárias e sazonais dos fluxos de energia e na estimativa da evapotranspiração da Caatinga.

Para avaliar o desempenho da razão de Bowen na estimativa da evapotranspiração de referência, Silva et al., (2016) compararam o método ao de Penman-Monteith e medidas de um lisímetro de pesagem. Apesar da subestimativa de β nos horários próximos ao nascer do sol, por conta dos pequenos gradientes de temperatura e umidade do ar e superestimativa de até 5% ao longo do dia em relação ao lisímetro, as estimativas obtidas tanto por razão de Bowen quanto por Penman-Monteith apresentaram desempenho satisfatório.

2.5 Modelos que utilizam sensoriamento remoto para estimar a evapotranspiração

O sensoriamento remoto é a prática de obter informações sobre as superfícies terrestres e aquáticas da Terra usando imagens adquiridas de uma perspectiva aérea, usando radiação eletromagnética em uma ou mais regiões do espectro eletromagnético, refletidas ou emitidas da superfície da Terra (CAMPBELL e WYNNE, 2011). No caso do presente estudo, a superfície terrestre de interesse são áreas com vegetação irrigada (trigo) e as radiações eletromagnéticas de interesse são aquelas cujos comprimentos de onda estão relacionados ao vermelho (visível), infravermelho e termal, de maneira que os dados coletados pelos sensores quando analisados e interpretados permitam estimar a evapotranspiração da cultura analisada.

Considerando os parâmetros que compõe a evapotranspiração, diversos modelos que envolvem dados de sensoriamento remoto foram desenvolvidos para estimar o fluxo de calor na superfície terrestre, assumindo um papel considerável no acompanhamento de processos ambientais e meteorológicos para obtenção de dados requeridos no gerenciamento de recursos naturais (MCSHANE et al., 2017; LIOU e KAR, 2014; SENAY et al., 2013; BEZERRA et al.,

2011). Os modelos semi-empíricos de sensoriamento remoto estimam a evapotranspiração mediante o balanço de radiação da superfície (GEBREMICHAEL et al., 2010).

O procedimento do balanço de energia viabiliza a consecução do fluxo de calor latente (LE) a partir das imagens orbitais por meio da diferença entre o fluxo de calor no solo (G), calor sensível (H) e saldo de radiação (Rn) estimando a evapotranspiração. Esse procedimento é adotado nos principais algoritmos que operam dados de imagens de satélite: **TSEB** (*Two-Source Energy Balance*) (NORMAN et al., 1995); **SEBAL** (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*) (BASTIAANSEN et al., 1998); **S-SEBI** (*Simplified Surface Energy Balance Index*) (ROERINK et al., 2000); **SEBS** (*Surface Energy Balance System*) (JIA et al., 2003); **METRIC** (*Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration*) (ALLEN et al., 2007); **SAFER** (*Simple Algorithm Model for Evapotranspiration Retrieving*) (TEIXEIRA et al., 2012); **SSEBop** (*Operational Simplified Surface Energy Balance*) (SENAY et al., 2013) entre outros.

O **SEBAL** - *Surface Energy Balance Algorithm for Land* é aplicado em diversos estudos e foi desenvolvido por Bastiaanssen e colaboradores (1998). Fundamentado na conversão do fluxo de calor latente, como resíduo da equação do balanço de energia, o método estima a evapotranspiração real diária. Apesar de aplicar metodologias computacionais complexas é muito viável, considerando a resolução espacial abordada em grandes áreas heterogêneas. Possui baixo custo de aplicação mesmo com a grande cobertura e requer quantidades mínimas de dados meteorológicos, facilmente obtidos por estações agrometeorológicas. Para sua aplicação é necessário que as imagens digitais disponham de bandas do visível, infravermelho próximo e termal. A obtenção do saldo de radiação se dá pelo balanço de ondas curtas e ondas longas que são emitidas pela superfície terrestre e atmosfera e ainda, relacionadas ao albedo e a emissividade da superfície.

Liou e Kar (2014), em sua revisão, fizeram um levantamento das aplicações do modelo SEBAL e verificaram que já foi testado em mais de 30 países, sob variadas condições climáticas e apresentou precisão de 85% e 95% nas escalas diária e sazonal.

Criado por Allen et al. (2007) o **METRIC** - *Mapping Evapotranspiration at High Resolution and Internalized Calibration* utiliza princípios e técnicas do modelo SEBAL para determinar a temperatura da superfície em função da temperatura radiométrica, com o fim de abstrair a exigência de correções atmosféricas refinadas da temperatura do ar. É um modelo autocalibrado para imagens de satélites e essa calibração interna diminui a influência do viés

na correção da estabilidade aerodinâmica e rugosidade da superfície. Utiliza a evapotranspiração de referência, calculada com dados de estações meteorológicas, demandando informações precisas e preferencialmente em base horária. Uma das vantagens de aplicação do METRIC é a oportunidade da associação de medições de superfície para aprimorar a qualidade dos mapas de evapotranspiração gerados.

O modelo foi usado por Allen et al. (2011b) com objetivo de comparação de bases teóricas de métodos de sensoriamento remoto na estimativa de evapotranspiração em áreas agricultáveis. Para acareação entre o SEBAL e o METRIC foi preciso levantar dados de entrada, sendo eles: modelo digital de elevação de terreno, informações meteorológicas obtidas em campo de interesse e imagens de satélite. Os autores afirmam que o modelo METRIC possui vantagem na etapa de calibração e que os dois métodos são eficientes na estimativa de evapotranspiração e superiores aos métodos convencionais, por não precisarem de dados de coeficiente específico de cultura ou informações de classificação da vegetação analisada. Concluíram que os resultados obtidos, quando transformados em mapas de evapotranspiração, são alternativas para gestão dos recursos hídricos, organização de balanço hidrológico e efeitos de fluxo reduzido.

Outro sistema de monitoramento de evapotranspiração por sensoriamento remoto é o **SAFER** – *Simple Algorithm model For Evapotranspiration Retrieving*, elaborado por Teixeira et al. (2012). Esse algoritmo foi produzido e validado para utilização tanto em culturas irrigadas quanto em vegetação natural, estimando a evapotranspiração através de indicadores biofísicos associados às variáveis meteorológicas e dados obtidos por sensoriamento. Uma das vantagens do modelo é que ele não exige a classificação das culturas e também não requer características físicas específicas de radiação, já que pode utilizar análise de séries históricas. A evapotranspiração real estimada em larga escala foi fundamentada no método empírico de Penman- Monteith na relação entre (E_{Tr}/E_{To}) e sua modelagem anula a necessidade de diferenciação entre os pixels frios e quentes.

Andrade et al. (2014) aplicaram o algoritmo SAFER com objetivo de mensurar a evapotranspiração real em áreas de pastagens com diferentes condições de degradação na região do Alto Tocantins- GO. Nas pastagens em que ocorriam degradações leves obtiveram valores de evapotranspiração na média de 1,50 mm por dia, na ausência de degradação os valores eram próximos de 0,67 mm por dia. Os autores relataram que os resultados encontrados podem ter

sido influenciados pelo manejo realizado nas pastagens e pela heterogeneidade de distribuição das precipitações anuais.

Uma das alternativas mais recentes é o modelo **SSEBop** - *Operational Simplified Surface Energy Balance* produzido por Senay et al. (2013), um novo delineamento do SSEB (SENAY et al., 2007). A inovação do SSEBop inclui para cada pixel condições de contorno em relação ao fluxo de calor latente máximo, representando os pixels frios, e mínimos na situação de pixels quentes. A delimitação dos valores de referência do pixel frio se dá por uma fração da temperatura do ar e o pixel quente é estimado por adição de diferenças de temperatura já estabelecidas, o que permite maior aplicabilidade do método, quando comparada ao modelo SSEB que utiliza um conjunto de pares de pixels frios adaptáveis a uma região hidroclimática limitada e em condições uniformes.

Para estimativa da evapotranspiração, o modelo SSEBop requer a medição de temperatura de superfície coincidindo com a passagem orbital e o valor de evapotranspiração de referência da grama. Esse modelo não define completamente os termos do balanço energético, porém, resolve as condições limite embasada nos princípios claros do balanço de radiação, justificando sua simplificação firmada no conhecimento de que o processo de balanço de energia superficial é impulsionado principalmente pela radiação líquida disponível. Sua parametrização simplificada para determinação da evapotranspiração concede uma operacionalização eficiente para estimativas tanto em escala local quanto regional, e o transforma em uma opção propícia (SENAY et al., 2014).

Apesar das modificações, o modelo é passível de erro pelos usuários, tendo em vista a adoção da diferença constante sendo o único valor para todos os pixels da imagem. Contudo, os autores afirmam que as possibilidades de variação no padrão espaço-temporal de evapotranspiração ocorram por conta das alterações de temperatura na superfície, não havendo implicações na configuração do modelo ou na seleção dos pixels âncoras (SENAY et al., 2013).

Para mensurar a evapotranspiração real do trigo irrigado na região do Cerrado Lopes et al., (2019) aplicou o modelo SSEBop em comparação ao método da razão de Bowen. Nos resultados dos dados diários para todo o período de pesquisa, o SSEBop superestimou a evapotranspiração em 5,5% com índice de correlação R^2 equivalente a 0,66 e erro quadrado médio igual a 0,95 mm d⁻¹. Os autores concluíram que o desempenho do modelo abordando todo o período experimental foi satisfatório e adotando uma parametrização geral de operação obtêm-se resultados promissores, que podem melhorar a eficiência do planejamento, gestão e

regulação dos recursos hídricos. Ressaltaram ainda sobre o benefício da utilização do sensoriamento remoto com essa finalidade, uma vez que proporciona o mapeamento da evapotranspiração em grandes áreas com custo relativamente baixo.

Comini et al. (2017) empregaram o modelo SSEBop no sistema aquífero Urucuia para estimar a evapotranspiração no período entre 2000 e 2013, aplicando a calibração do fator de escala independente para os períodos seco e úmido. Para validação foi utilizado o coeficiente de Nash-Sutcliffe em quatro bacias hidrográficas. As respostas dos dados mensais de evapotranspiração real para calibração e validação foram obtidas por simulação com o modelo chuva-vazão Soil Moisture Accounting Procedure (SMAP). Os autores encontraram valores de R^2 em torno de 0,71 e 0,80 e erro quadrado médio entre 16,73 e 19,36 mm. Constataram que o SSEBop demonstrou ser um método simples e rápido com baixo custo de aplicação e precisão satisfatória para estimar a evapotranspiração.

Em lavouras com produção de soja e feijão conduzida em sistema de irrigação do tipo pivô central, na bacia do Rio Preto região leste do Distrito Federal, foi desenvolvido estudo com objetivo de determinar a evapotranspiração real de ambas as culturas mencionadas. Paula et al. (2019) utilizaram o modelo SSEBop e compararam sua performance com a método da razão de Bowen. A relação das estimativas obtidas entre o algoritmo e a razão de Bowen mostrou correlação de R^2 igual a 0,94, concordância de 0,82, RMSE de 0,62 mm dia⁻¹ e erro de polarização média equivalente a 0,04 mm dia⁻¹. Na classificação de desempenho o modelo SSEBop foi categorizado como ótimo pelo valor de PI igual a 0,77, confirmando sua precisão e usabilidade na estimativa da evapotranspiração real das culturas de soja e feijão.

Uma análise realizada por Singh e Senay (2016) no centro oeste dos Estados Unidos buscou a comparação na estimativa da evapotranspiração entre quatro diferentes modelos (METRIC, SEBAL, SEBS e SSEBop) de balanço de energia utilizando imagens do Landsat. Na validação dos modelos foram utilizadas três torres de eddy covariance instaladas em pivôs centrais de irrigação cultivados com milho e soja. Os resultados encontrados apontaram que os quatro métodos capturaram a variação temporal e as frações instantâneas de evapotranspiração bem com R^2 maior do que 0,81. Tanto METRIC, modelo mais complexo, como SSEBop, mais simples, entre os quatro avaliados, resultaram em desempenho global similar na determinação da evapotranspiração, apresentando raiz do erro médio quadrático menor do que 0,93mm.dia⁻¹ e coeficiente de Nash-Sutcliffe maior do que 0,8.

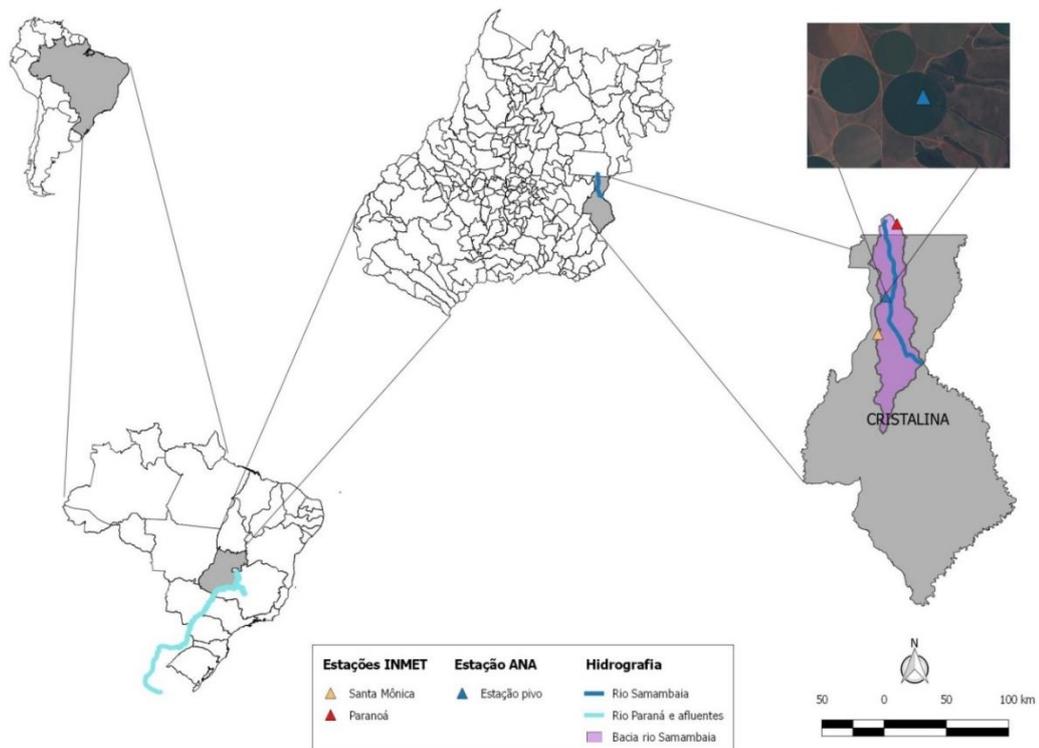
Ainda que os modelos apresentados exponham vantagens e proporcionem a determinação da evapotranspiração em grande escala, eles envolvem certa complexidade pela dependência dos processos físicos no balanço de energia e balanço hídrico, manifestando condições variantes, de acordo com as informações meteorológicas, tipo de vegetação e padrões de utilização (CHEN et al., 2016).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Localização da Área experimental

A área utilizada para realização do experimento foi a Fazenda Pamplona (SLC Agrícola), localizada no município de Cristalina/GO, e pertencente à bacia hidrográfica do rio Samambaia que tem sua nascente na região sudeste do Distrito Federal. O rio Samambaia é afluente do rio São Marcos, ambos compõem a região hidrográfica do Paraná. A Figura 1 traz um mapa descritivo da área de estudo.

Figura 1. Mapa de localização da Fazenda Pamplona onde foi desenvolvido o experimento.



O estudo se baseou em avaliar a evapotranspiração real da cultura do trigo ao longo de três anos (2017, 2018 e 2019) na área apresentada na Figura 1. Nos três anos a variedade cultivada do trigo foi BRS 394.

Os dados de 2017 foram coletados durante o desenvolvimento do projeto de mestrado de Lopes (2018). Os dados foram reprocessados neste trabalho e devido a pequenas diferenças na parametrização, os resultados apresentaram diferenças. Neste ano o trigo foi cultivado em

pivô central de 120 ha - completo. As coordenadas geográficas no centro do pivô são 16°15'8" de latitude sul e 47°41'4" de longitude oeste e a altitude é de 983 m.

No ano de 2018, o trigo foi cultivado em pivô de 120 ha - completo. As coordenadas geográficas no centro do pivô são 16°16'10" de latitude sul e 47°35'56" de longitude oeste e a altitude é de 975 m.

Já em 2019, o trigo foi cultivado em pivô de 60ha, porém não no pivô completo e sim em apenas um quarto dele. As coordenadas geográficas no centro do pivô são 16°13'11" de latitude sul e 47°37'21" de longitude oeste e a altitude é de 993 m. A Tabela 1 apresenta as seguintes informações cronológicas de cada um dos três anos de experimento: plantio, colheita e período que a estação micrometeorológica esteve instalada no interior dos pivôs.

Tabela 1. Cronologia dos 3 anos de experimento com a cultura do trigo na fazenda Pamplona, informando para cada ano a data de plantio, de colheita e o período que a estação micrometeorológica ficou instalada no interior do pivô.

	Plantio	Colheita	Período estação instalada	
			Início	Fim
2017	22/06	11/10	28/06	02/10
2018	15/05	17/09	22/05	21/08
2019	10/05	05/09	17/05	30/08

3.2 Materiais utilizados

Para obter os dados necessários à estimativa da evapotranspiração pelo método da razão de Bowen, foram instaladas duas estações micrometeorológicas da Campbell, disponibilizadas pela Agência Nacional de Águas – ANA em cada pivô. A estação é apresentada na Figura 2 e seus equipamentos descritos no Quadro 2. O armazenamento dos dados foi realizado por um *datalogger* (CR3000 *Measurement and Control System* – Campbell Scientific) em intervalos de 10 minutos.

Figura 2. Estação micrometeorológica utilizada na obtenção dos dados para aplicação do método da razão de Bowen.



Quadro 2. Equipamentos instalados na estação micrometeorológica.

Instrumento	Informação obtida	Quantidade instalada
083E Relative Humidity	Umidade relativa (%)	2
Temperature Sensor	Temperatura do ar (°C)	2
Met One 014A Wind Speed Sensor	Velocidade do vento (m/s)	2
CNR4 Net Radiometer	Saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)	1
HFP01 Soil Heat Flux Plate	Fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)	2
CS650 Water Content Reflectometers	Umidade do solo (m^3)	6
TB4 Rain Gage	Pluviômetro (mm)	1

Os sensores de umidade relativa, temperatura do ar e velocidade do vento foram instalados em alturas de 1,0 e 2,0 m acima da superfície do solo, equivalendo aos níveis 1 e 2. A altura do pluviômetro correspondeu a 1,4 m. O sensor do saldo radiométrico foi instalado no segundo nível (2,0 m de altura) e as placas de fluxo de calor no solo foram enterradas a 2,0 cm de profundidade. Os sensores TDR instalados na direção vertical de forma que sua haste de 30 cm ficasse totalmente enterrada.

A instalação das estações nos três anos ocorreu após o plantio do trigo (Tabela 1), assim que havia autorização da gerência da fazenda e eram reunidas as condições técnico operacionais necessárias. As estações eram retiradas dos pivôs de irrigação antes da colheita para não atrapalhar o processo e evitar acidentes. Na instalação foi respeitada a bordadura mínima de 250 m, assistindo o critério de 100 vezes a altura do sensor mais elevado (MONTEITH E UNSWORTH, 1990; HORST E WEIL, 1992; STANNARD, 1997). Exceto no ano de 2019, que em razão da área reduzida cultivada com trigo não foi possível garantir a bordadura mínima e se procurou instalar as estações na região mais central possível.

Periodicamente, foi realizada manutenção e limpeza das estações e seus sensores, no intuito de garantir maior acurácia dos dados. De acordo com o crescimento da cultura foram efetuados ajustes de altura dos sensores instalados nos níveis 1 e 2, a fim de manter o padrão de 1 e 2 metros de altura em relação ao dossel da planta.

3.3 Evapotranspiração real diária calculada pelo método da razão de Bowen.

Na estimativa da razão de Bowen (β), foram consideradas as diferenças de temperatura (ΔT) e pressão real de vapor do ar (Δe_a) nos níveis 1 e 2 da estação. Para o cálculo das pressões de vapor do ar foram utilizadas as Equações 2 e 3.

$$e_s = 0,6108 \times \exp \left[\frac{17,27 \times T}{T+237,3} \right] \quad [2]$$

$$e_a = e_s \times \frac{UR}{100} \quad [3]$$

Em que: e_s - Pressão de vapor do ar saturado de acordo com a temperatura (kPa); T - Temperatura do ar a 2 m de altura (°C); UR - Umidade relativa do ar (%); e e_a - Pressão real do vapor do ar (kPa).

Para estimativa do valor de β foi utilizada a Equação 4, sendo γ o coeficiente psicrométrico determinado pela Equação 5.

$$\beta = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e_a} \quad [4]$$

Em que: ΔT - Diferença de temperatura do ar entre os níveis 1 e 2 (°C); Δe_a - Diferença da pressão real de vapor do ar entre os níveis 1 e 2 (kPa).

$$\gamma = \frac{1,013 P 10^{-3}}{0,622 \lambda 10^{-6}} \quad [5]$$

Em que: P - Pressão atmosférica (kPa); λ - Calor latente de vaporização da água (J Kg⁻¹).

O cálculo da pressão atmosférica e do calor latente de vaporização da água foram de acordo com as Equações 6 e 7 respectivamente.

$$P = \left[\left(\frac{293 - 0,0065 z}{293} \right)^{5,26} \right] 101,3 \quad [6]$$

Em que: z – Altitude local (m).

$$\lambda = [2,501 - (0,00236 T_1)] 10^6 \quad [7]$$

Em que: T_1 – Temperatura do ar no nível 1 (°C).

A cálculo do balanço de energia pelo método da razão de Bowen obedece a existência de transporte vertical de massa e calor na porção acima da superfície vegetada (GOMIDE, 1998), além de estabelecer a dependência da precisão das medidas dos elementos nos níveis 1 e 2. Por isso, situações eventuais em que não houver compatibilidade ao transporte vertical e

imprecisão instrumental de medição, favoreceriam resultados errôneos de β e por consequência valores de fluxo de calor sensível e latente inconsistente (PEREZ et al., 1999).

Conforme a possibilidade de inconsistência que pode ocorrer nos resultados da razão de β , três parâmetros de filtragem de dados foram adotados (ORTEGA-FARIA; CUENCA, 1996; PEREZ et al., 1999). O primeiro parâmetro sugere que os gradientes menores que a resolução dos sensores e os valores de β no intervalo de $-1,3 < \beta < -0,7$ sejam eliminados. A segunda condição, de acordo com Payero et al., (2003), prevê o resultado da Equação 8 maior que zero, a fim de que β apresente valores aceitáveis.

$$\frac{(\lambda (\Delta e + \gamma \Delta T)(Rn - G))}{10^6} > 0 \quad [8]$$

O terceiro filtro aplicado objetivou a exclusão de valores negativos de fluxo de calor latente, que ocorrem geralmente no período de intervalo entre as 07 horas da manhã e 19 horas da noite, tendo em conta que valores negativos de β nesse período seja devido as precipitações ocorrentes e irrigações, que acarretam momentos de condensação e por isso foram rejeitados, para que não houvesse a propagação de erro (PEREZ et al., 1999).

Após aplicação da filtragem descrita anteriormente, os valores de fluxo de calor latente (LE) foram determinados no intervalo de dez minutos, utilizando a Equação 9.

$$LE = \frac{Rn - G}{1 + \beta} \quad [9]$$

Em que: Rn- Saldo de radiação ($W m^{-2}$); G- Fluxo de calor no solo ($W m^{-2}$); LE- Fluxo de calor latente ($W m^{-2}$)

A partir dos resultados obtidos de LE e calor latente de vaporização da água (λ), mensurado conforme a Equação 7 foi possível realizar a estimativa da evapotranspiração real da cultura do trigo, através da Equação 10.

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

Em que: ETr_{RB} – Evapotranspiração real da cultura do trigo calculada pelo método da razão de Bowen a cada 10 minutos (mm); 600 – Tempo correspondente em segundos no período de 10 minutos.; λ – Calor latente de vaporização da água ($J Kg^{-1}$).

Com os valores de ETr_{RB} encontrados a cada 10 minutos, realizou-se o somatório diário, compilando os intervalos respectivos ao longo do ciclo da cultura do trigo. Um script foi desenvolvido em Python para processar os dados gerados pela estação micrometeorológica e efetuar o cálculo da ETr_{RB} pelo método da razão de Bowen.

3.4 Evapotranspiração real calculada pelo modelo SSEBop

Para determinar a fração de evapotranspiração (ETf) pelo modelo SSEBop são utilizados dados multiespectrais, na faixa do visível e do infravermelho, e termal obtidos via sensoriamento remoto e informações meteorológicas. Multiplicando-se a ETf por um fator de escala (k) e pela evapotranspiração de referência (ETo) pode-se estimar a evapotranspiração real por meio do modelo SSEBop (ETr_{SSEBop}), segundo a Equação 11:

$$ETr_{SSEBop} = ETf \times k \times ETo \quad [11]$$

Em que: ETf = fração evapotranspirativa, adimensional; ETo = evapotranspiração de referência calculada pelo método de Penman-Monteith-FAO, $mm d^{-1}$; e k = coeficiente que expressa a máxima evapotranspiração da cultura em relação à evapotranspiração de referência (ETo), adimensional.

De acordo com Senay et al., (2013) o valor de k recomendado é 1.2, porém, esse coeficiente pode ser mensurado em campo conforme a vegetação local de estudo e calibrado por meio de dados do balanço hídrico (CHEN et al., 2016). Nesse trabalho foi adotado o valor de 1.2 para k .

A ET_f é apontada como parâmetro constante no decorrer do dia e durante a passagem dos satélites, desta forma, pode ser utilizada em escala diária no cálculo da ET_r (CHÁVEZ et al., 2008). Considerando cada pixel das imagens obtidas, foram calculados os valores de ET_f de acordo com a Equação 12.

$$ET_f = \frac{T_h - T_s}{dT} = \frac{T_h - T_s}{T_h - T_c} \quad [12]$$

Em que: T_s = temperatura de superfície do pixel, K; T_h = temperatura de superfície estimada para a condição de pixel quente, K; T_c = temperatura de superfície estimada para a condição de pixel frio, K; e dT = diferença predefinida entre as temperaturas de pixel quente e de pixel frio, K.

Valores com ET_f negativo são convertidos a zero e sua medida de valor máximo é restringido a 1,05. Seguindo a recomendação de processamento de imagens em condições de céu claro, os pixels com presença de nuvens são desconsiderados, e nessa circunstância supõe-se que a superfície de pixel frio (T_c) deve apresentar resultados de evapotranspiração real semelhante a potencial e assim determina-se a T_c (Senay et al., 2016).

Na situação de equivalência mencionada, há fluxo de calor sensível em menor proporção e máximo de fluxo de calor latente, estando a temperatura do ar (T_a) próximo a T_s . A condição de T_c é calculada a partir de T_a conforme a Equação 13.

$$T_c = c \times T_a \quad [13]$$

Sendo:

$$c_{pixel} = \frac{T_s |NDVI \geq 0,8}{T_a} \quad [14]$$

Em que: c_{pixel} = fator de correção calculado para cada pixel que atenda a condicionante, adimensional; $T_s|_{\text{NDVI} \geq 0,8}$ = temperatura da superfície em locais onde o Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI) é maior ou igual a 0,8; e T_a = temperatura do ar no horário de passagem do satélite, K.

O fator de correção c é determinado a partir dos pixels onde o Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI) é maior ou igual a 0,80 e a temperatura da superfície é maior que 270 K, garantindo o pleno desenvolvimento vegetativo e ausência de nuvens. Para chegar ao fator de correção c da imagem de satélite, é calculada a média do c_{pixel} menos duas vezes o desvio padrão de c_{pixel} (Senay et al., 2017). No entanto, após análises e comparações, concluiu-se, neste estudo, definir o fator c como a média de c_{pixel} (Equação 15).

$$c = c_{\text{pixel_media}} \quad [15]$$

Em que: c = fator de correção da imagem de satélite usado para determinar T_c no modelo SSEBop.

Após definição da temperatura de pixel frio, a temperatura do pixel quente é determinada pela adição de diferença constante (dT), mensurada pelos princípios do balanço de energia (ALLEN et al., 1998), processo requerido pelo sensoriamento remoto na região do infravermelho termal.

O diferencial de temperatura dT foi calculado pela Equação 16, como solução da equação do balanço de energia, segundo a Equação 17. Foi considerada uma superfície de solo seco e exposto, representado a condição de contorno seca/quente, onde o fluxo de calor latente e o fluxo de calor no solo são assumidos como sendo iguais a zero e, portanto, o fluxo de calor sensível é equivalente ao saldo de radiação (ALLEN et al., 2007; BASTIAANSEN et al., 1998).

$$dT = \frac{Rn \times r_{ah}}{\rho_a \times C_p} \quad [16]$$

Em que: dT = diferencial de temperatura, K; ρ_a = a densidade do ar; Kg/m^3 ; C_p = o calor específico do ar ($1013 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$); e r_{ah} = resistência aerodinâmica do ar à transferência de calor a partir de uma superfície hipotética descoberta e seca, igual a 110 s m^{-1} , de acordo com Senay et al. (2013).

$$Rn = LE + H + G = H = \frac{\rho_a \times C_p \times dT}{r_{ah}} \quad [17]$$

Em que: R_n = saldo de radiação, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$; LE = o calor latente, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$; H = o calor sensível, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$; e G = o fluxo de calor no solo, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$.

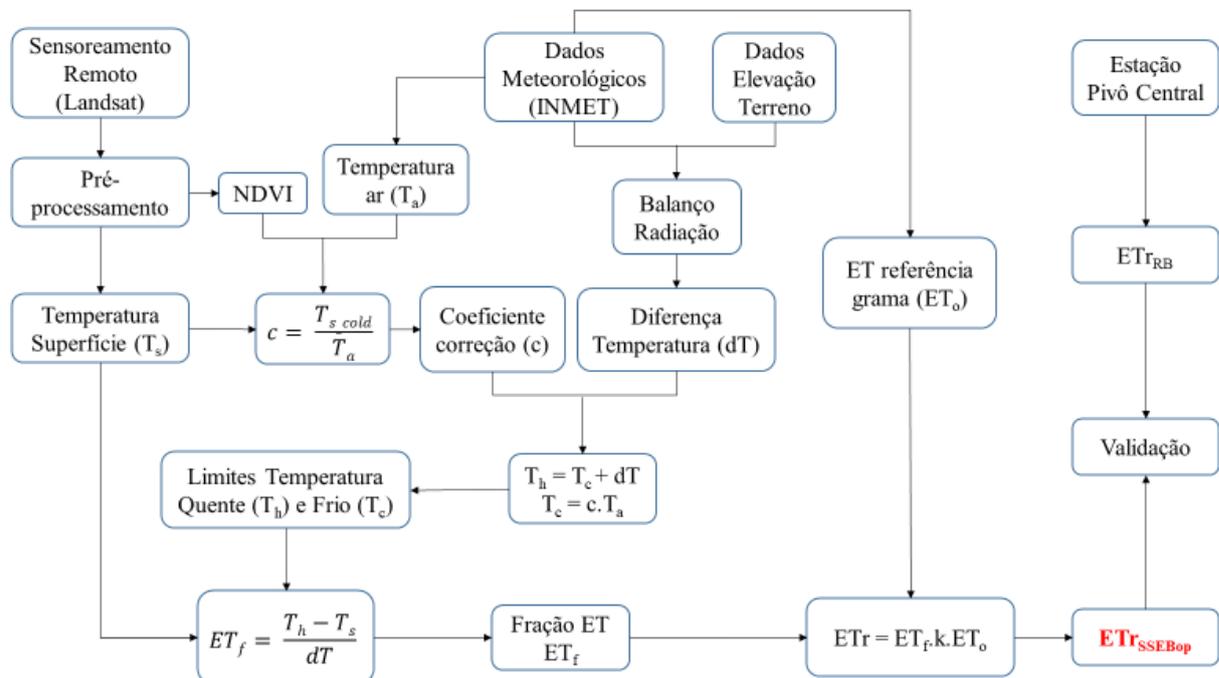
A condição de pixel quente, T_h , foi calculada pela Equação 18:

$$T_h = T_c + dT \quad [18]$$

Em que: T_h = temperatura de superfície estimada para a condição de pixel quente, K; T_c = temperatura de superfície estimada para a condição de pixel frio, K; e dT = diferença predefinida entre as temperaturas de pixel quente e de pixel frio, K.

O modelo SSEBop foi implementado na linguagem de programação Python de forma que, tanto o processamento das imagens de satélite, quanto o cálculo da evapotranspiração, foi efetuado pelo script. A figura 3 apresenta um fluxograma da implementação do modelo SSEBop e sua validação.

Figura 3. Fluxograma de implementação do modelo SSEBop. Sensoriamento remoto, dados meteorológicos e dados de elevação do terreno são entradas do SSEBop. Dados coletados pela estação micrometeorológica instalada no pivô central são entrada para validação por meio da evapotranspiração calculada pelo método da razão de Bowen.



Fonte: adaptado de Senay et al. 2016.

3.4.1 Dados meteorológicos

As informações meteorológicas necessárias para execução do modelo SSEBop foram obtidas por meio da estação automática do INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. O período de aquisição dos dados foi feito coincidindo com as datas das imagens coletadas e dos dados levantados em campo. A estação PARANOÁ (COOPA) – A047 (código OMM: 86733), está situada no Distrito Federal, a altitude de 1,043 metros, com latitude sul de 16°0'44" e longitude oeste de 47°33'26" estando situada à 30 km ao norte da área de estudo.

O modelo SSEBop utiliza a equação de Penman-Monteith FAO 56 (ALLEN et al., 1998) para estimar a ET_o no intuito de determinar a ET_r , conforme Equação 11. Os dados meteorológicos requeridos da equação são: temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar. A evapotranspiração de referência foi calculada conforme Equação 19:

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(Rn-G) + \gamma \left(\frac{900}{t_{med} + 273} \right) u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad [19]$$

Em que: ET_o = evapotranspiração de referência com albedo de 0,23 (mm dia^{-1}); Δ = inclinação da curva de pressão de vapor d'água ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); Rn = saldo de radiação, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$; G = fluxo de calor no solo sendo igual a 0 para estimativas diárias; γ = constante psicrométrica, $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$; t_{med} = temperatura média do ar diária, $^\circ\text{C}$; u_2 = velocidade do vento a 2 m de altura, m s^{-1} ; e_a = a pressão parcial de vapor d'água, kPa ; e_s = pressão de saturação do vapor d'água, kPa ; e $(e_s - e_a)$ = déficit de pressão vapor d'água, kPa

Também foi determinado o valor da T_a utilizada no modelo SSEBop com base nas temperaturas registradas pela estação do INMET no horário de passagem do satélite. Assim T_a foi obtida realizando a média das temperaturas registradas entre 10 e 11 horas em razão do horário de passagem dos satélites Landsat 7 e Landsat 8.

O processamento dos dados do INMET e o cálculo da ET_o pelo método de Penman-Monteith FAO 56 foram executados por código escrito em Python.

3.4.2. Dados de sensoriamento remoto

Para efetuar aplicação do modelo SSEBop utilizou-se imagens obtidas pelos satélites Landsat 7 - sensor ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*); e Landsat 8 – sensores OLI (*Operational Land Imager*) e TIRS (*Thermal Infrared Sensor*). As imagens de ambos os

satélites são disponibilizadas de forma gratuita pela plataforma *Earth Explorer* junto ao *United States Geological Survey* – USGS. Foi utilizada a coleção 1, em nível de processamento L1TP - *Level 1 – Standard Terrain Correction*. A Quadro 3 contém as informações referentes as bandas dos satélites utilizados.

Quadro 3. Informações das bandas espectrais dos satélites Landsat 7 e Landsat 8 utilizadas neste trabalho.

Informações	Landsat 7		Landsat 8		
Sensores a bordo	ETM+ – <i>Enhanced Thematic Mapper Plus</i>		OLI – <i>Operational Land Imager e TIRS – Thermal Infrared Sensor</i>		
Bandas utilizadas	Número da banda	Comprimento de onda (μm)	Bandas utilizadas	Número da banda	Comprimento de onda (μm)
Vermelho (RED)	3	0,631- 0,692	Vermelho (RED)	4	0,636- 0,673
Infravermelho próximo (NIR)	4	0,772- 0,898	Infravermelho próximo (NIR)	5	0,851- 0,879
Infravermelho termal (TIR)	6	10,31- 12,36	Infravermelho termal (TIR)	10	10,60- 11,19
BQA (qualidade)	-	-	BQA (qualidade)	-	-

A resolução temporal dos dois satélites é de 16 dias. Em função deste estudo usar os satélites em conjunto, o intervalo de tempo de obtenção de imagens da área de estudo se reduziu para 8 dias. A resolução espacial das bandas da região do visível e do infravermelho próximo são de 30 metros para ambos sensores, já para as bandas termais a resolução espacial é de 60 metros para o sensor ETM+ e de 100 metros para o sensor TIRS.

Para cada banda da região do visível e infravermelho próximo foi realizada a conversão de número digital para reflectância no topo da atmosfera, segundo a Equação 20 (USGS, 2016), utilizada para o sensor OLI. Para o sensor ETM+ empregou-se a Equação 21 (NASA, 2016).

$$\rho\lambda = M_p \times DN + A_p \quad [20]$$

Em que: $\rho\lambda$ = reflectância no topo da atmosfera, $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$; M_p = fator multiplicativo para reflectância, adimensional; e A_p = fator aditivo para reflectância, adimensional.

$$\rho\lambda = \frac{\pi \times L\lambda \times d^2}{R_{a\lambda} \times \cos\varphi} \quad [21]$$

Em que: d_2 = distância entre o sol e a terra, unidade astronômica; $R_{a\lambda}$ = irradiância solar exoatmosférica média no topo da atmosfera, $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$; e φ = ângulo zenital solar, graus.

O Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) foi determinado após os cálculos da reflectância nas bandas do vermelho (ρ_{RED}) e do infravermelho próximo (ρ_{NIR}), segundo a Equação 22 (ROUSE et al., 1973).

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad [22]$$

Em que: ρ_{NIR} é a reflectância da banda do infravermelho próximo; ρ_{RED} é a reflectância da banda do vermelho.

Os valores de número digital obtidos pelos sensores termais foram convertidos para radiância no topo da atmosfera. Os dados do sensor TIRS foram convertidos pela Equação 23, segundo recomendação do USGS (2016). Para o sensor ETM+ seguiu-se a orientação da NASA, 2016, conforme Equação 24.

$$L\lambda = M_L \times DN + A_L \quad [23]$$

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

$$L\lambda = \left(\frac{L\lambda_{max} - L\lambda_{min}}{DN_{max} - DN_{min}} \right) \times (DN - DN_{min}) + L\lambda_{min} \quad [24]$$

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

A temperatura de topo de atmosfera (T_{sat}) para a banda 6 do sensor ETM+ e banda 10 do sensor TIRS foram obtidas de acordo com a Equação 25 (USGS, 2016):

$$T_{sat} = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L_{TIR}}+1\right)} \quad [25]$$

Em que: T_{sat} = temperatura de brilho no topo da atmosfera, K; $K1$ = constante específica de cada sensor, $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$; $K2$ = constante específica de cada sensor, K; e L_{TIR} = radiância espectral não corrigida na banda do infravermelho termal, $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$.

A estimativa da temperatura da superfície foi determinada segundo a Equação 26, conforme Allen et al., (2007).

$$T_s = \frac{K2}{\ln\left(\frac{\varepsilon \times K1}{L_{CTIR}}+1\right)} \quad [26]$$

Em que: T_s = temperatura da superfície, K; L_{CTIR} = radiância espectral corrigida para a banda do infravermelho termal, $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$; e ε = emissividade para a banda do infravermelho termal, adimensional.

A determinação da emissividade da superfície foi calculada a partir do NDVI, conforme sugestão de Sobrino et al., (2004), em que os autores consideram que quando o NDVI for menor que 0,20 aponta uma situação de solo exposto e nesse caso assume-se a emissividade do solo equivalente a 0,97. Nas condições em que o NDVI for maior que 0,50 o pixel estará totalmente coberto com vegetação em fase de desenvolvimento e a emissividade da vegetação será de 0,99. Quando se obtém valores de NDVI entre 0,20 e 0,50 considera-se que o pixel é formado por frações de solo exposto e porções de vegetação e a emissividade é determinada de acordo com a Equação 27:

$$\varepsilon = \varepsilon_V \times P_V + \varepsilon_S \times (1 - P_V) + d\varepsilon \quad [27]$$

Em que: ε_V = emissividade da vegetação, igual a 0,99; ε_S = emissividade do solo, igual a 0,97; P_V = proporção de vegetação, adimensional; e $d\varepsilon$ = efeito da distribuição geométrica de superfícies naturais e reflexões internas, adimensional.

A fração da vegetação foi calculada pela Equação 28 e o efeito da distribuição geométrica de superfície por meio da Equação 29, onde o fator F é considerado 0,55 (SOBRINO et al., 2004). A proporção da radiância corrigida para a banda do infravermelho termal foi mensurada segundo a Equação 30 (ALLEN et al., 2007).

$$P_V = \left[\frac{NDVI - NDVI_{MIN}}{NDVI_{MAX} - NDVI_{MIN}} \right]^2 \quad [28]$$

$$d\varepsilon = \varepsilon_V \times F \times (1 - \varepsilon_S) \times (1 - P_V) \quad [29]$$

$$LC_{TIR} = \frac{L_{TIR} - R_p}{t_{NB}} - (1 - \varepsilon) \times R_{sky} \quad [30]$$

Em que: R_p = *path radiance* para a banda do infravermelho termal, igual a $0,91 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$; R_{sky} = radiação termal descendente para céu claro, igual a 1,32; e t_{NB} = transmissividade do ar, igual a 0,866.

O modelo SSEBop foi implementado na linguagem de programação Python de forma que, tanto o processamento das imagens de satélite, quanto o cálculo da evapotranspiração, foi efetuado pelo script.

3.5 Avaliação de desempenho do modelo SSEBop

Tendo como referência a ETr obtida pelo método da razão de Bowen, os resultados de ETr do modelo SSEBop para cada pixel equivalente foram comparadas. Aplicando como critério de avaliação do modelo foram utilizados os índices estatísticos: a raiz do erro médio quadrático- RMSE em termo absoluto e percentual – pRMSE, o Erro médio– BIAS, o percentual de tendência– pBIAS e o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe –E.

A raiz do erro médio quadrático- RMSE em termo absoluto e percentual- pRMSE foram aplicadas no intuito de expressar a acurácia dos resultados do modelo SSEBop, apresentando valores do erro proporcionais à variável em análise. Quanto menor for os valores de RSME obtidos melhor será o desempenho do SSEBop em comparação a ETrRB. O RSME foi estimado de acordo com a Equação 31 e o pRMSE conforme Equação 32.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2}{N}} \quad [31]$$

$$pRMSE(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2}{N}} \cdot \frac{N}{\frac{\sum_{i=1}^N O_i}{N}} \cdot 100 \quad [32]$$

Em que: M_i = Dado modelado pelo SSEBop; O_i = Dado observado *in situ* pela razão de Bowen; e N = Número de observações.

O Erro médio- BIAS foi determinado segundo a Equação 33 e o percentual de tendência- pBIAS de acordo com a Equação 34.

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)}{N} \quad [33]$$

$$pBIAS(\%) = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)}{\frac{\sum_{i=1}^N O_i}{N}} \cdot 100 \quad [34]$$

O coeficiente de eficiência (E), desenvolvido por Nash e Sutcliffe (1970) foi utilizado para avaliar o modelo SSEBop. Segundo Van Liew et al. (2007) valores de E maiores que 0,75 indicam performance boa; entre 0,36 e 0,75 satisfatório; e menor que 0,36 insatisfatório. A fórmula para seu cálculo está conforme a Equação 35.

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad [35]$$

Em que: \bar{O} = Média dos valores observados.

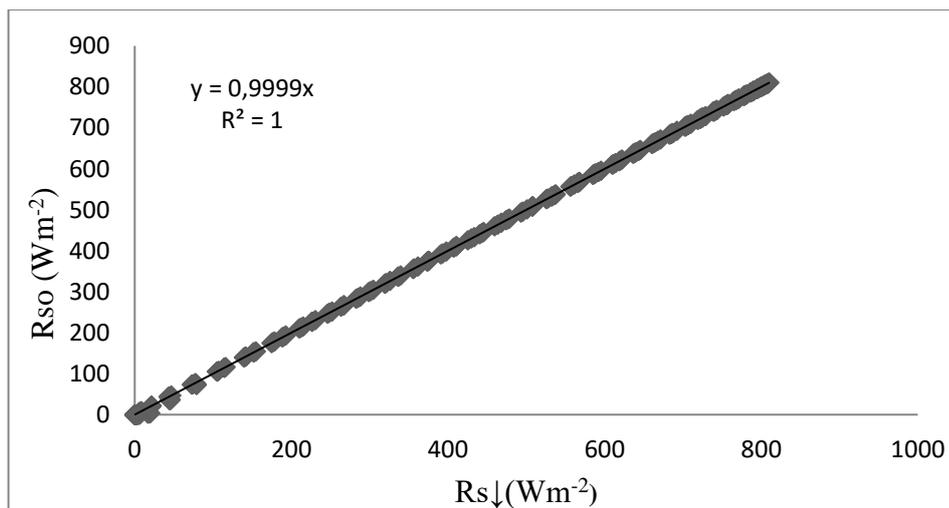
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise dos dados das estações meteorológicas

Duas estações meteorológicas foram instaladas nos pivôs de irrigação a cada ciclo de trigo estudado (2017, 2018 e 2019) para calcular a evapotranspiração da cultura pelo método da razão de Bowen (ETrRB). A ETrRB permitiu avaliar o desempenho do modelo SSEBop na estimativa da ETr. Entretanto, antes de usar estes dados para calcular a razão de Bowen, é importante avaliar a qualidade e consistência dos dados coletados e realizar correções ou calibrações quando necessário.

Os valores de radiação solar de ondas curtas incidente ($R_{s\downarrow}$) obtidos pela estação meteorológica foram comparados aos valores de radiação solar em dias claros (R_{so}) calculados teoricamente conforme proposto por Allen (1996), permitindo a identificação de sua acurácia. Em dias de céu claro, na ausência de nuvens, a correlação entre os parâmetros foi praticamente perfeita. Como exemplo, apresenta-se a análise entre $R_{s\downarrow}$ e R_{so} (Figura 4) durante 3 dias consecutivos de céu claro - 19, 20 e 21 de julho de 2018.

Figura 4. Radiação solar de ondas curtas incidente (medida pela estação meteorológica instalada no pivô) e a R_{so} calculada nos seguintes dias de céu claro 19, 20 e 21 de julho de 2018.



O diagrama de dispersão entre $R_{s\downarrow}$ e R_{so} (Figura 4) apresentou um coeficiente angular de 0,9999 e coeficiente de determinação equivalente a 1, indicando que a radiação incidente de ondas curtas medida pela estação para dias de céu claro está de acordo com o valor teórico R_{so} , portanto dispensando necessidade de calibração do radiômetro.

Além de comparar a $R_{s\downarrow}$ com a R_{so} nos dias de céu claro, avaliou-se a correlação entre os dados de $R_{s\downarrow}$ coletados pelas duas estações. Apresenta-se a análise para todos os anos de experimento 2017, 2018 e 2019 nas Figura 5, Figura 6 e Figura 7 respectivamente.

Figura 5. Radiação solar incidente obtida pela estação 1($R_{s\downarrow 1}$) e estação 2 ($R_{s\downarrow 2}$) no pivô de trigo em 2017 .

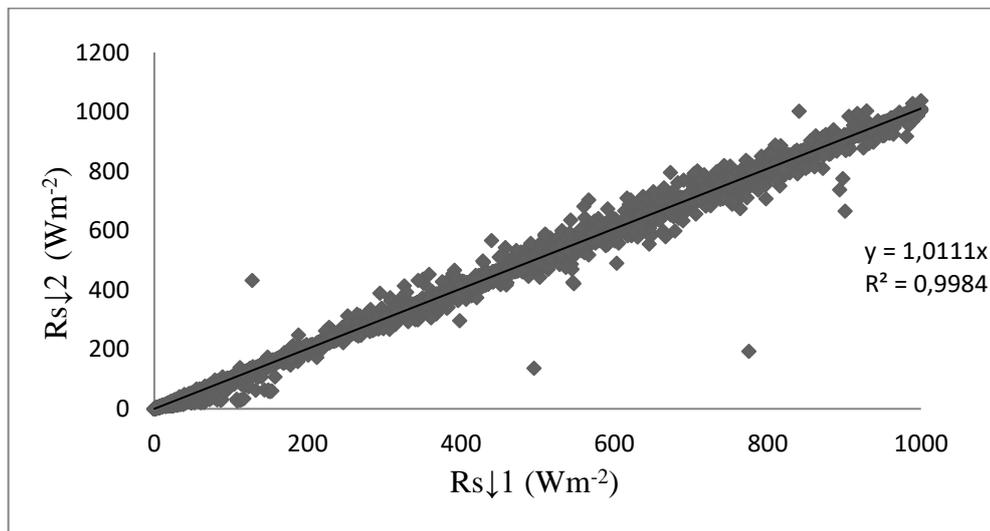


Figura 6. Radiação solar incidente obtida pela estação 1($R_{s\downarrow 1}$) e estação 2 ($R_{s\downarrow 2}$) no pivô de trigo em 2018.

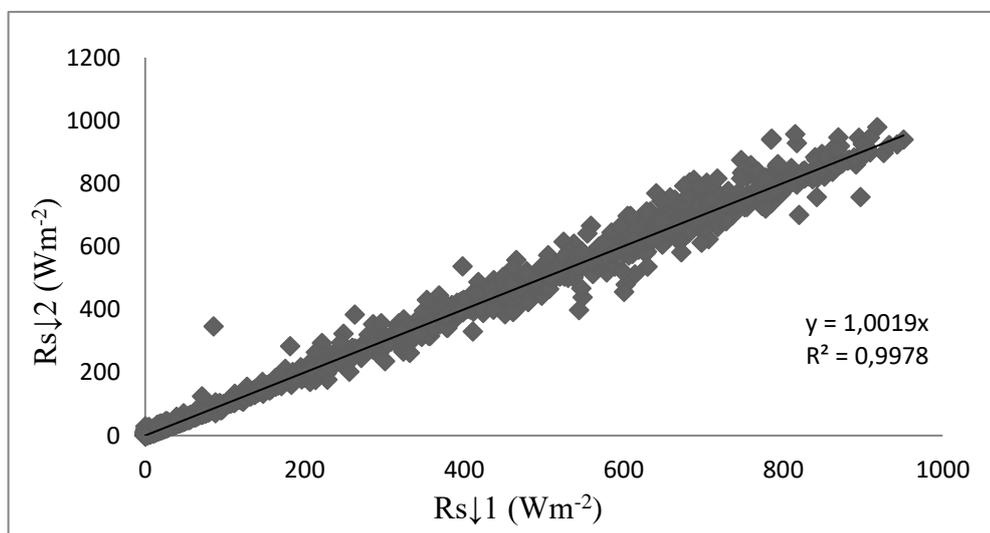
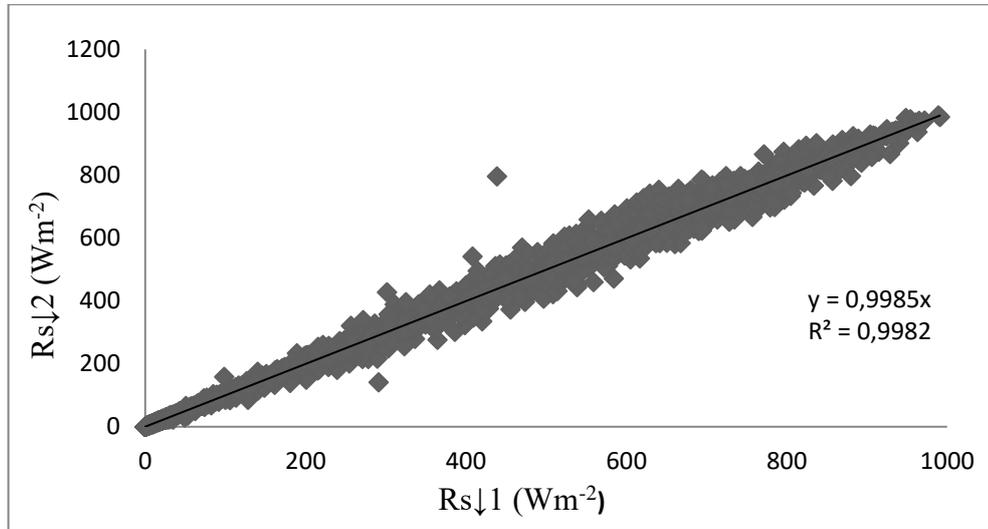


Figura 7. Radiação solar incidente obtida pela estação 1 ($R_{s\downarrow 1}$) e estação 2 ($R_{s\downarrow 2}$) no pivô de trigo em 2019.



Os gráficos das Figura 5, Figura 6 e Figura 7 mostram que os sensores de radiação das duas estações estavam calibrados entre si. Os pontos afastados da linha de tendência provavelmente estão relacionados a eventos em que uma estação esteve coberta por nuvens espessas enquanto a outra ainda estava sob incidência de sol.

Também foi avaliada a correlação entre os dados de radiação solar de ondas curtas refletidas ($R_{s\uparrow}$) coletados pelas duas estações. Apresenta-se a análise para todos os anos de experimento nas Figura 8, Figura 9 e Figura 10.

Figura 8. Radiação solar refletida obtida pela estação 1(Rs↑1) e estação 2 (Rs↑2) no pivô de trigo em 2017.

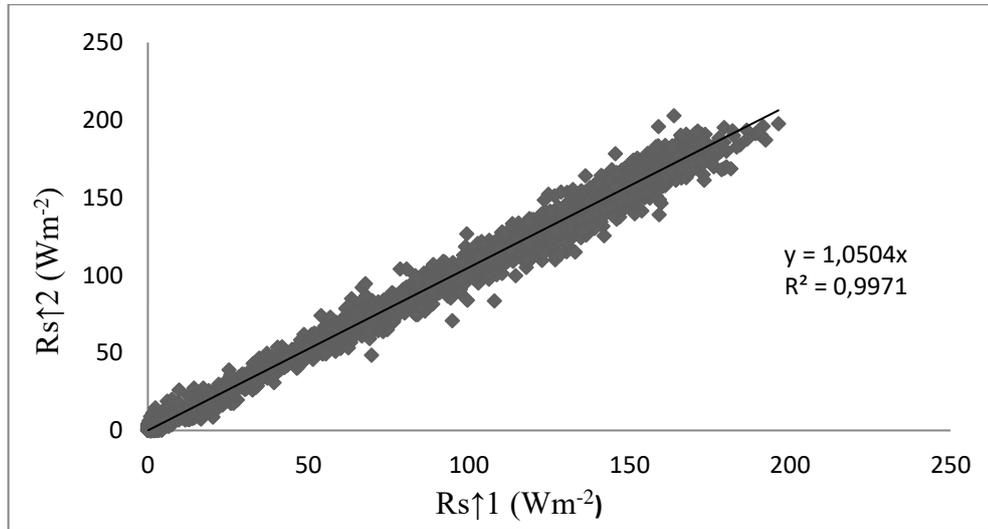


Figura 9. Radiação solar refletida obtida pela estação 1 (Rs↑1) e estação 2 (Rs↑2) no pivô de trigo em 2018.

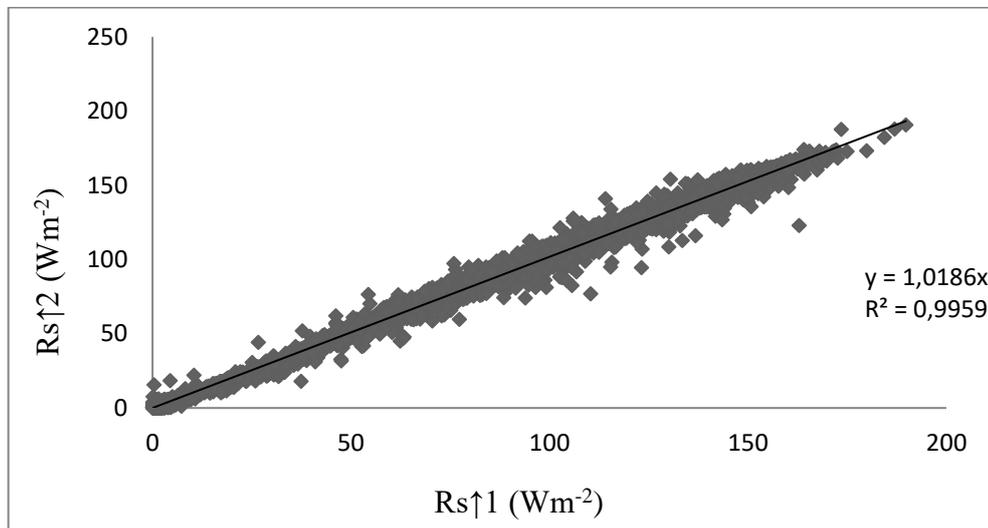
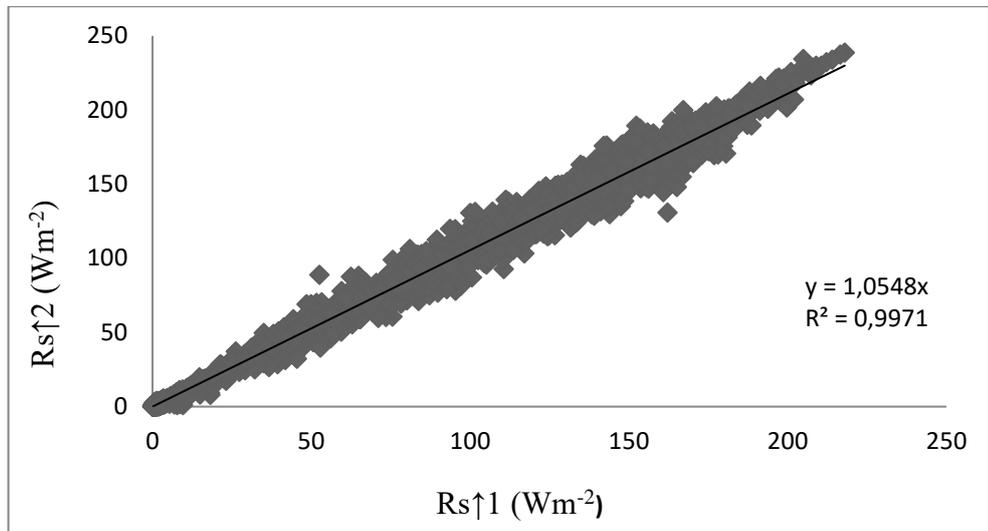


Figura 10. Radiação solar refletida obtida pela estação 1 ($R_{s\uparrow 1}$) e estação 2 ($R_{s\uparrow 2}$) no pivô de trigo em 2019.



Os coeficientes angulares observados nos diagramas de dispersão das Figura 8, Figura 9 e Figura 10, que avaliaram a radiação de ondas curtas refletidas, são causados pela degradação da cultura do trigo ao redor da estação ocasionada durante a realização das manutenções e limpeza dos sensores. Especialmente quando a cultura atinge maior estágio de desenvolvimento fenológico, a diminuição do dossel em torno das estações (por conta de pisoteamento) implica nas variações de radiação solar que é refletida.

Em resumo, a análise de qualidade dos dados de radiação permite afirmar que a regressão linear apresentada na Figura 4 entre $R_{s\downarrow}$ e R_{so} demonstrou a acurácia do radiômetro das estações. A boa correlação encontrada entre as estações 1 e estações 2 em todos os anos (2017, 2018 e 2019), confirma também que os radiômetros das duas estações quando submetidos a diferentes situações de iluminação apresentaram resultados coerentes entre si e que portanto apresentam calibrações equivalentes. A análise indicou que não há necessidade de correção dos dados de radiação ou calibração dos radiômetros.

O fluxo de calor no solo (G) em verificações diárias deve estar próximo ou igual a zero (ALLEN, et al., 1998). Avaliando a média das verificações diárias de G de todo o ciclo da cultura do trigo nas duas estações em cada período de experimento (2017 a 2019), foi possível constatar que os valores de G se comportaram próximos a zero, como esperado. As medidas observadas estão na Tabela 2.

Tabela 2. Média dos valores diários de fluxo de calor no solo para cada ciclo de trigo medido pelas estações 1 e 2 no período de 2017 a 2019.

	G (W m ⁻²)	
	Estação 1	Estação 2
2017	3,25	0,605
2018	-2,73	-2,06
2019	-2,35	-2,26

Os dados de temperatura e umidade relativa são necessários no cômputo da razão de Bowen. Como a razão de Bowen depende de pequena variação desses dois parâmetros em dois níveis de altura é importante que os sensores dos dois níveis, além de medirem suas variáveis corretamente, que eles estejam perfeitamente calibrados entre si. A necessidade de calibração de um sensor em função do outro foi verificada a partir do nivelamento de ambos no nível 2 da estação, onde se observou as medidas por alguns dias, sempre ao final de cada ciclo. As Figura 11, Figura 12 e Figura 13 apresentam as regressões encontradas entre as medidas de temperatura, aferidas pelos sensores das estações 1 e 2, para os anos de 2017, 2018 e 2019 respectivamente.

Figura 11. Valores de temperatura obtidos pelos sensores 1 (T1) e 2 (T2) das estações1 (a) e 2 (b) em 2017.

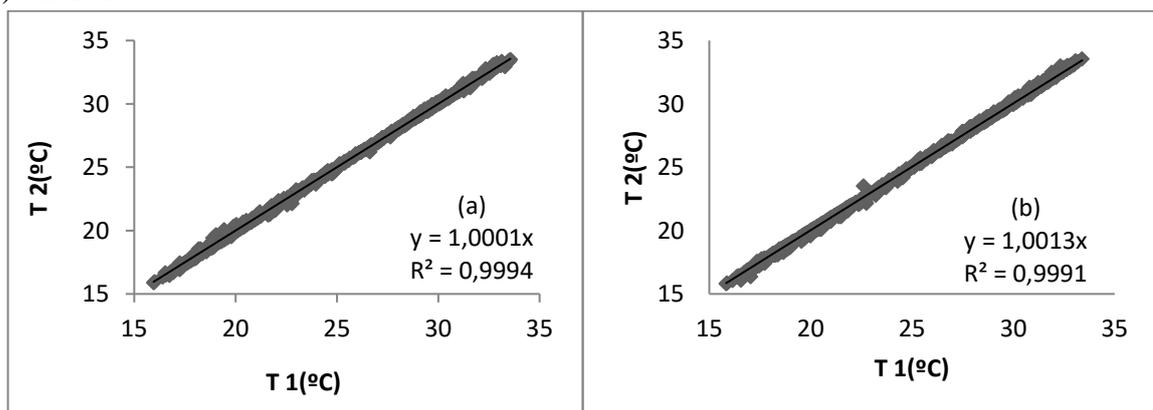


Figura 12. Valores de temperatura obtidos pelos sensores 1 (T1) e 2 (T2) das estações 1 (a) e 2 (b) em 2018.

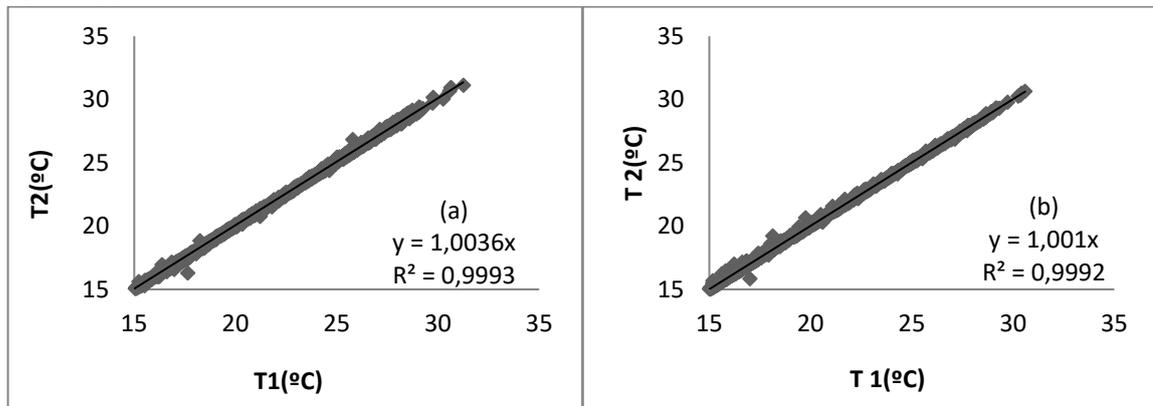
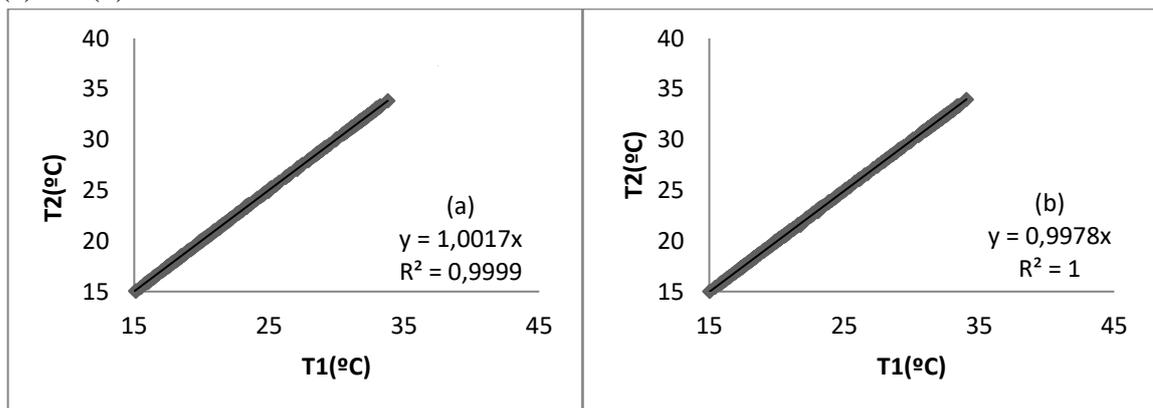


Figura 13. Valores de temperatura obtidos pelos sensores 1 (T1) e 2 (T2) das estações 1 (a) e 2 (b) em 2019.



Após avaliação dos gráficos das Figura 11, Figura 12 e Figura 13, verificou-se a boa correlação e diferenças desprezíveis entre essas medidas indicando que não há necessidade de correção dos dados de temperatura em nenhum dos anos avaliados. Para Allen (2008), a estimativa dos valores de temperatura é um processo de medição simples e por isso, geralmente apresenta dados com maior consistência.

A umidade relativa do ar é um fator crítico na determinação da razão de Bowen, que depende do gradiente de valores encontrados nos dois níveis. Os valores das regressões encontradas estão conforme as Figura 14, Figura 15 e Figura 16, correspondendo aos anos de 2017, 2018 e 2019.

Figura 14. Valores de umidade relativa obtidos pelos sensores 1 (UR1) e 2 (UR2) das estações 1 (a) e 2 (b) em 2017.

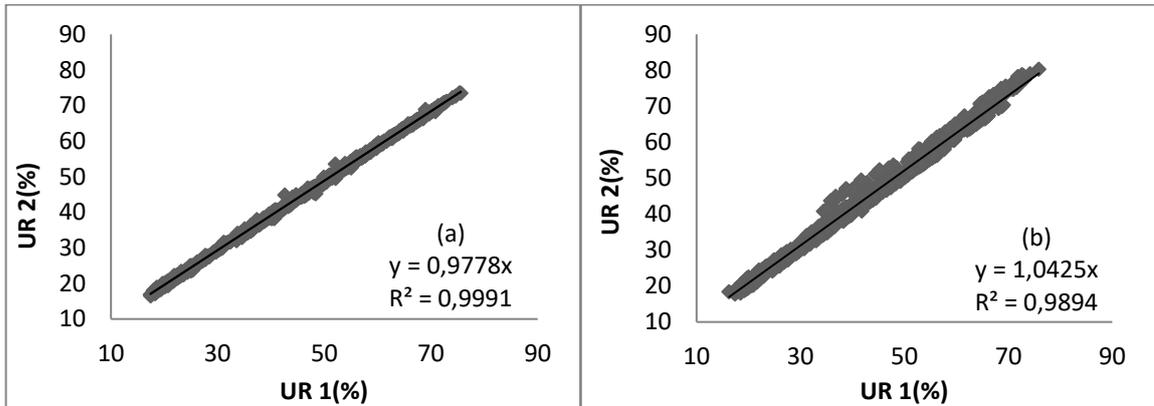


Figura 15. Valores de umidade relativa obtidos pelos sensores 1 (UR1) e 2 (UR2) das estações 1 (a) e 2 (b) em 2018.

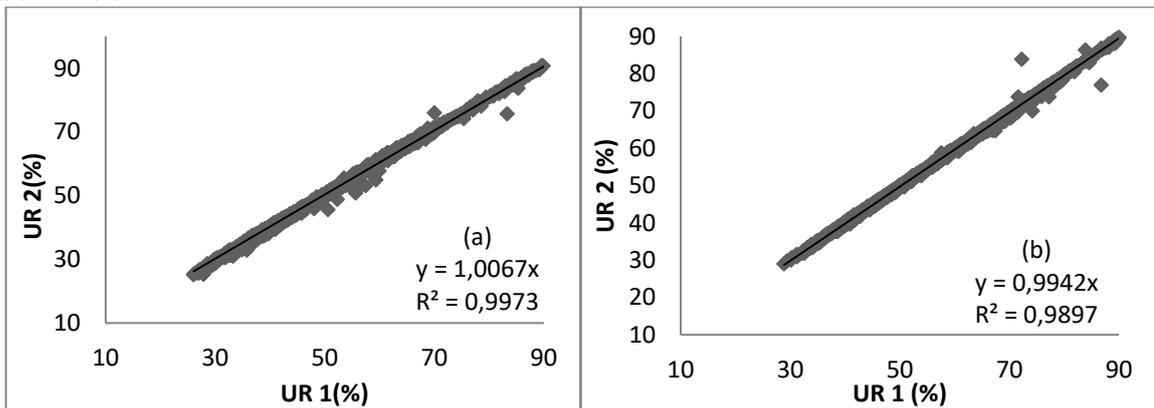
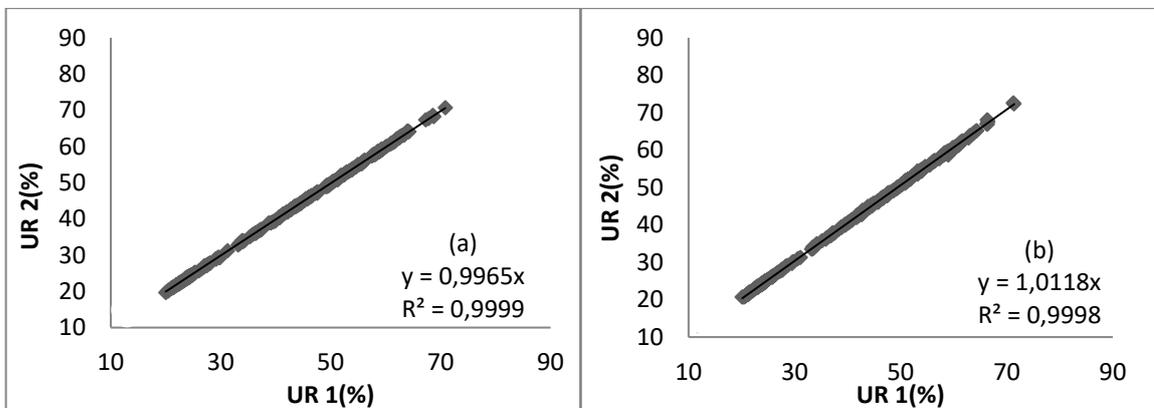


Figura 16. Valores de umidade relativa obtidos pelos sensores 1 (UR1) e 2 (UR2) das estações 1 (a) e 2 (b) em 2019.



Como as equações de reta encontradas para a correlação dos sensores de umidade (Figura 14, Figura 15 e Figura 16) teve maior inclinação, principalmente no ano de 2017, do que as encontradas para os sensores de temperatura, considerou-se necessário realizar a calibração do sensor de umidade do nível 1 em função do sensor de umidade do nível 2 pela equação encontrada para cada estação no ano de 2017 e também para a estação 2 no ano de 2019.

Ainda como análise de consistência preliminar para o cálculo da razão de Bowen, foram aplicados os filtros sugeridos por Perez et al. (1999) para descartar os dados que tivessem inconsistências de fluxo de calor latente (LE), fluxo de calor sensível (H) e razão de Bowen (β). Como foram realizadas calibrações dos sensores de umidade, decidiu-se avaliar a quantidade de erros encontrados pelos filtros propostos por Perez et al. (1999) em duas condições: com os dados de umidade calibrados e não calibrados. As Tabela 3 Tabela 4 Tabela 5 apresentam as inconsistências verificadas no período entre 7 e 18 horas para cada uma das duas estações em cada ano de experimento.

Tabela 3. Percentual de inconsistências totais identificados nos dados de fluxo de calor latente (LE), fluxo de calor sensível (H) e razão de Bowen (β) nas estações 1 e 2 no período de 7 as 18 no ano de 2017 em duas situações: dados de umidade calibrados e não calibrados.

DADOS	Percentual de inconsistência	
	Estação 1	Estação 2
Com calibração	8,16%	2,28%
Sem calibração	2,3%	12,37%

Considerando que o percentual de erros implica na quantidade de dados descartados e que quanto mais dados descartados, maior é o prejuízo para o cálculo da razão de Bowen, optou-se, após a análise dos filtros de Peres (1999), por não realizar a calibração da estação 1, tendo em vista o aumento de inconsistências geradas com a calibração dos sensores de umidade para 8,16% contra 2,3% sem a calibração. Assim, em 2017, manteve-se a calibração dos dados de umidade da estação 2, pois com a calibração houve 2,28% de inconsistências contra 12,37% de inconsistências sem a calibração.

Tabela 4. Percentual de inconsistências totais identificados nos dados de fluxo de calor latente (LE), fluxo de calor sensível (H) e razão de Bowen (β) nas estações 1 e 2 no período de 7 as 18 no ano de 2018 em duas situações: dados de umidade calibrados e não calibrados.

DADOS	Percentual de inconsistência	
	Estação 1	Estação 2
Com correção	7,16%	5,41%
Sem correção	12,48%	4,76%

Tabela 5. Percentual de inconsistências totais identificados nos dados de fluxo de calor latente (LE), fluxo de calor sensível (H) e razão de Bowen (β) nas estações 1 e 2 no período de 7 as 18 no ano de 2019 em duas situações: dados de umidade calibrados e não calibrados.

DADOS	Percentual de inconsistência	
	Estação 1	Estação 2
Com correção	11,60%	13,25%
Sem correção	11,65%	18,14%

Para o ano de 2019 (Tabela 5) os dados de umidade da estação 2 foram calibrados, e com a calibração ainda houve uma redução no percentual de erros de 18,14% para 13,25%. Ao passo que os dados de umidade da estação 1 não foram corrigidos, como já definido na análise dos sensores de umidade.

De maneira geral, o percentual de inconsistências foi próximo ao encontrado por Lopes (2018) que também trabalhou com trigo e encontrou os seguintes percentuais de erros 5,89% e 1,54%. Claramente o ano de 2019 foi o que apresentou maior percentual de erros (11% e 13%) e possivelmente se justifica pela área plantada ter sido menor que nos outros anos de forma que não foi possível garantir o raio de influência da estação com a cultura de trigo. Constatou-se que a maior parte das inconsistências foram observadas nos horários em que o sol está próximo do horizonte e a radiação é bastante reduzida. Como o período de dados utilizados para a razão de Bowen foi entre 7 e 18 horas, a maior parte das inconsistências foi observada de 7 as 8 e de 17 as 18. Outra fonte de erros, segundo Perez et al. (1999), são os eventos de irrigação.

4.2 Estimativa da evapotranspiração real pelo método da razão de Bowen

A evapotranspiração real diária da cultura do trigo foi calculada pelo método da razão de Bowen (ET_{RB}) a partir dos dados coletados pelas duas estações meteorológicas ao longo dos períodos de cada ciclo do trigo descritos na Tabela 1.

Em 2017, o plantio da cultura ocorreu tardiamente em comparação aos outros anos e a estimativa da evapotranspiração se iniciou em 28/06/2017. A variação temporal da ET_{RB} pelas duas estações é apresentada na Figura 17.

Em 2018, a estação 2 só possui dados válidos a partir de 10 de julho, pois os sensores de temperatura e umidade apresentaram problemas e precisaram ser substituídos. A estação 1 permaneceu com os mesmos sensores de 2017 e não houve necessidade de troca. A estimativa da ET_{RB} pelas duas estações segue conforme a Figura 18.

Em 2019, as duas estações foram instaladas no campo na mesma data. A Figura 19 apresenta a ET_{RB} para as duas estações.

Figura 17. Evapotranspiração na cultura do trigo pelo método da razão de Bowen no ano de 2017 estimadas pelas estações 1 e 2.

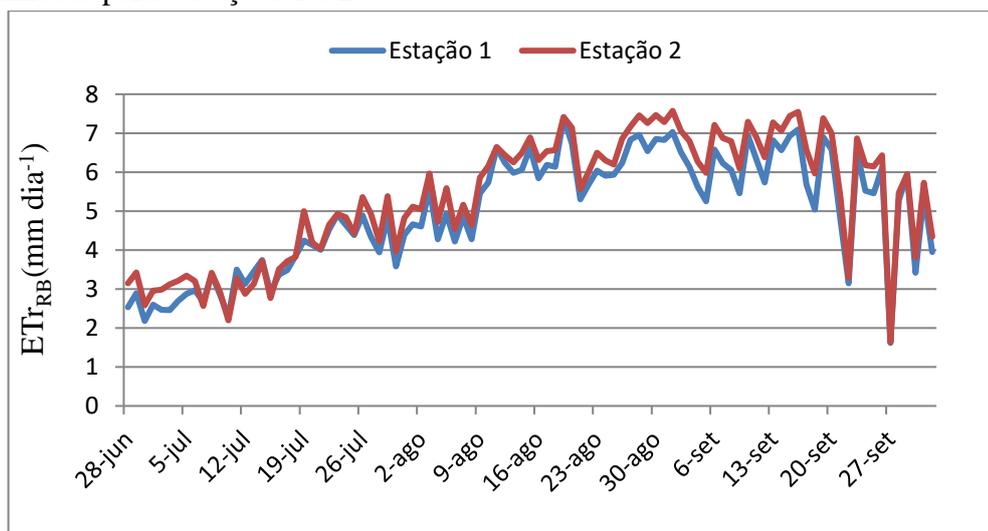


Figura 18. Evapotranspiração na cultura do trigo pelo método da razão de Bowen no ano de 2018 estimadas pelas estações 1 e 2.

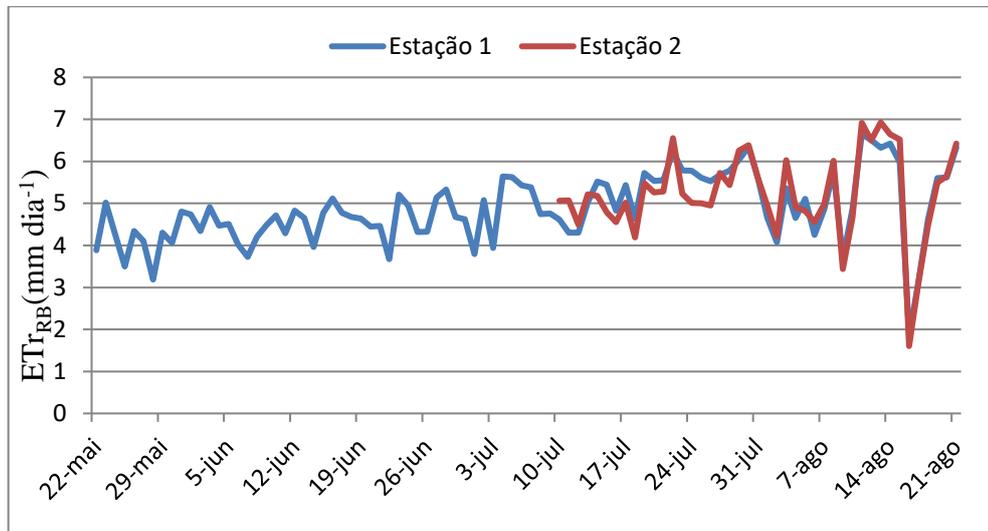
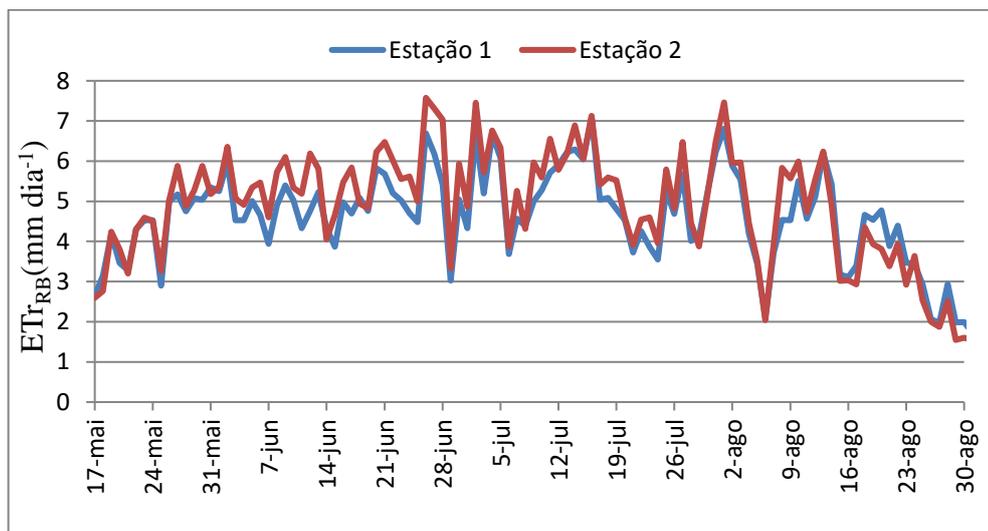


Figura 19. Evapotranspiração na cultura do trigo pelo método da razão de Bowen no ano de 2019 estimadas pelas estações 1 e 2.



Em cada ano de experimento, a ET_{RB} obtida a partir das duas estações variou de forma similar (Figura 17, Figura 18 e Figura 19) com tendência de pequena superestimação da estação 2 em relação a estação 1.

Em 2017, os valores máximos mínimos e médios de ET_{RB} para as estações 1 e 2 foram de 7,38 e 7,57 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$; 1,61 e 1,64 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ e 4,98 e 5,34 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$. A ET_{RB} acumulada pelas estações 1 e 2, ao longo do período que estiveram instaladas no pivô central (97 dias), foi de 484,6 e 520,2 mm.

Em 2018, considerando que a estação 2 só obteve dados válidos a partir de 10 de julho, os valores máximos mínimos e médios de ET_{RB} para as estações 1 e 2 foram de 6,65 e 6,92 $mm.d^{-1}$, 1,84 e 1,60 $mm.d^{-1}$ e 4,87 e 5,22 $mm.d^{-1}$. A ET_{RB} acumulada pelas estações 1 e 2, ao longo do período que estiveram instaladas no pivô central (92 dias), foi de 448,4 e 224,6 mm.

Em 2019, os valores máximos mínimos e médios de ET_{RB} para as estações 1 e 2 foram de 7,09 e 7,57 $mm.d^{-1}$, 1,97 e 1,54 $mm.d^{-1}$ e 4,63 e 4,92 $mm.d^{-1}$. A ET_{RB} acumulada pelas estações 1 e 2, ao longo do período que estiveram instaladas no pivô central (106 dias), foi de 491,3 e 521,7 mm.

Comparativamente no ano de 2017 a ETr do início do ciclo do trigo foi inferior ao observado em 2018 e 2019. Esse fato teve relação direta com o desenvolvimento das culturas que foi atrasado em 2017. A discussão a respeito das diferenças de desenvolvimento em cada ciclo do trigo será realizada no item 4.2.2.1 desta dissertação.

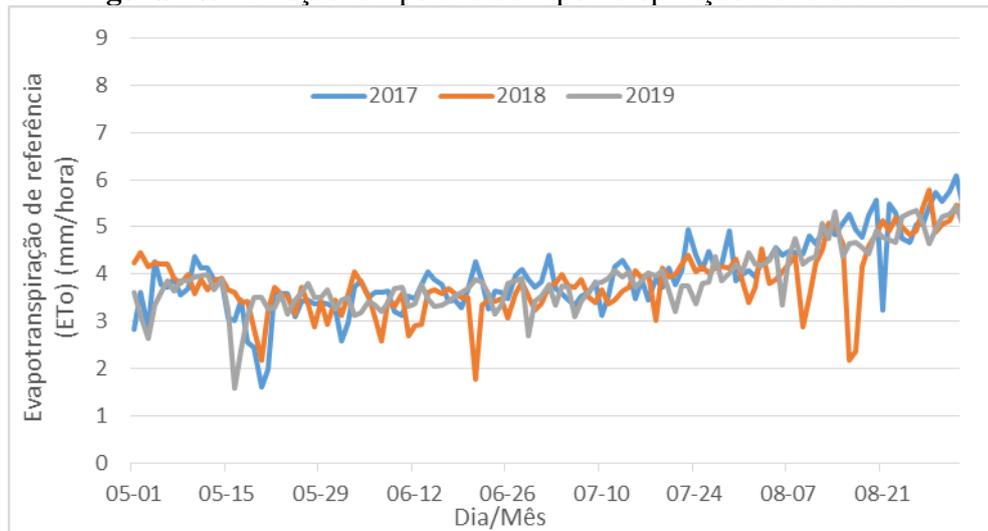
4.3 Dados para implementar o modelo SSEBop

4.3.1 Evapotranspiração de referência

A evapotranspiração de referência foi calculada pela equação 19 com os dados coletados pela estação Paranoá do INMET.

A Figura 20 apresenta a evapotranspiração de referência para os anos de 2017, 2018 e 2019 entre os meses de maio a agosto.

Figura 20. Variação temporal da evapotranspiração de referência.



De maio para junho há redução da evapotranspiração de referência em função do início do inverno, quando o fotoperíodo é reduzido e a temperatura média do ar é mais baixa. A partir de meados de julho a evapotranspiração de referência sobe gradativamente em razão principalmente do aumento da demanda evapotranspirativa da atmosfera (período de estiagem no cerrado), bem como aumento gradativo do fotoperíodo e da temperatura média do ar.

4.3.2. Dados de sensoriamento remoto

Para obter a temperatura de superfície e o NDVI foram utilizadas imagens dos satélites Landsat 7 e 8. Foram selecionadas as imagens relativas ao período que as estações meteorológicas estiveram instaladas no interior dos pivôs centrais (Tabela 1).

As imagens de satélite que apresentaram nuvens ou sombra de nuvem em cima dos pivôs de interesse nesse estudo foram descartadas em razão de comprometerem a qualidade dos dados e conseqüentemente as análises, conforme recomenda Senay et al. (2016). Em 2017 foi descartada a imagem de 17 de agosto devido à presença de nuvem. Em 2018 foram descartadas as imagens de 24 de maio e 1 de junho. Em 2019 foram descartadas as imagens de 6 de julho, 7 de agosto, 15 de agosto e 23 de agosto.

Os resultados foram extraídos dos pixels onde estavam localizadas as estações nos 3 anos de experimento. Especificamente para os casos em que a falha do dispositivo SLC (Scan

Line Corrector) do Landsat7 ocorreu em cima do pixel onde a estação estava localizada, foi apresentado a média dos valores dos pixels da área de influência da estação meteorológica instaladas no interior dos pivôs de irrigação que é de um raio de 100 vezes a altura dos sensores instalados no segundo nível. Optou-se por não realizar o preenchimento das falhas, pois o estudo em tela busca avaliar a precisão do modelo quanto a evapotranspiração e não realizar mapeamento de evapotranspiração de toda a bacia hidrográfica.

4.3.2.1. NDVI

Nas Figura 21, Figura 23 e Figura 25 são apresentadas as imagens de NDVI que representam diversas fases do desenvolvimento do trigo. A fim de poder apresentar fases iniciais, intermediárias e finais foram selecionadas algumas imagens de satélite que estão fora do período de coleta de dados com a estação meteorológica, além do que foram suprimidas imagens que apresentassem resultados muito similares em sequência.

Nas Figura 22, Figura 24 e Figura 26 são apresentados gráficos dos valores de NDVI para o pixel da estação, bem como dos valores médio, mínimo e máximo para toda a área do pivô em cada data de passagem de satélite.

Figura 21. Imagens de NDVI do pivô experimental de trigo do ano de 2017.

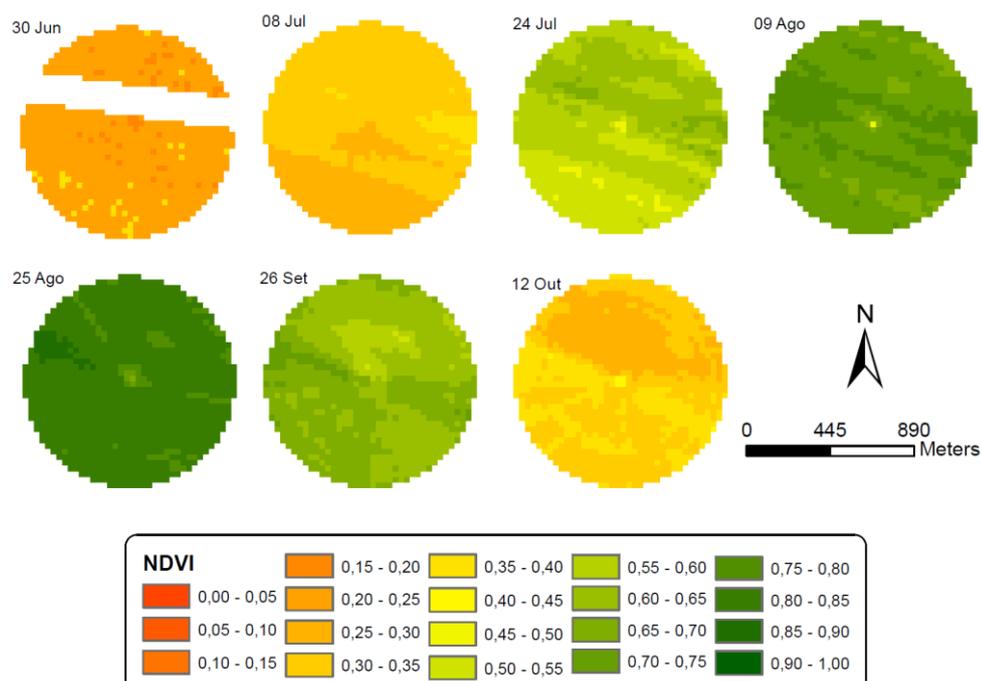


Figura 22. Gráfico dos valores de NDVI médio, máximo e mínimo de toda área do pivô experimental de 2017 e também do pixel da estação.

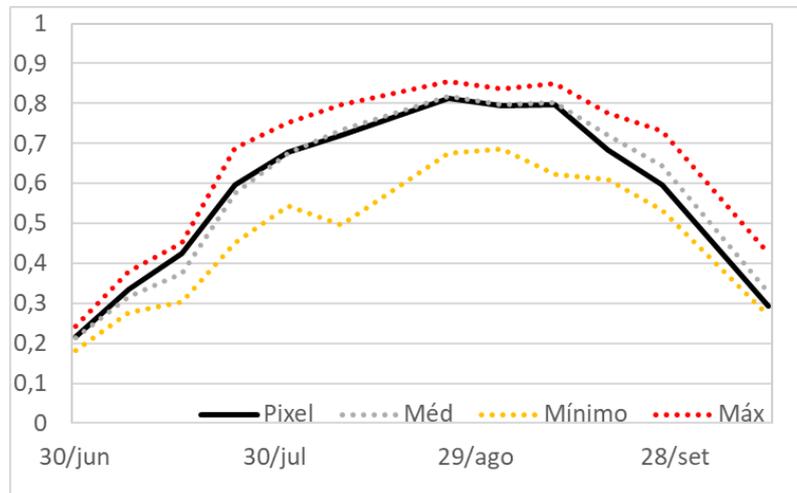


Figura 23. Imagens de NDVI do pivô experimental de trigo do ano de 2018.

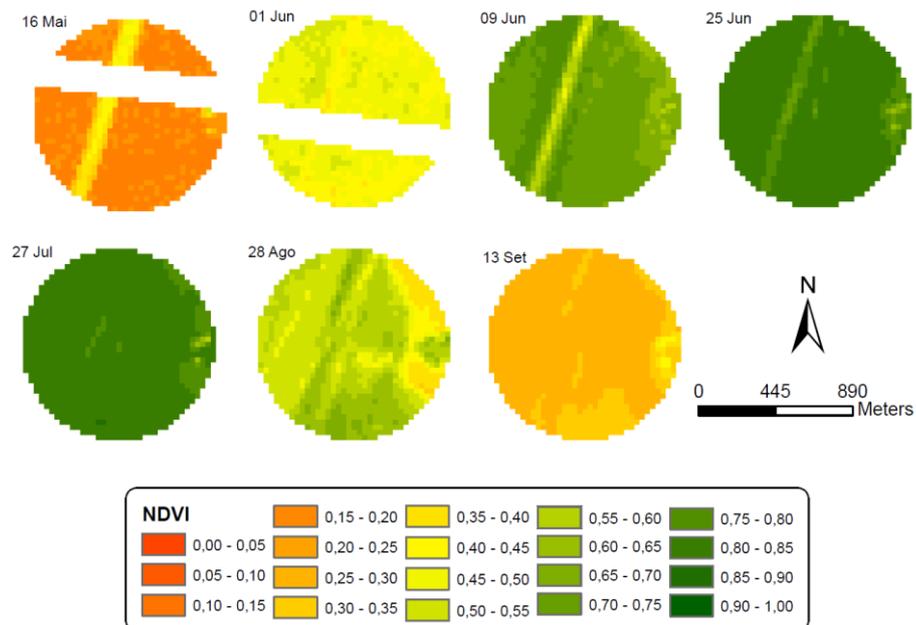


Figura 24. Gráfico dos valores de NDVI médio, máximo e mínimo de toda área do pivô experimental de 2018 e também do pixel da estação.

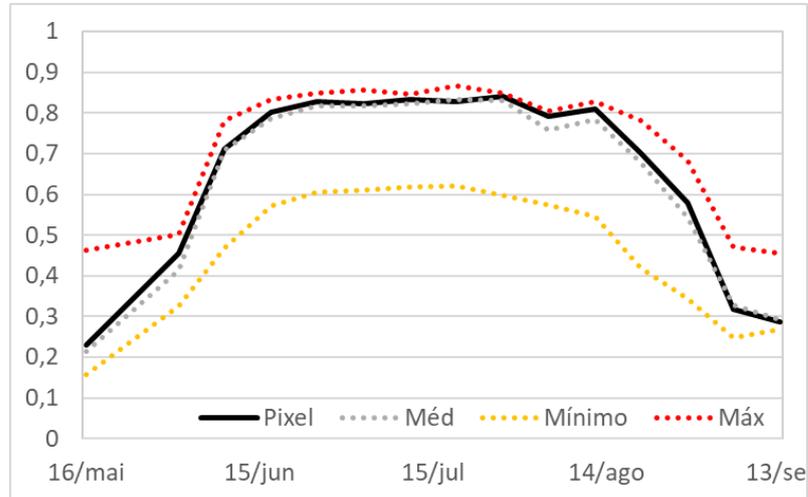


Figura 25. Imagens de NDVI do pivô experimental de trigo do ano de 2019.

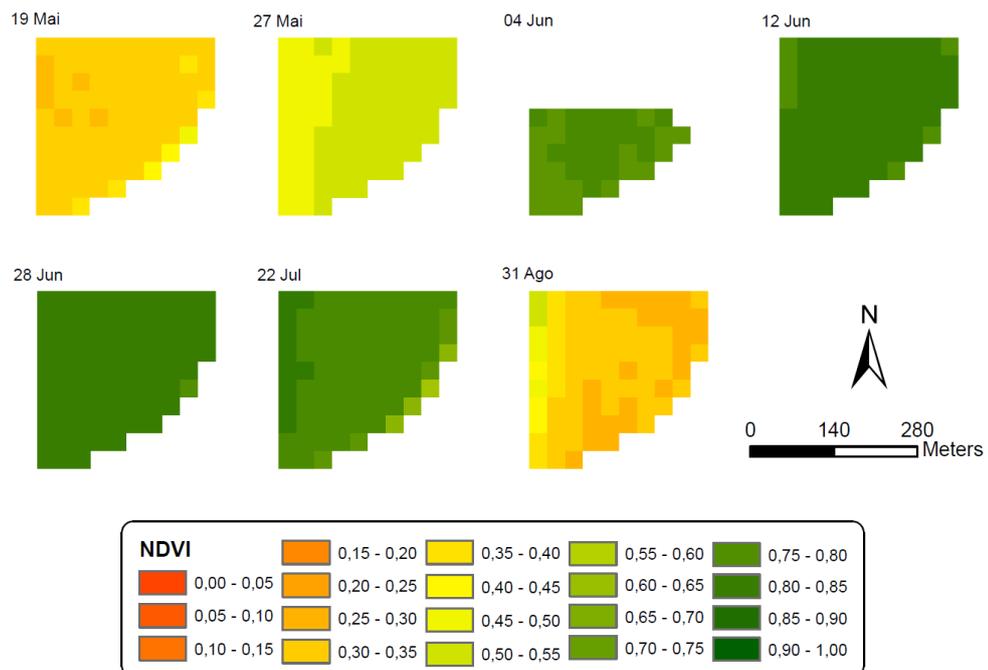
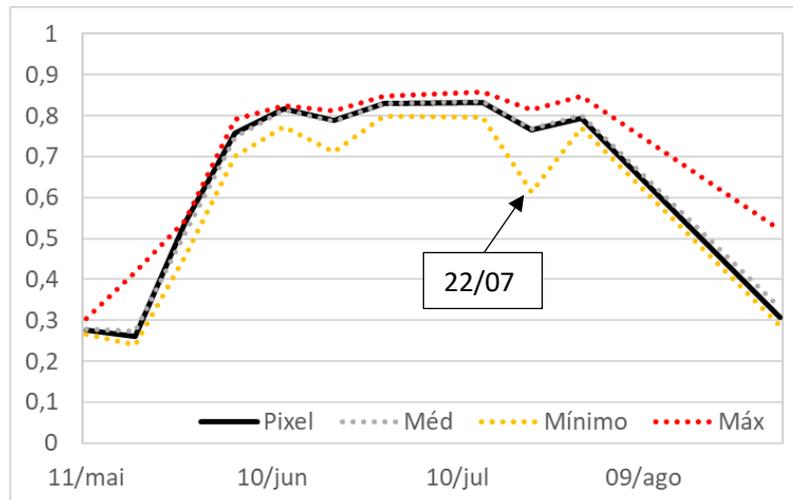


Figura 26. Gráfico dos valores de NDVI médio, máximo e mínimo de toda área do pivô experimental de 2019 e também do pixel da estação.



No ano de 2017 a cultura do trigo teve um desenvolvimento mais lento que nos outros anos. Tanto que aos 35 dias de cultivo o trigo apresentava 15 cm de altura, enquanto nos anos de 2018 e 2019 com o mesmo período de desenvolvimento o trigo já apresentava 30 cm de altura.

Provavelmente, o fator preponderante para essa diferença foi o momento do plantio, visto que em 2017 o plantio ocorreu em 22 de junho enquanto 2018 e 2019 ocorreu em 15 e 10 de maio, respectivamente. O plantio em 2017 foi feito no início do inverno quando se tem fotoperíodo e temperaturas menores, fatores que devem ter atrasado o desenvolvimento da cultura. Adicionalmente, em 2017, o plantio foi feito com maior densidade de plantas por hectare (4.500.000) maior que os outros anos (4.000.000).

Para corroborar a diferença no desenvolvimento, em 2017 o NDVI atingiu um patamar acima de 0,8 (próximo ao máximo desenvolvimento de biomassa fotossinteticamente ativa detectável por esta técnica) apenas em 25 agosto (64 dias após o plantio), ao passo que em 2018 e 2019 ocorreu em 17 e 12 de junho (33 dias após o plantio nos dois anos).

Apesar das diferenças apontadas quanto a velocidade de desenvolvimento, foi possível constatar que o comportamento do NDVI para os ciclos de trigo estudados seguiu o padrão de culturas de ciclo anual, apresentando fase inicial de aumento do NDVI com o desenvolvimento vegetativo das plantas, até atingir um patamar máximo, quando há maior de área foliar e vigor

vegetativo, no qual se estabiliza por um período e após há o declínio indicando a maturação fisiológica.

Nas imagens de NDVI, do ano de 2018 (Figura 23) dos dias 16 de maio, 9 e 25 de junho, é possível perceber uma faixa com valor de NDVI diferente do restante do pivô, trata-se de um experimento no qual não foi retirado o material vegetal morto na cultura do algodão que antecedeu o trigo. Na imagem de 27 de julho, o NDVI da faixa já se igualou ao restante do pivô. Além disso, outro detalhe que chama a atenção, no ano de 2018, há uma região na borda oeste do pivô que apresenta valores de NDVI sempre menores que no restante do pivô, sendo mais nítido na imagem de 28 de agosto, trata-se de área, com solo diferente possuindo muito cascalho, que dificulta o melhor desenvolvimento da cultura.

Em 22 de julho de 2019, o valor mínimo de NDVI (0,56) foi acentuadamente menor do que nas datas de satélite anterior e posterior – 14 e 30 de julho – (0,79 e 0,77). O motivo que causou esse valor mínimo está relacionado a quantidade de dias sem irrigação em um período de maior demanda evapotranspirativa da atmosfera. Esse aspecto será discutido em maior detalhe no item 4.4.3, tendo em vista que também afetou a evapotranspiração desta data. Outro fator que favoreceu esse valor de NDVI foi ser um pixel situado próximo a borda do pivô central, onde os efeitos de um período sem irrigação são potencializados por estar mais exposto ao vento.

4.3.2.2. Temperatura de Superfície – Ts

A temperatura de superfície é um parâmetro crucial para a determinação da evapotranspiração pelo modelo SSEbop, sendo essencial para determinar os pixels quente e frio. Afetam diretamente a Ts a radiação solar incidente, o tipo de cobertura e a disponibilidade de água para troca de calor latente. Apresenta-se nas Figura 27, Figura 29 e Figura 31 as imagens de Ts para as mesmas datas que foram apresentadas imagens de NDVI, para que se seja conhecida a cobertura do solo nas datas de análise e poder inferir sobre os fatores que afetaram as variações de Ts.

Nas Figura 28, Figura 30 e Figura 32 são apresentados gráficos dos valores de Ts para o pixel da estação, bem como dos valores médio, mínimo e máximo para toda a área do pivô em cada data de passagem de satélite.

Figura 27. Imagens de Ts (K) do pivô experimental de trigo do ano de 2017.

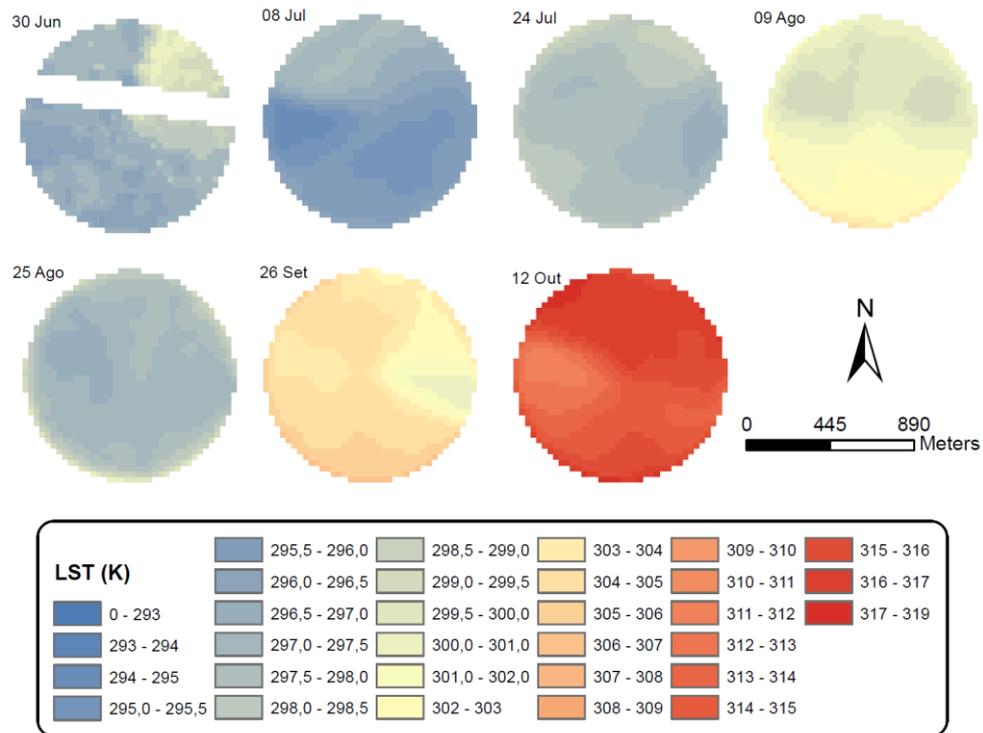


Figura 28. Gráfico dos valores de Ts (K) médio, máximo e mínimo de toda área do pivô experimental de 2017 e também do pixel da estação.

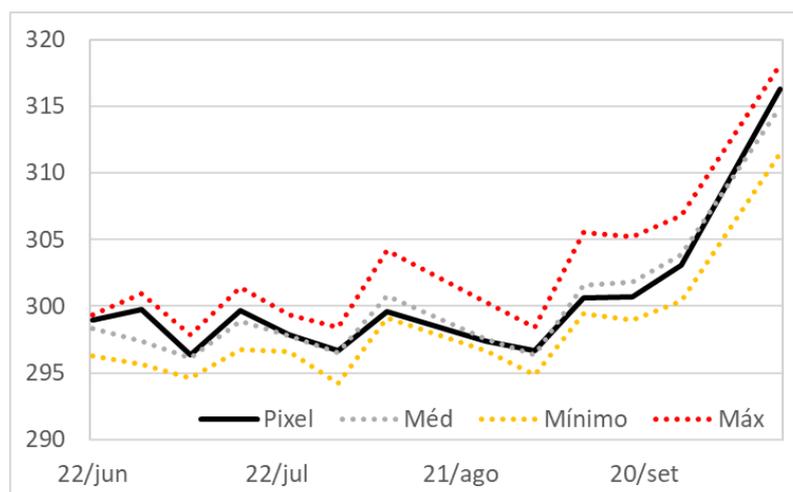


Figura 29. Imagens de Ts do pivô experimental de trigo do ano de 2018.

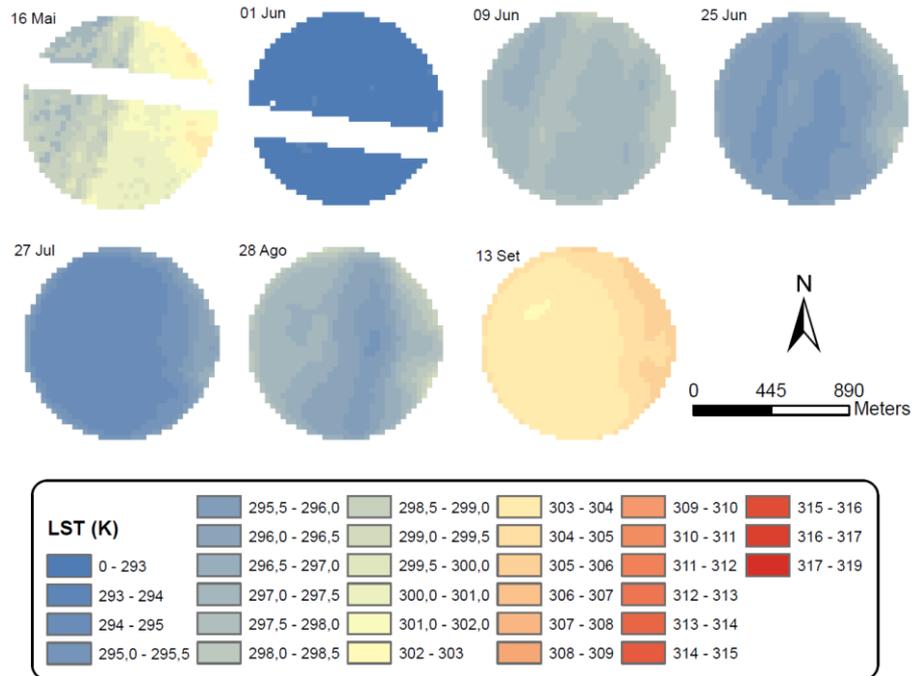


Figura 30. Gráfico dos valores de Ts médio, máximo e mínimo de toda área do pivô experimental de 2018 e também do pixel da estação.

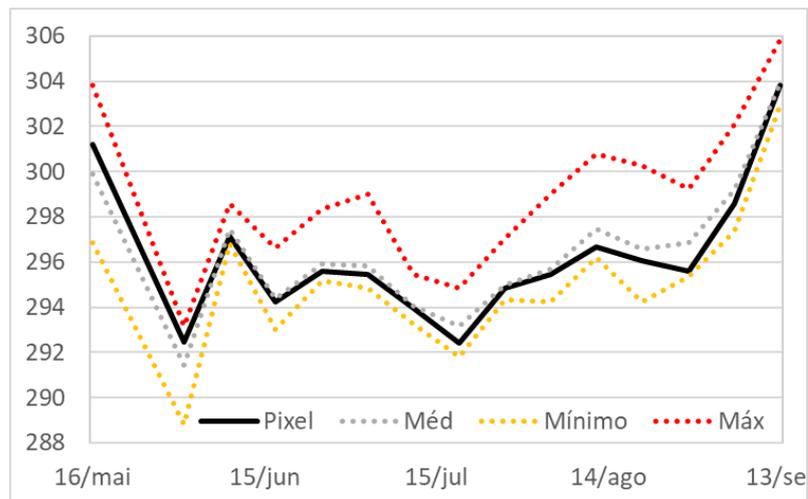


Figura 31. Imagens de Ts do pivô experimental de trigo do ano de 2019.

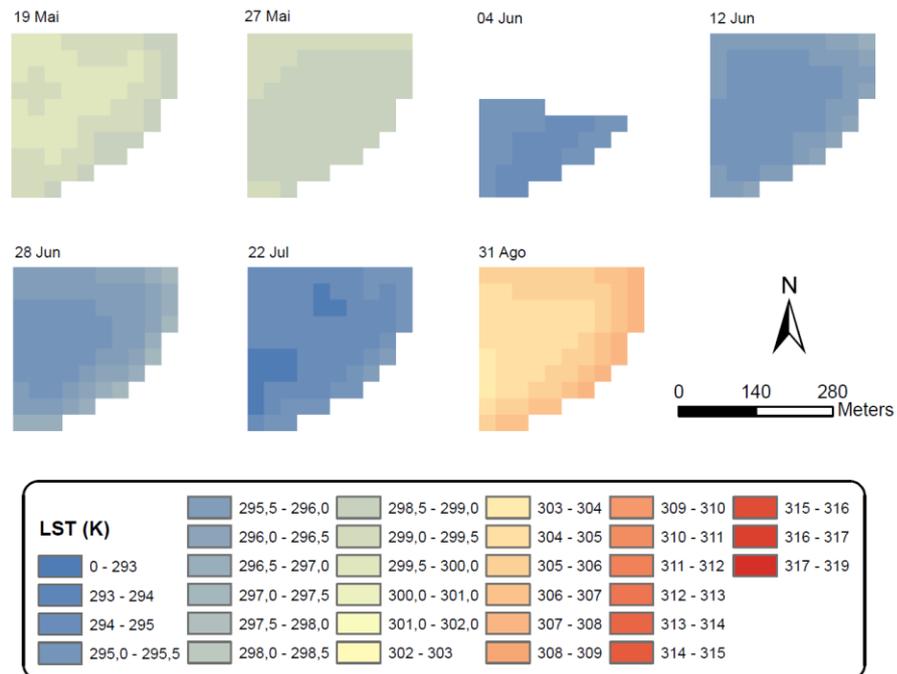
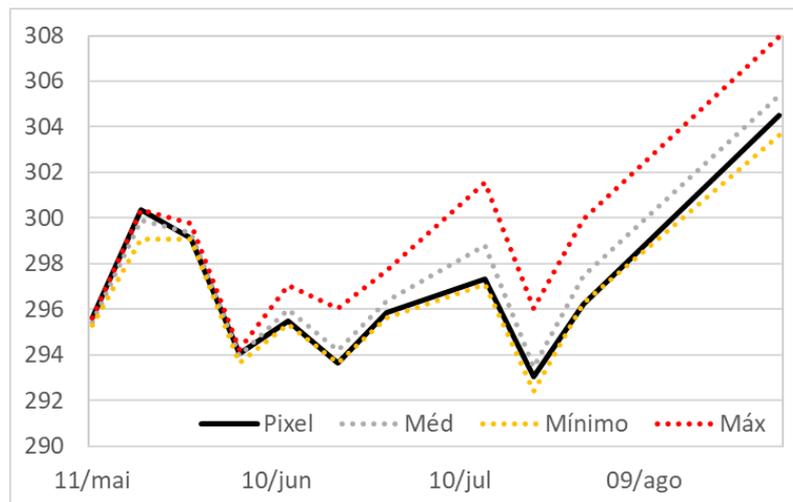


Figura 32. Gráfico dos valores de Ts médio, máximo e mínimo de toda área do pivô experimental de 2019 e também do pixel da estação.



A imagem de 09 de agosto de 2017 (Figura 27) permite perceber a influência da disponibilidade de água na Ts, a diferença de temperatura entre a parte norte e sul do pivô indica evento de irrigação iniciado e não concluído no momento da passagem do satélite. Já em 12 de

outubro do mesmo ano foi registrada a maior temperatura de 316 K que está em consonância com o fato de que foi realizada a colheita do trigo um dia antes, alterando a cobertura do solo.

A menor T_s de 292K foi apresentada na imagem de 01 de junho de 2018 (Figura 29). A temperatura se justifica em razão da presença de nuvens na imagem de satélite sobre a área de interesse. Foi possível verificar em outros pixels do mesmo pivô encoberto por nuvens temperaturas da ordem de 289K. A presença de nuvens superestima a evapotranspiração pelo modelo SSEBop, pois quanto mais baixa for a temperatura, maior será o valor da fração evapotranspirativa calculada pelo modelo, conseqüentemente maior será a evapotranspiração. Por este motivo as datas de passagem de satélite que apresentaram presença de nuvens na área experimental devem ser descartadas da análise de evapotranspiração.

O ano de 2019 (Figura 31) foi o mais fácil de associar a variação da cobertura vegetal com a variação de T_s . Comparando as Figura 25 e Figura 31 se percebe que quanto maior o NDVI menor foi a T_s . No entanto, as imagens dos dias 19 de maio e 31 de agosto possuem aproximadamente o mesmo NDVI, mas T_s diferentes. Fatores que devem ter influenciado são a provável diferença de radiação incidente (na primeira data a temperatura do ar era 290,41K e na segunda de 292,96K) e a diferença de água disponível para troca de calor latente, visto que os registros indicam 2 dias sem irrigação na primeira data e 4 na segunda, além de 31 de agosto ser o auge da demanda evapotranspirativa da atmosfera na região do cerrado.

4.4. Evapotranspiração real da cultura de trigo gerada pelo modelo SSEBop

Nesse tópico a forma de apresentação dos resultados será modificada e cada ano do experimento será abordado separadamente e não mais em conjunto, a fim de permitir análise mais detalhada das particularidades da ETr_{SSEBop} de cada ciclo do experimento.

4.4.1 Resultados da ETr_{SSEBop} para o ano de 2017

Calculou-se a ETr_{SSEBop} para as datas de passagem de satélite durante o cultivo do trigo em 2017. A variabilidade espacial da ETr estimada pelo modelo pode ser observada na Figura 33. A Figura 34 apresenta o gráfico dos valores de ETr_{SSEBop} para o pixel da estação, bem como

dos valores médio, mínimo e máximo para toda a área do pivô em cada data de passagem de satélite.

Figura 33. Imagens de $ET_{rSSEBop}$ do pivô experimental de trigo do ano de 2017.

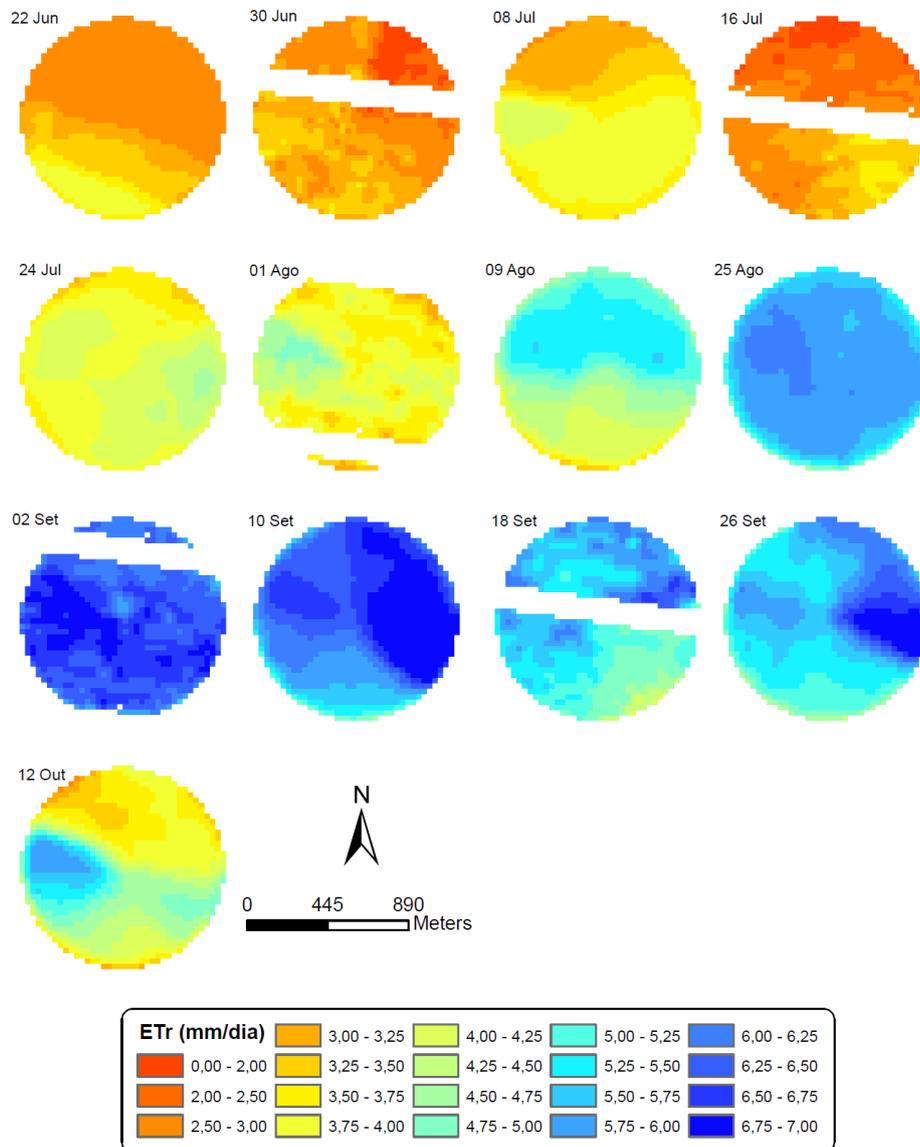
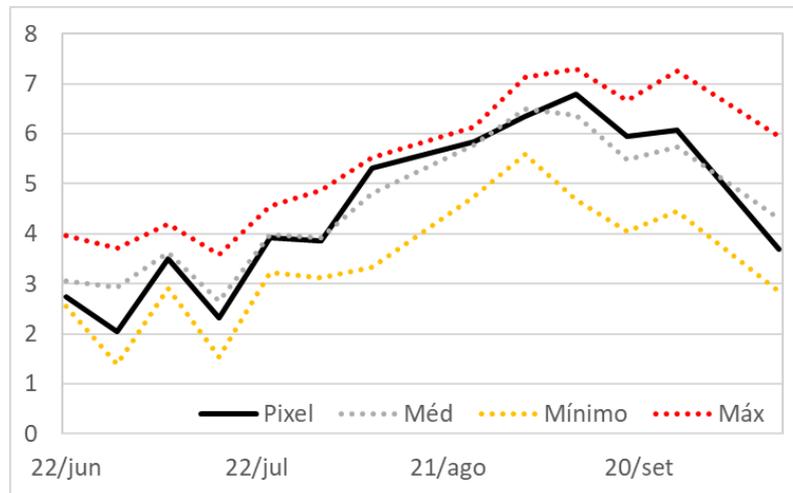


Figura 34. Gráfico dos valores de $ET_{rSSEBop}$ médio, máximo e mínimo de toda área do pivô experimental de 2017 e também do pixel da estação.

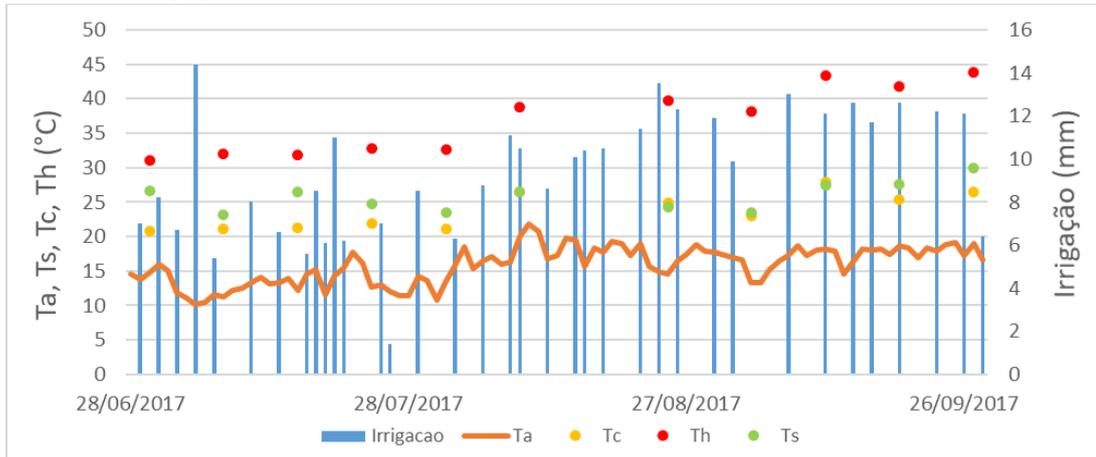


O desenvolvimento mais lento no início da cultura do trigo durante o experimento em 2017 propiciou a coleta de várias imagens de satélite nas fases iniciais do desenvolvimento fenológico (emergência, perfilhamento e alongamento) proporcionando a observação de aumento gradual dos valores de NDVI (Figura 21) e $ET_{rSSEBop}$ (Figura 33), até atingir as fases de maiores valores de NDVI e $ET_{rSSEBop}$ (emborrachamento, floração, espigamento) e por fim com a maturação da cultura (termino de enchimento dos grãos, maturação do grão) iniciar o declínio dos valores de NDVI e $ET_{rSSEBop}$. Cabe salientar que na fase final os valores de $ET_{rSSEBop}$ não caíram mais, pois os valores ET_o estavam elevados (Figura 20), conforme é característico da região do cerrado no final do período de seca.

Ao longo de todo o ciclo do trigo, a $ET_{rSSEBop}$ do pixel da estação esteve muito próxima do valor médio de todos os pixels da área do pivô conforme gráfico da Figura 34. A exceção foi a data de 30 de junho quando a $ET_{rSSEBop}$ esteve muito mais próxima do valor mínimo registrado no pivô do que do valor médio. Pela imagem do pivô de 30 de junho (Figura 33) é possível perceber que há um trecho (quase um quarto de pivô) com evapotranspiração inferior a todo o restante e o pixel da estação se localiza justamente nesse trecho com evapotranspiração inferior. Ao analisar a Figura 21, percebe-se que não há variação de NDVI no interior do pivô que justifique a diferença de $ET_{rSSEBop}$, contudo há diferença de temperatura de superfície (Figura 27) com variação espacial igual a variação de $ET_{rSSEBop}$ encontrada na Figura 33. Para compreender melhor esse evento, apresenta-se gráfico (Figura 35) com as seguintes variáveis, que influenciam diretamente na $ET_{rSSEBop}$: temperaturas de superfície, de pixel frio, de pixel

quente e ambiente, além da irrigação. Por razão de escala que permitisse a melhor visualização da variação dos dados, as temperaturas foram apresentadas em graus Celsius.

Figura 35. Gráfico do ciclo de trigo de 2017 com as seguintes variáveis que afetam o modelo SSEBop: Temperaturas de superfície (Ts), de pixel frio (Tc), de pixel quente (Th) e ambiente (Ta), além da irrigação.



O fator que influenciou a Ts em 30 de junho foi a disponibilidade de água para troca de calor latente, pois evento de irrigação foi iniciado no pivô e atingiu a região representada com maior Ts, onde estava instalada a estação meteorológica, apenas no dia seguinte da passagem de satélite, conforme demonstra o gráfico (Figura 35). Como o trecho estava mais seco, a radiação solar que atingiu a área nesse dia foi convertida em calor sensível, proporcionando a Ts mais alta observada na Figura 27. Com isso a Ts se afastou da Tc, ficando mais próxima da Th (Figura 35), justificando a menor $ET_{rSSEBop}$ no trecho de pivô com maior Ts. O modelo SSEBop preconiza que os pixels frios apresentam evapotranspiração máxima, ao passo que os pixels quentes apresentam evapotranspiração praticamente nula.

O gráfico da Figura 35 permite verificar o momento que a cultura atinge fração evapotranspirativa – para o modelo SSEBop a ET_f equivale ao coeficiente de cultura (K_c) – igual ou superior a 1. Para a cultura bem irrigada, sem restrição de disponibilidade hídrica, isso ocorre quando a Ts se iguala ou fica inferior a Tc. No ano de 2017, isso ocorreu em 09 de agosto. Com a maturidade da cultura a ET_f volta a ser menor que 1, tendo ocorrido em 10 de setembro.

4.4.2 Resultados da $ET_{RSSEBop}$ para o ano de 2018

Calculou-se a $ET_{RSSEBop}$ para as datas de passagem de satélite durante o cultivo do trigo em 2018. A variabilidade espacial da ET_r estimada pelo modelo pode ser observada na Figura 36. A Figura 37 apresenta o gráfico dos valores de $ET_{RSSEBop}$ para o pixel da estação, bem como dos valores médio, mínimo e máximo para toda a área do pivô em cada data de passagem de satélite.

Figura 36. Imagens de $ET_{RSSEBop}$ do pivô experimental de trigo do ano de 2018.

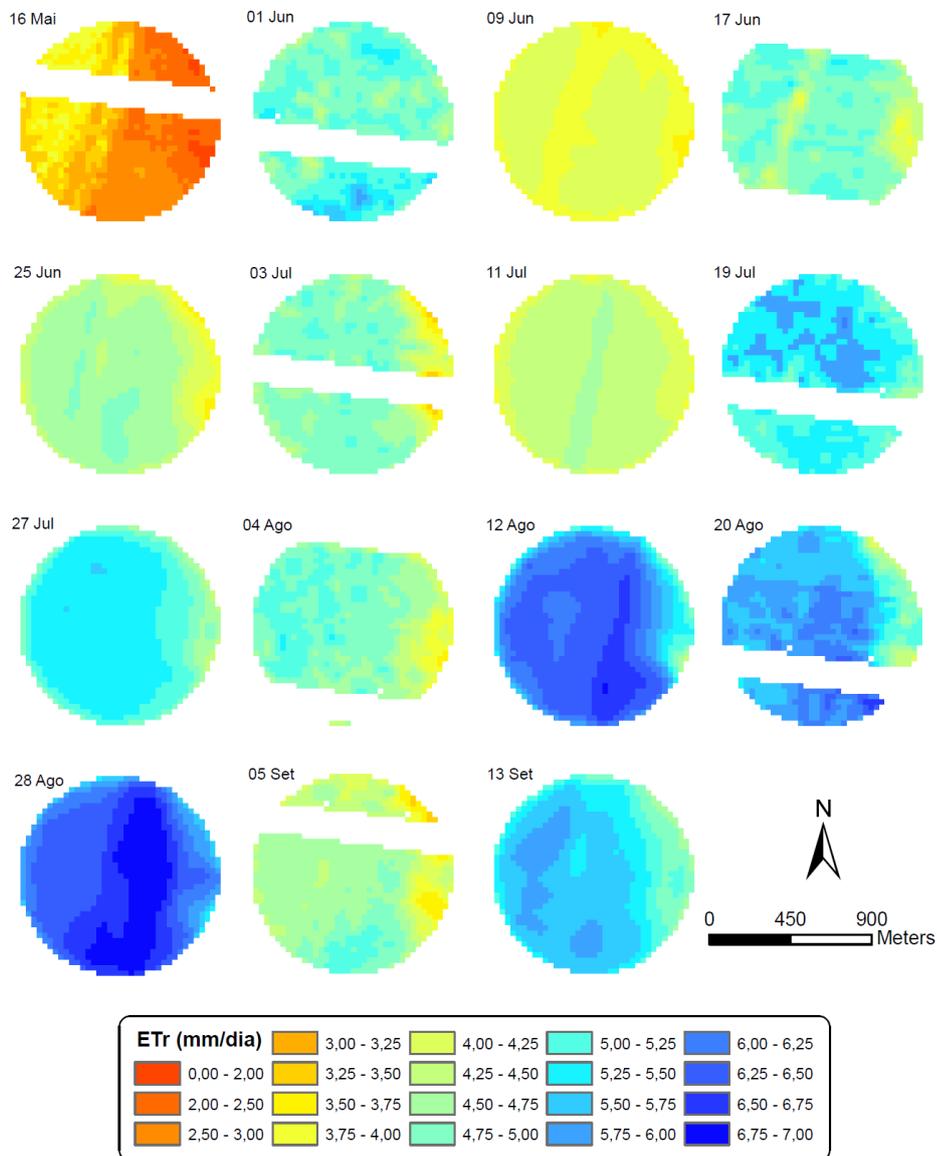
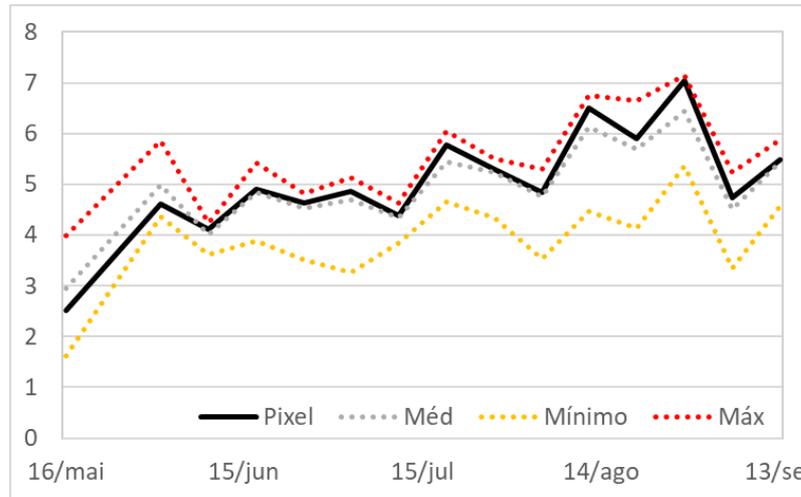


Figura 37. Gráfico dos valores de $ET_{rSSEBop}$ médio, máximo e mínimo de toda área do pivô experimental de 2018 e também do pixel da estação.

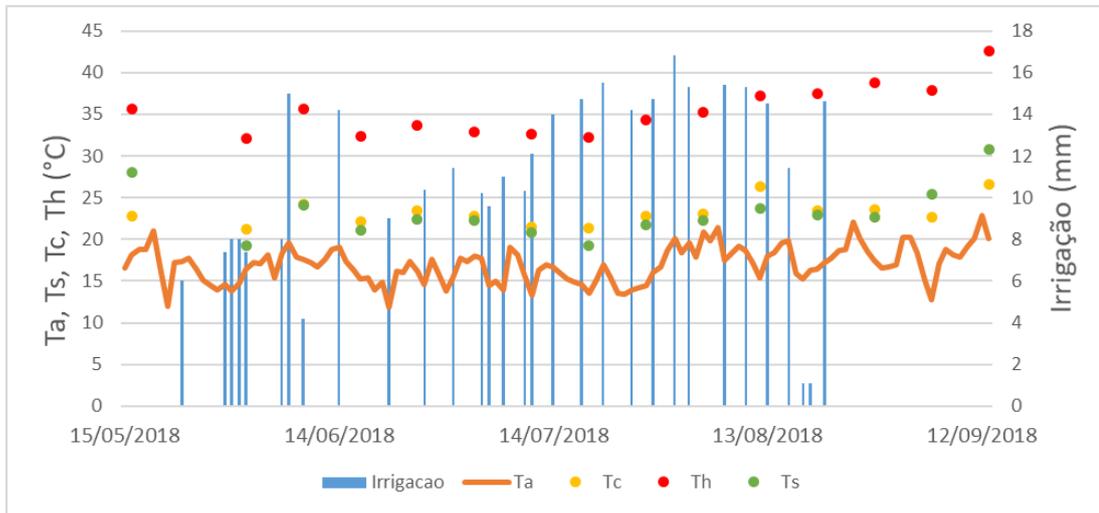


Ao contrário de 2017, o desenvolvimento da cultura do trigo em 2018 foi mais acelerado em razão do período de plantio e da densidade de plantas como já abordado no item 4.2.2.1 desta dissertação. Com isso os valores de NDVI evoluíram mais rapidamente em 2018 (Figura 23 e Figura 24) do que em 2017 (Figura 21 e Figura 22), o que proporcionou T_s mais baixas nas fases iniciais do desenvolvimento fenológico do trigo em 2018 (Figura 29 e Figura 30) do que em 2017 (Figura 27 e Figura 28), culminando em $ET_{rSSEBop}$ mais elevada comparativamente na fase inicial em 2018 (Figura 36 e Figura 37) do que em 2017 (Figura 33 e Figura 34).

Ao longo de todo o ciclo do trigo de 2018, a $ET_{rSSEBop}$ do pixel da estação esteve muito próxima do valor médio de todos os pixels da área do pivô conforme gráfico da Figura 37.

Na Figura 36, propositalmente, foi mantida a imagem referente ao dia 1 de junho para demonstrar como a presença de nuvens afeta os valores de $ET_{rSSEBop}$. Na Figura 36, é possível observar que a distribuição espacial da $ET_{rSSEBop}$ nesta data não é compatível com o estágio de desenvolvimento da cultura e que em alguns pixels - onde as nuvens eram mais densas, reduzindo ainda mais a T_s - a $ET_{rSSEBop}$ foi tão elevada quanto nos estágios de desenvolvimento em que a cultura requer mais água, chegando a valores de $ET_{rSSEBop}$ de praticamente 6 mm.d-1 (Figura 37). Por esta razão as datas de passagem de satélite que apresentaram presença de nuvens na área experimental devem ser descartadas da análise de desempenho do modelo SSEBop. No gráfico da Figura 38 ainda é possível verificar que a T_s foi inferior a T_c em 01 de junho o que indicaria uma ET_f superior a 1, incompatível com a biomassa fotossinteticamente ativa produzida até essa data pelo trigo (Figura 23 e Figura 24).

Figura 38. Gráfico do ciclo de trigo de 2018 com as seguintes variáveis que afetam o modelo SSEBop: Temperaturas de superfície (Ts), de pixel frio (Tc), de pixel quente (Th) e ambiente (Ta), além da irrigação.



Corroborando o desenvolvimento mais célere do trigo em 2018, o gráfico da Figura 38 permite concluir que ET_f já era maior do que 1 em 17 de junho, pois T_s apresentava valor inferior a T_c . Com a maturidade da cultura a ET_f volta a ser menor que 1, como esperado, em 5 de setembro.

4.4.3 Resultados da $ET_{rSSEBop}$ para o ano de 2019

Calculou-se a $ET_{rSSEBop}$ para as datas de passagem de satélite durante o cultivo do trigo em 2019. A variabilidade espacial da ET_r estimada pelo modelo pode ser observada na Figura 39. A Figura 40 apresenta o gráfico dos valores de $ET_{rSSEBop}$ para o pixel onde estava localizada a estação, bem como dos valores médio, mínimo e máximo para toda a área do pivô em cada data de passagem de satélite.

Figura 39. Imagens de $ET_{r_{SEBop}}$ do pivô experimental de trigo do ano de 2019.

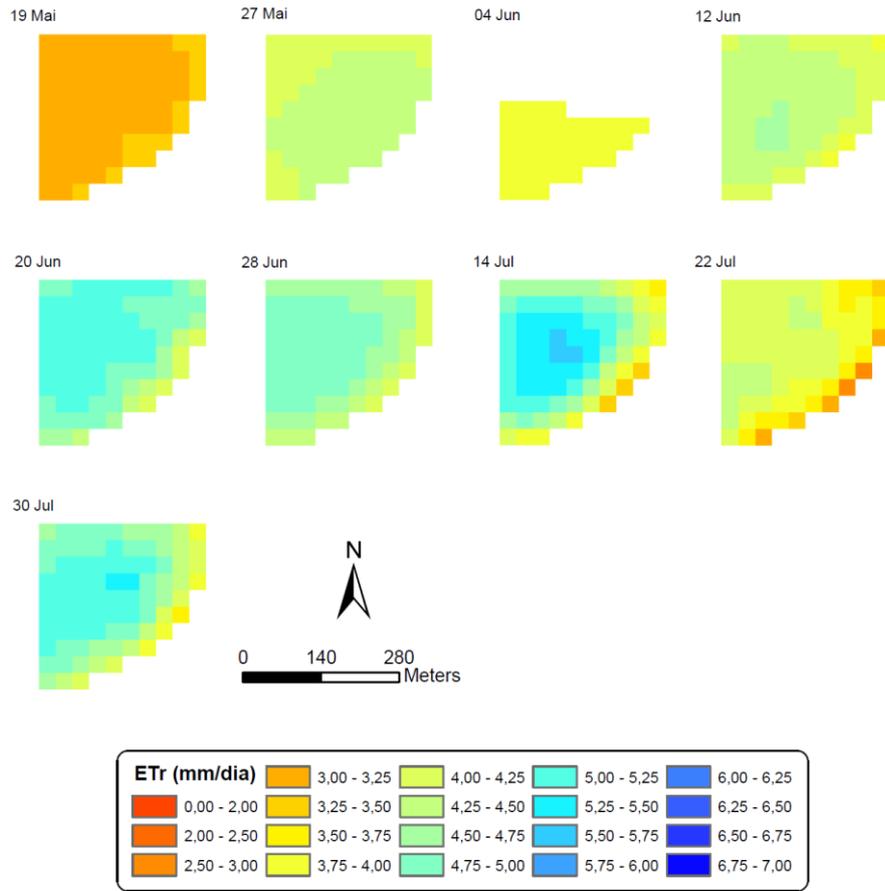
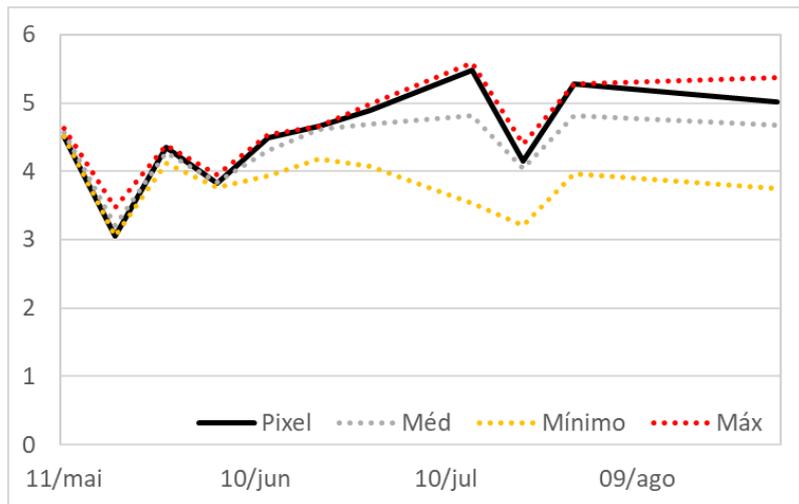


Figura 40. Gráfico dos valores de $ET_{r_{SEBop}}$ médio, máximo e mínimo de toda área do pivô experimental de 2019 e também do pixel da estação.

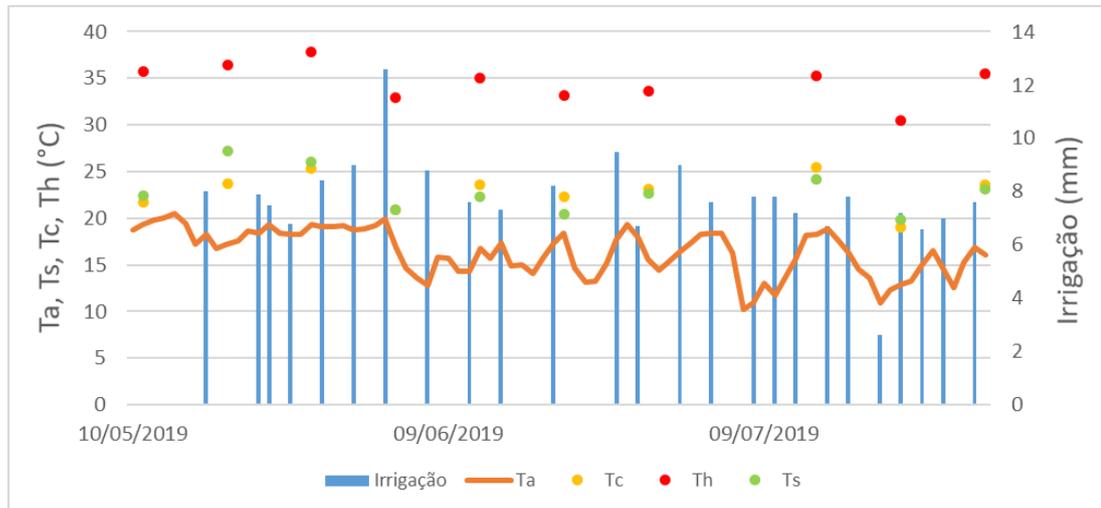


O desenvolvimento da cultura do trigo em 2019 foi semelhante ao observado em 2018. Com isso os valores de NDVI evoluíram de forma similar em 2019 (Figura 25 e Figura 26) e 2018 (Figura 23 e Figura 24). Dessa forma, em ambos os anos há T_s mais baixas e $ET_{rSSEBop}$ mais elevada nas fases iniciais do desenvolvimento fenológico do trigo do que em 2017. Entretanto há diferenças de T_s e $ET_{rSSEBop}$, se observado um mesmo estágio de desenvolvimento do trigo, entre os anos 2018 e 2019, que são esperadas devido principalmente a diferença de dias sem irrigação quando ocorrem as passagens de satélite.

Durante a maior parte do ciclo de trigo de 2019, a $ET_{rSSEBop}$ do pixel da estação esteve muito próxima do valor médio de todos os pixels da área do pivô conforme gráfico da Figura 40. As duas exceções são as datas 14 e 30 de julho, em que o valor do pixel foi praticamente igual ao valor máximo registrado no pivô. Há que se observar que em 2019 o experimento se deu em um pivô que tem a metade da área dos pivôs de 2017 e 2018 e, além disso, em 2019 só um quarto do pivô foi cultivado com trigo. Como em 2019 a área do experimento foi bem reduzida e conseqüentemente o número de pixels a serem avaliados foi muito menor em comparação aos outros anos, há que se considerar que o efeito de borda se tornou relevante em 2019 para o cálculo da média. Esse efeito de borda seria o fato de estar mais exposto ao vento e possivelmente receber menos irrigação. Assim, nota-se na Figura 39 que, a medida que o trigo se desenvolveu, a diferença de $ET_{rSSEBop}$ entre a borda e a zona central se tornou mais relevante, fazendo com que o valor da média se afastasse do valor máximo (Figura 40) e como o pixel da estação se situava na zona central é compreensível que nas datas mencionadas o valor do pixel tenha ficado mais próximo do valor máximo.

Na data de 22 de julho não foi tão relevante esse fator da borda, pois como já havia alguns dias sem irrigação (em período de alta demanda evapotranspirativa da atmosfera) a $ET_{rSSEBop}$ estava reduzida em todos os pixels fazendo com que os valores da média, do valor máximo e do pixel da estação se aproximassem (Figura 40). Embora o gráfico da Figura 41 aponte irrigação para o dia 22, os registros da estação demonstram que ela foi realizada após o horário de passagem do satélite não influenciando no resultado da $ET_{rSSEBop}$, tanto que por ser uma data em que o NDVI estava próximo de 0,8 (Figura 25 e Figura 26) era de se esperar que ET_f fosse maior que 1 como foi observado na data anterior, 14 de julho, e posterior, 30 de julho, mas pela Figura 41 é possível observar que em 22 de julho T_s foi superior a T_c , evidenciando ET_f menor do que 1. Certamente em 22 de julho a disponibilidade hídrica para o trigo não era a ideal e limitou a ET_r da cultura.

Figura 41. Gráfico do ciclo de trigo de 2019 com as seguintes variáveis que afetam o modelo SSEBop: Temperaturas de superfície (Ts), de pixel frio (Tc), de pixel quente (Th) e ambiente (Ta), além da irrigação.



4.5. Avaliação de desempenho do modelo SSEBop

Os valores de $ET_{rSSEBop}$ obtidos para as datas de passagem de satélite foram avaliados em função da ET_{rRB} calculada por meio dos dados coletados pela estação meteorológica instalada no interior do pivô em estudo. Os indicadores de desempenho estão apresentados nas Figura 42, Figura 43, Figura 44 e Figura 45 e na Tabela 6.

Figura 42. Evapotranspiração real estimada pelo modelo SSEBop (ETr_{SSEBop}) em função da evapotranspiração real calculada pelo método da razão de Bowen (ETr_{RB}) para a cultura do trigo em 2017.

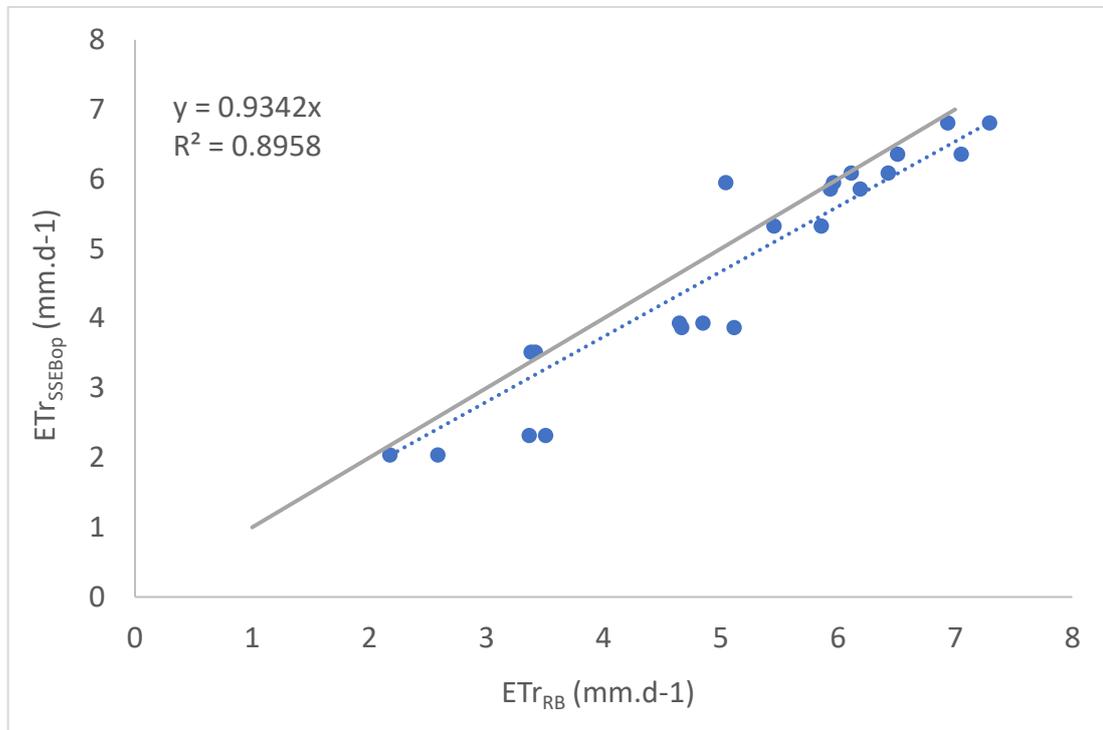


Figura 43. Evapotranspiração real estimada pelo modelo SSEBop (ETr_{SSEBop}) em função da evapotranspiração real calculada pelo método da razão de Bowen (ETr_{RB}) para a cultura do trigo em 2018.

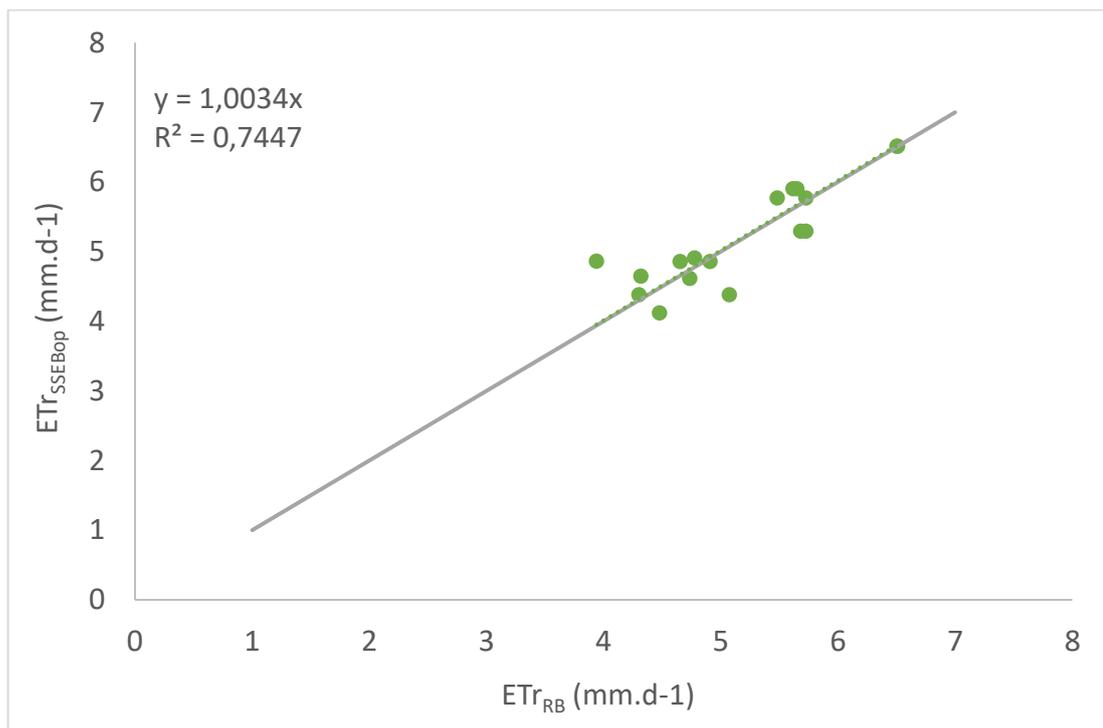


Figura 44. Evapotranspiração real estimada pelo modelo SSEBop ($ET_{r_{SSEBop}}$) em função da evapotranspiração real calculada pelo método da razão de Bowen ($ET_{r_{RB}}$) para a cultura do trigo em 2019.

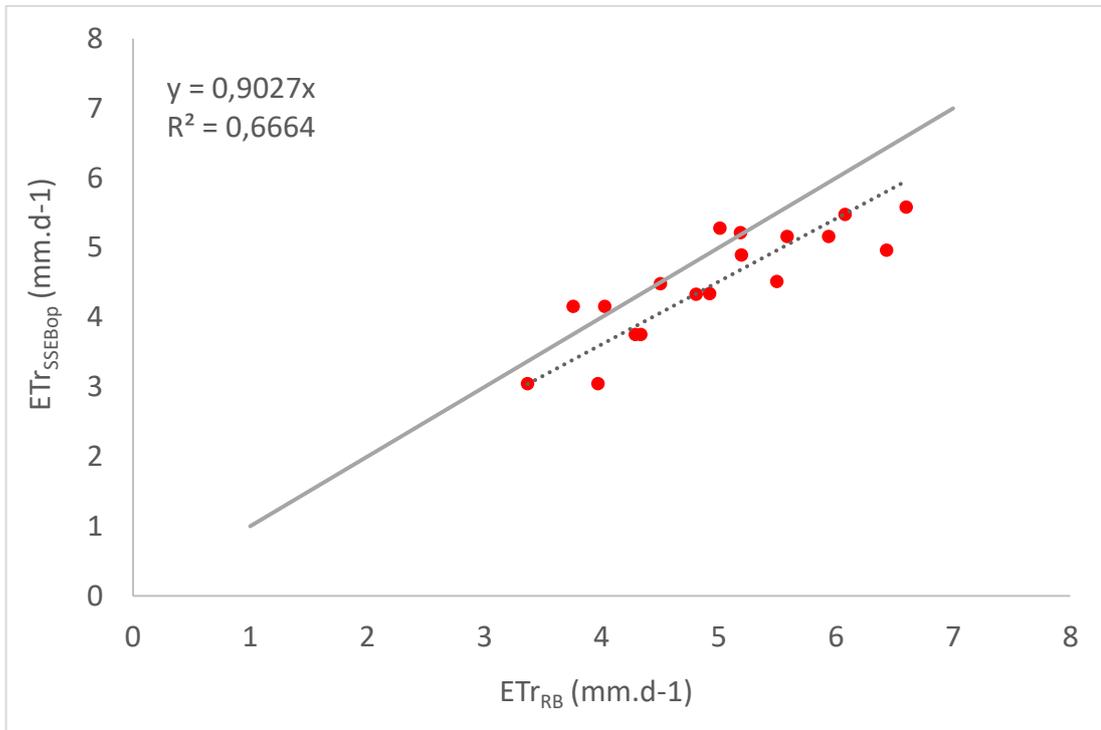


Figura 45. Evapotranspiração real estimada pelo modelo SSEBop ($ET_{r_{SSEBop}}$) em função da evapotranspiração real calculada pelo método da razão de Bowen ($ET_{r_{RB}}$) para a cultura do trigo nos anos de 2017, 2018 e 2019.

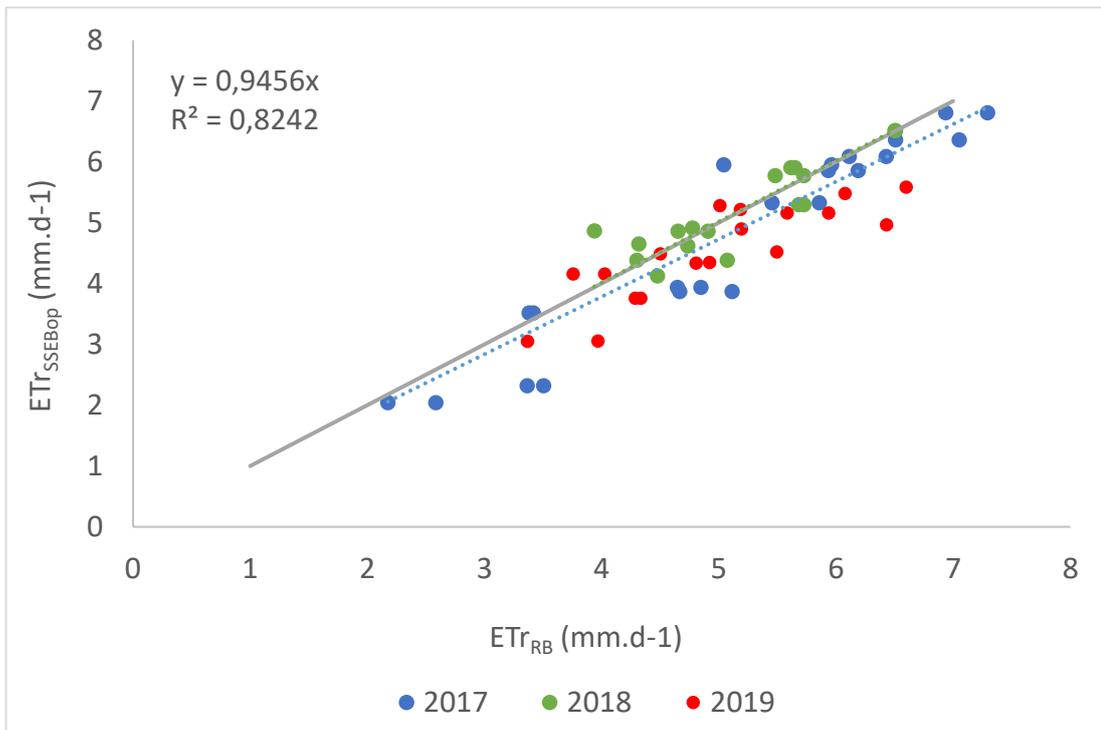


Tabela 6. Indicadores de desempenho calculados para análise do modelo SSEBop.

	2017	2018	2019	Todos
R ²	0,89	0,74	0,66	0,82
RMSE	0,37	0,28	0,35	0,16
pRMSE	7,41	5,55	7,05	3,27
BIAS	-0,37	0,03	-0,45	-0,06
pBIAS	-7,42	0,63	-9,21	-5,53
E	0,82	0,76	0,44	0,73

A análise de desempenho para o ano de 2017 apresentou R² (0,89) e E (0,82) com bom desempenho. O RMSE foi de 0,37 ou 7,41% e também teve bom desempenho. Em média o modelo subestimou a ETr em 0,37 mm.d⁻¹, ou -7,41%.

A análise de desempenho para o ano de 2018 apresentou R² (0,74) e E (0,76) com bom desempenho. O RMSE foi de 0,28 ou 5,55% e também teve bom desempenho. Em média o modelo superestimou a ETr em 0,03 mm.d⁻¹, ou 0,63%.

A análise de desempenho para o ano de 2019 apresentou R² (0,66) e E (0,44) com satisfatório desempenho. O RMSE foi de 0,35 ou 7,05% e teve bom desempenho. Em média o modelo subestimou a ETr em 0,45 mm.d⁻¹, ou -9,21%.

A análise de desempenho para todos os anos em conjunto (2017, 2018 e 2019) apresentou R² (0,82) e E (0,73) com bom desempenho. O RMSE foi de 0,16 ou 3,27% e também teve bom desempenho. Em média o modelo subestimou a ETr em 0,06 mm.d⁻¹, ou -5,53%.

Paula e colaboradores (2019) estimaram a evapotranspiração do feijão e da soja com o modelo SSEBop na região centro oeste do Brasil e validaram com estimativa da evapotranspiração pelo método da razão de Bowen nos anos de 2015 e 2016, encontrando R² de 0,88 e superestimativa do modelo SSEBop de 0,62mm.d⁻¹. Na mesma região, Lopes e colaboradores (2019) estimaram a evapotranspiração do trigo com o modelo SSEBop e validaram com estimativa da evapotranspiração pelo método da razão de Bowen no ano de 2017, encontrando R² de 0,82; E de 0,67 e superestimativa do modelo SSEBop de 0,89mm.d⁻¹.

4.6. Avaliação de desempenho do modelo SSEBop diário

Os valores da ETf obtidos no modelo SSEBop de todos os anos (2017, 2018 e 2019) foram interpolados e multiplicados pela ETo para obter uma ET_{SSEBop} diária que foi avaliada em função da ET_{RB} calculada por meio dos dados coletados pela estação meteorológica instalada no interior do pivô em estudo. Os indicadores de desempenho estão apresentados na Figura 46 e na Tabela 7.

Figura 46. Evapotranspiração real diária estimada pelo modelo SSEBop para todos os anos do experimento (2017, 2018 e 2019) - com interpolação da ETf multiplicada pela ETo - em função da evapotranspiração real diária calculada pelo método da razão de Bowen (ET_{RB}) para a cultura do trigo nos anos de 2017, 2018 e 2019.

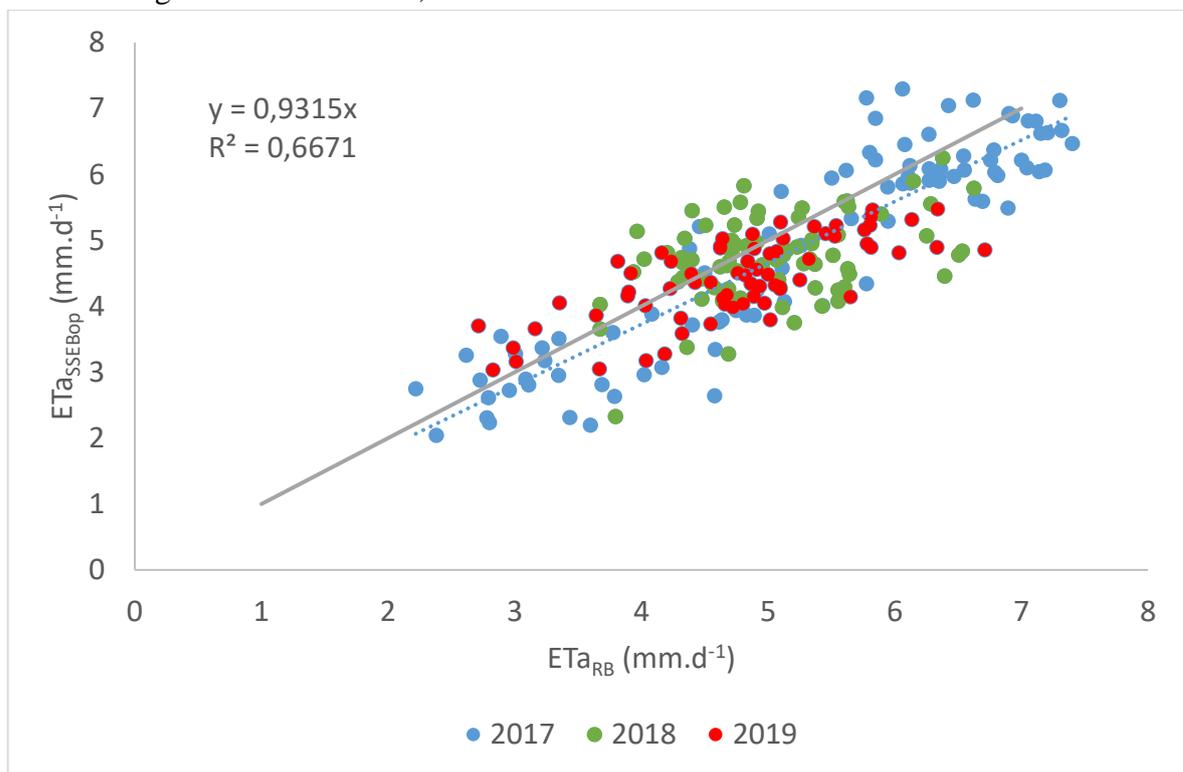


Tabela 7. Indicadores de desempenho calculados para análise do modelo SSEBop diário.

SSEBop Diário	
R ²	0,66
RMSE	0,28
pRMSE	5,64
Bias	-0,31
pBias	-6,25
E	0,58

A análise de desempenho do SSEBop diário para todos os anos em conjunto (2017, 2018 e 2019) apresentou R² (0,66) e E (0,58) com satisfatório desempenho. O RMSE foi de 0,28 ou 5,64% e teve bom desempenho. Em média o modelo subestimou a ETr em 0,31 mm.d⁻¹, ou - 6,25%.

Com os dados diários de ETr_{SSEBop} foi possível calcular o acumulado de evapotranspiração durante o período de cada experimento tanto pelo modelo SSEBop quanto pela razão de Bowen (Tabela 8).

Tabela 8. Acumulado de ETr_{RB} e ETr_{SSEBop} para o período em que a estação agrometeorológica ficou no campo coletando os dados necessários para o cálculo da razão de Bowen.

	ETr _{RB} (mm)	ETr _{SSEBop} (mm)
2017	502,41	465,4
2018	448,42	451,52
2019	328,42*	325,24
Somatório	1279,25	1242,16

*Conforme a Tabela 1 o período que a estação meteorológica coletou dados em 2019 foi de 17/05 a 30/08 e neste período a ETr_{RB} acumulada foi de 506,5mm, no entanto não houve imagens de satélite livre de nuvens na área de estudo no mês de agosto, então o valor acumulado de ETr_{RB} apresentado na Tabela 8 se refere ao período de 17/05 a 30/07, data da última imagem de satélite utilizada na ETr_{SSEBop}.

O ano de 2018 foi o que apresentou a menor diferença entre os acumulados de ETr_{RB} e ETr_{SSEBop} de apenas 3,1 mm a mais de ETr para o modelo SSEBop, enquanto que 2017 foi o ano que apresentou a maior diferença entre os acumulados de ETr_{RB} e ETr_{SSEBop}, totalizando 37,01mm a mais de ETr para o método da razão de Bowen.

Luchiari Jr. et al. (1997) avaliaram a demanda hídrica do trigo pelo método da razão de bowen e estimaram o total de evapotranspiração de 345mm e 385mm em dois ciclos da cultura. Já Kang et al. (2003) encontraram valor de 443,6mm de evapotranspiração acumulada ao longo do ciclo do trigo em uma região semiárida do noroeste chinês.

Senay e colaboradores (2016) utilizaram o modelo SSEBop para mapear a evapotranspiração na bacia do rio Colorado nos Estados Unidos. A validação foi feita por meio de duas torres de fluxo de eddy covariance e balanço hídrico do solo, apresentando boa acurácia com R^2 variando de 0,74 a 0,95 e coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe variando de 0,66 a 0,91. A raiz do erro médio quadrático (e bias percentual) variou de 0,48mm (13%) a 0,6mm (22%) para os dias de passagem do satélite e de 7,75mm (2%) a 13,04mm (35%) para evapotranspiração diária acumulada mensalmente. No experimento de Senay e colaboradores (2016) foi avaliada a evapotranspiração da cultura do trigo, dentre outras culturas, e foi observada evapotranspiração acumulada de 384mm para o ciclo do trigo.

5. CONCLUSÕES

Os resultados alcançados neste experimento, com uma série de três anos (2017, 2018, 2019) de dados, demonstram que o modelo SSEBop consegue estimar bem a evapotranspiração da cultura do trigo na região do cerrado brasileiro, conforme validação realizada com base na evapotranspiração obtida pelo método da razão de Bowen ($R^2 = 0,82$ e $E = 0,73$). O modelo SSEBop subestimou a evapotranspiração, em média, em 5,53% em todo o período do experimento.

O desempenho do modelo SSEBop na estimativa da evapotranspiração real diária da cultura do trigo na região do cerrado nos 3 anos de experimento (2017, 2018, 2019) foi considerado satisfatório ($R^2 = 0,66$ e $E = 0,58$). O modelo subestimou a evapotranspiração, em média, em 6,25%.

A evapotranspiração real da cultura do trigo para o período total dos 3 anos que a estação meteorológica esteve coletando dados no interior do pivô central calculada pelo método da razão de Bowen foi de 1279mm, enquanto para o mesmo período o modelo SSEBop estimou a evapotranspiração real de 1242mm.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desempenho do modelo SSEBop sugere que é uma boa ferramenta para estimar a evapotranspiração, podendo ser aplicado no auxílio do manejo de culturas agrícolas e também na gestão de recursos hídricos, principalmente se for aplicado no nível de bacia hidrográfica.

O ano de 2019 mostrou que o modelo SSEBop apresenta limitação em relação a cobertura de nuvens no momento da passagem de satélites. No mês de agosto de 2019 não houve imagens livre de nuvens na área de estudo, comprometendo a análise nesse mês, além de datas perdidas em outros meses neste ano. Dessa forma a cobertura de nuvens reduziu o número de datas em que a evapotranspiração pode ser avaliada em 2019, o que comprometeria o uso do modelo no manejo da cultura do trigo ou na gestão de recursos hídricos. Esse menor número de amostras provavelmente foi decisivo para que nesse ano o modelo SSEBop tivesse o pior desempenho comparativamente com os outros anos.

Uma alternativa para evitar a limitação das nuvens é o uso de veículos aéreos não tripulados - VANTs (ou drones como são mais popularmente conhecidos) transportando sensores multiespectral e termal a fim de substituir ou complementar os satélites. Como os VANTs voam abaixo das nuvens e não tem limitação de resolução temporal são uma boa alternativa para o problema da cobertura de nuvens, possuindo grande potencial de aplicação no auxílio do manejo de culturas agrícolas. Contudo a aplicação a nível de bacia hidrográfica para gestão de recursos hídricos não seria recomendada, pois cobrir grandes áreas com os VANTs demandaria muito tempo e se tornaria oneroso.

7. REFERÊNCIAS

- ABITRIGO – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIA DE TRIGO. **Trigo no Brasil**. Disponível em: < <http://www.abitrigo.com.br/conhecimento-trigo.php> >. Acesso em: 30 abr. 2019.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017**: relatório pleno. Agência Nacional de Águas. Brasília, 2017a.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada**. Brasília, 2017b.
- ALBRECHT, J. C., VIEIRA, E. A., SÓ, M., DE ANDRADE, J. M. V., SCHEEREN; P. L. DA GLÓRIA TRINDADE. Adaptabilidade e estabilidade de genótipos de trigo irrigado no Cerrado do Brasil Central. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 12, p. 1727-1734, 2007.
- ALLEN, R.G. Assessing integrity of weather data for use in reference evapotranspiration estimation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE. 122(2):97-106, 1996.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - **FAO Irrigation and drainage paper 56**. Rome-Italy, 1998.
- ALLEN, R. G.; PRUITT, W. O. Rational use of the FAO Blaney-Criddle formula. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. v. 112, n. 2, p. 139-155, 1986.
- 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.
- 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, n. 6, p. 899-920, 2011.
- ALLEN, R. G., IRMAK, A.; TREZZA, R.; HENDRICKX, J. M. H.; BASTIAANSEN, W.; KJAERGAARD, J. Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC. **Hydrological Processes**, v. 25, n. 26, p. 4011–4027, 2011b.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M. Modeling monthly mean air temperature for Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 113, p. 407-427, 2013.
- ANDRADE, R. G; TEIXEIRA, A. H. DE C; SANO, E. E.; LEIVAS, J. F.; VICTORIA, D. C.; NOGUEIRA, S. F. Evapotranspiração em pastagens com indicativos de degradação na bacia hidrográfica do Alto Tocantins. In INOVAGRI INTERNATIONAL MEETING. **Anais...** Fortaleza: INOVAGRI, 2014.

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

BASTIAANSEN, W. G. M. et al. SEBAL Model with Remotely Sensed Data to Improve Water-Resources Management under Actual Field Conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 131, n. 1, p. 85–93, 2005.

BEZERRA, M. V. C.; SILVA, B. B. da.; BEZERRA, B. B. Avaliação dos efeitos atmosféricos no albedo e NDVI obtidos com imagens de satélite. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n. 7, p. 709-717, 2011.

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

CAMPBELL, J.B. & WYNNE, R.H. **Introduction to remote sensing**. 5ª Edição. New York: Guilford Press, 667p., 2011.

CHANG, J. **Climate and agriculture**: An ecological survey. Chicago: Aldine Publishing Company, 304p., 1968.

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.

CHURCH, T. M. An underground route for the water cycle, **Nature**, 380(6575), 579–580, 1996.

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.

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

CRUZ, R. S.; KOBLITZ, M. G. B. Grãos, cereais e leguminosas. In: KOBLITZ, M. G. B. (Ed.) **Matérias-primas alimentícias: composição e controle de qualidade**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2011. p. 44-120.

DA SILVA, FABIANA MOTA. **Desempenho de genótipos de trigo em condições edafoclimáticas distintas do estado de São Paulo**. Dissertação de Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical. Instituto Agrônomo, Campinas–SP, 2011.

DAI, A.; QIAN, T.; TRENBERTH, K. E.; MILLIMAN, J. D. Changes in continental freshwater discharge from 1948 to 2004, **Journal of Climate**, 22(10), 2773–2792, 2009.

DIAS, S. de F. B. **Alternativas de Desenvolvimento dos Cerrados: Manejo e Conservação dos Recursos Naturais Renováveis**. Brasília: Fundação Pró-Natureza, 1996.

DOORENBO, J.; PRUITT, W. O. Crop water requirement's: Revised, Roma: FAO, 1975. 144 p. **Irrigation and Drainage Paper**, 24.

DROOGERS, P.; BASTIAANSEN, W. Irrigation performance using hydrological and remote sensing modeling. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.128, p. 11-18, 2002.

EIPHANIO, J.C.N.; FORMAGGIO, A.R. Abordagens de uso de número digital e de reflectância em sensoriamento remoto com dados de satélites. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 5., Natal, 1988. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1988. p.400-405.

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.

FARAHANI, H. J.; BAUSCH, W. C. Performance of evapotranspiration models for maize - bare soil to closed canopy. *Transactions of the ASAE* 38(4):1049-1059, 1995.

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.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **AQUASTAT Main Database**, 2016. Disponível em: <<http://www.fao.org/nr/water/aquastat/irrigationmap>>. Acesso em: 05 nov. 2019. FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A.; BERGAMASCHI, H. Balanço de energia em soja irrigada e não irrigada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.3, n.26, p.403-10, 1991.

FRENKEN, K.; GILLET, V. **Irrigation water requirement and water withdrawal by country**. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. Rome: FAO, p.263, 2012. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-bc824e.pdf>>. Acesso em: 18 mar. 2019.

FRIZZONE, J., ZANINI, J., PEREIRA, G., & RETTORE, P. Efeito da frequência e da lâmina de irrigação na produção de trigo (*Triticum aestivum* L.); Effect of frequency and depth irrigation on the yield of wheat (*Triticum aestivum* L.). **Ciência e Prática**. Lavras, v.9, p. 198-207, 1985.

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

GOMIDE, R. L. Monitoramento para manejo de irrigação: instrumentação, automação e métodos. In: FARIA, M. A., et al. Manejo de irrigação. Lavras: UFLA: SBEA, 1998. p. 133-238.

GONSAGA, L.; ALVES, G. F.; LISMAR, W.; CASTRO, P. Evapotranspiração de Referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 3, p. 456–465, 2011.

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

HORST, T. W.; WEIL, J. C. Footprint estimation for scalar flux measurements in the atmospheric surface layer. **Bound. Layer Meteorol.** 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.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agropecuário 2006**. Rio de Janeiro, 2009.

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

JAMES, L. G. **Principles of farm irrigation system design**. New York: John Wiley & Sons, 1988, 543 p.

JENSEN, M. E. Water consumption by agricultural plants. **Water deficits and plant growth**, vol. 2, Chapter 1, Kozlowski TT (ed). Academic Press: Salt Lake City, Utah, 1–22 pp, 1968. Disponível em: < <https://eprints.nwisrl.ars.usda.gov/742/1/92.pdf> >.

JENSEN, M. E.; BURMAN, R. D. ALLEN, R. G. Evapotranspiration and irrigation water requirements. New York: **American Society of Civil Engineers**, 329 p., 1989.

JIA, L.; SU, Z.; HURK, B. V. D.; MENENTI, M.; MOENE, A.; BRUIN, H. A. R.; YRISARRY, J. J. B.; IBANEZ, M.; CUESTA, A. Estimation of sensible heat flux using the Surface Energy Balance System (SEBS) and ATSR measurements. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 28, n. 1, p. 75-88, 2003.

KANG, S.; GU, B.; DU, T.; ZHANG, J. Crop coefficient and ratio of transpiration to evapotranspiration of winter wheat and maize in a semi-humid region. **Agricultural Water Management**. v. 59, 3, p. 239-254, 2003.

KITE, G. W.; DROOGERS, P. Comparing evapotranspiration estimates from satellites, hydrological models and field data. **Journal of Hydrology**. v. 229, p. 3-18, 2000.

LIMA, J. R. de. S.; OLIVEIRA, C. L. de.; BARBOSA, A. da. C.; ANTONINO, A. C. D.; SOUZA, E. S. de. Variação sazonal dos fluxos de energia e evapotranspiração em caatinga no agreste pernambucano. **Agrometeoros**, Passo Fundo- RS, v.25, n.1, p. 113-120, 2017.

LIMA, U. A. **Matérias-primas dos alimentos**. São Paulo: Blucher, 2010. 402 p.

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

LIOU, Y.A.; KAR, S.K. Evapotranspiration estimation with remote sensing and various surface energy balance algorithms – A Review. **Energies**, v. 7, p. 2821-2849, 2014.

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.

LUCHIARI JR., A.; RIHA, S. J.; GOMIDE, R.L. Energy balance in irrigated wheat in the cerrados region of Central Brazil. **Sci. agric. (Piracicaba, Braz.)**, Piracicaba, v. 54, n. spe, p. 78-88, jun.1997.

MACHADO, R. E. **Desenvolvimento e utilização de um lisímetro para determinação da evapotranspiração de referência**. 1996. 93 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil-Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

MACHADO. C. C.; SILVA, B. B. da.; ALBUQUERQUE, M. B. de.; GALVÍNIO, 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.

MALEK, E., BINGHAM, G. E.; MCCURDY, G. D. Continuous measurement of aerodynamic and alfalfa canopy resistances using the Bowen ratio-energy balance and Penman-Monteith methods. **Boundary-Layer Meteorology** 59:187-194, 1992.

MCSHANE, R.R.; DRISCOLL, K.P.; SANDO. R. A Review of Surface Energy Balance Models for Estimating Actual Evapotranspiration with Remote Sensing at High Spatiotemporal Resolution over Large Extents. **U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report** 2017–5087, 19 p., 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.3133/sir20175087>>.

MEDEIROS, P. V. **Análise da evapotranspiração de referência a partir de medidas lisimétricas e ajuste estatístico de estimativas de nove equações empírico-teóricas com base na equação de Penman-Monteith**. 2008. 241 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia

Civil- Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

MINACAPILLI, M.; AGNESE, C.; CAMMALLERI, C.; CIRAIOLO, G.; D'URSO, G.; IOVINO, M.; PUMO, P.; PROVENZANO, G.; RALLO, G. Estimation of actual evapotranspiration of Mediterranean perennial crops by means of remote-sensing based surface energy balance models. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 13, n. 7, p. 1061–1074, 2009.

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

MOORE, D. S. **The Basic Practice of Statistics**. 4. ed. W. H. Freeman, 2006. 728 p.

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

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>.

NORMAN, J.; KUSTAS, W.; HUMES, K. 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.

OKI, T.; KANAE, S. Global hydrological cycles and world water resources. **Science**, 313(5790), 1068–1072, 2006. 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.

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.

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, e00739, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2019.v54.00739>, 2019.

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.

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of the Royal Society of London**. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 193, Nº 1032, pp. 120-145, 1948.

PEREIRA, A. B.; VILLA NOVA, N. A.; PIRES, L. F.; ANGELOCCI, L. R.; BERUSKI, G. C. Estimation method of grass net radiation on the determination of potential evapotranspiration. **Meteorological Applications**, v. 21, p. 369-375, 2014.

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.

REYES-GONZÁLEZ A., KJAERGAARD J., TROOIJEN T., HAY C., AHIABLAME L. Estimation of Crop Evapotranspiration Using Satellite Remote Sensing-Based Vegetation Index. **Advances in Meteorology**, vol. 2018, Article ID 4525021, 12 pages, 2018. RIBEIRO JÚNIOR, W. Q.; RAMOS, M. L. G.; AMÁBILE, R. F.; FERRAZ, D. M. M.; CARVALHO, A. M. de; CARVALHO, J. G.; ALBRECHT, J. C.; SÓ E SILVA, M.; GUERRA, A. F. **Efeito da fertirrigação nitrogenada no rendimento de grãos de genótipos de trigo, no cerrado**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2007. 17 p.

ROERINK, G.; SU, Z.; MENENTI, M. A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. **Physics and Chemistry of the Earth (B)**, v.25, n.2, p.147-157, 2000.

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.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with Third ERTS. **ERTS Symposium**, NASA, n. SP-351, p. 309-317, 1973.

RUBERT, GISELE CRISTINA DOTTO. **Estudo do balanço de energia em um cultivo de trigo no sul do Brasil**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia. Universidade Federal de Santa Maria, UFSM. Rio Grande do Sul, 2013.

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

SENAY, G. B.; 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.; 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.; 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.
- SILVA, B. B. da.; BRAGA, A. C.; BRAGA, C. C.; OLIVEIRA, L. M. M. de.; GALVÍNIO, J. D.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Evapotranspiração e estimativa da água consumida em perímetro irrigado do Semiárido brasileiro por sensoriamento remoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 9, p. 1218-1226, 2012.
- SILVA, D. B. da.; GUERRA, A. F.; REIN, T. A.; ANJOS, J. R. N.; ALVES, R. T.; RODRIGUES, G. C.; SILVA, I. A. C. **Trigo para o abastecimento familiar**: do plantio à mesa. Brasília: EMBRAPA-SPI, Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1996. 176p.
- SILVA, L. D. B. da.; LYRA, G. B.; SILVA, J. B. G.; PINHO, C. F. de.; NASCENTES, A. L.; ALMEIDA, G. V. de.; FOLEGATTI, M. V. Desempenho do método do balanço de energia-Razão de Bowen na estimativa da evapotranspiração de referência. **Revista Irriga**, Botucatu-SP, v.21, n.3, p. 516-529, 2016.
- SILVA, L. D. B.; 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, T. J. A.; FOLEGATTI, M. V.; SILVA, C. R.; JÚNIOR, J. A.; BONFIM-SILVA, E. M.. Balanço de energia e estimativa da evapotranspiração em culturas irrigadas de maracujazeiro pelo método da razão de Bowen. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal-SP, v.27, n.2, p. 392-403, 2007.
- SINGH, A. Conjunctive use of water resources for sustainable irrigated agriculture. **Journal of Hydrology**, v. 519, p. 1688-1697, 2014.
- SINGH, R. K.; SENAY, G. B. Comparison of four different energy balance models for estimating evapotranspiration in the Midwestern United States. **Water**, v. 8, n. 9, p. 1-19, 2016.
- SOBRINO, J. A.; JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C.; PAOLINI, L. Land surface temperature retrieval from 20 LANDSAT TM 5, **Remote Sens. Environ.**, 90, p. 434-440, 2004.
- STANNARD, D. I. A theoretically based determination of Bowen ratio fetch requirements. **Bound. Layer Meteorol.** 83, 375-406, 1997.
- SUYKER, A. E.; VERMA, S. B. Interannual water vapor and energy exchange in an irrigated maize-based agroecosystem. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, p. 417-427, 2008.

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 irrigômetro no município de Guanambi-BA. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 23, n. 3, p. 251-260, 2015.

TAKEITI, C. Y. **Trigo**. Brasília: Agência Embrapa de Informação Tecnológica, 2015. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/tecnologia_de_alimentos/arvore/CONT000girlwnqt02wx5ok05vadr1qrnof0m.html>. Acesso em: 20 jul. 2019.

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. de C.; LEIVAS, J. F.; HERNANDEZ, F. B. T.; FRANCO, R. A. M. Large-scale radiation and energy balances with Landsat 8 images and agrometeorological data in the Brazilian semiarid region. **Journal of applied remote sensing**, v. 11, p. 016030, 2017.

TODD, R.W.; EVETT, S.R.; HOWELL, T.A. Latent heat flux of irrigated alfalfa measured by weighing lysimeter and Bowen ratio-energy balance. Paper 982119, **Am. Soc. Agr. Engrs.**, St. Joseph, MI, USA, 1998.

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

TRENBERTH, K. E.; ET AL. Observations: Surface and atmospheric climate change, in *Climate Change 2007: The Physical Science Basis—Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by S. Solomon et al., pp. 236–247, **Cambridge Univ. Press, Cambridge**, U. K, 2007. TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 2. Ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do SUL/ ABRH, 2001. 952 p.

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**, Lincoln, v. 12, n. 2, p. 173-189, 2007.

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

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.

WARREN, M. S.; TEIXEIRA, A. H. DE. C.; RODRIGUES, L. N.; HERNANDEZ, F. B. T. Utilização do Sensoriamento Remoto Termal na Gestão de Recursos Hídricos. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 07, n. 01, p. 065–082, 2014.

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

YANG, Y.; LONG, D.; SHANG, S. Remote estimation of terrestrial evapotranspiration without using meteorological data. **Geophysical Research Letters**, v. 40, n. 12, p. 3026–3030, 2013.