



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UNB  
FACULDADE DE AGRONOMIA E VETERINÁRIA  
GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

LETICIA HARUMI KAYA

**COMPARAÇÃO DE MODELOS PARA ESTIMATIVA DA  
EVAPOTRANSPIRAÇÃO POR SENSORIAMENTO REMOTO NA BACIA DO  
RIO JARDIM - DF**

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Marina Rolim Bilich Neumann  
Coorientadores: Dr. Morris Scherer Warren e Juliana Dias Lopes

Brasília - DF

2019

**LETICIA HARUMI KAYA**

**COMPARAÇÃO DE MODELOS PARA ESTIMATIVA DA  
EVAPOTRANSPIRAÇÃO POR SENSORIAMENTO REMOTO NA BACIA DO  
RIO JARDIM - DF**

Monografia apresentada à Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília, como parte das exigências do curso de Graduação em Agronomia, para a obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

Orientador: Prof.<sup>a</sup> Marina Rolim Bilich Neumann.

Coorientadores: Dr. Morris Scherer Warren e Juliana Dias Lopes.

**Brasília, DF**

**2019**

## FICHA CATALOGRÁFICA

Kc. Kaya, Leticia Harumi  
COMPARAÇÃO DE MODELOS PARA ESTIMATIVA DA  
EVAPOTRANSPIRAÇÃO POR SENSORIAMENTO REMOTO, NA BACIA DO RIO  
JARDIM - DF / Leticia Harumi Kaya; orientador Marina Rolim  
Bilich Neumann; co-orientador Juliana Dias Lopes. --  
Brasília, 2019.  
59 p.

Monografia (Graduação - Agronomia) -- Universidade de  
Brasília, 2019.

1. Evapotranspiração. 2. Trigo. 3. SSEBop. 4. SEBAL. 5.  
Kc-NDVI. I. Neumann, Marina Rolim Bilich, orient. II.  
Lopes, Juliana Dias, co-orient. III. Título.

### Cessão de direitos

NOME DA AUTORA: Leticia Harumi Kaya

**TÍTULO: COMPARAÇÃO DE MODELOS PARA ESTIMATIVA DA  
EVAPOTRANSPIRAÇÃO POR SENSORIAMENTO REMOTO NA BACIA DO  
RIO JARDIM - DF**

É concedida a Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desse relatório e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva-se a outros direitos de publicação e nenhuma parte desse relatório pode ser reproduzida sem a autorização por escrita do autor.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA

COMPARAÇÃO DE MODELOS PARA ESTIMATIVA DA  
EVAPOTRANSPIRAÇÃO POR SENSORIAMENTO REMOTO  
NA BACIA DO RIO JARDIM – DF

LETICIA HARUMI KAYA

MATRÍCULA: 15/0015216

MONOGRAFIA SUBMETIDA À FACULDADE DE AGRONOMIA E  
MEDICINA VETERINÁRIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À  
OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM AGRONOMIA

APROVADA POR:

*Marina R. B. Neumann*

---

Profª Marina Rolim Bilich Neumann

Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária – FAV

*Selma Regina Maggiotto*

---

Profª Selma Regina Maggiotto

Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária - FAV

*Dr. André Luiz Farias De Souza*

Secretaria de Estado e Meio Ambiente do Distrito Federal - SEMA

DF

Brasília, 3 de dezembro de 2019.

Dedico este trabalho aos meus pais, Valéria Rodrigues da Silva e Geraldo Minoru Kaya, que tanto se sacrificaram, trabalhando e me incentivando a cada dia para alcançar o degrau mais alto.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus que sempre esteve ao meu lado ao longo da minha caminhada acadêmica, me dando força e me privilegiando com a aprovação nesta Universidade Federal de ponta.

Aos amigos que estiveram ao meu lado ao longo desta longa jornada, estudando, apoiando e incentivando. Em especial as minhas amigas Andressa Coppola, Dalila Mendes, Mariana Nunes e Raquel Alvim que me deram todo suporte, quando eu precisei de apoio ao longo desta jornada.

Aos meus professores que se empenharam para passar o máximo de conhecimento possível, com agradecimento em especial ao Prof. Marcelo Fagioli que apesar de não ser meu orientador, foi um dos professores que mais me motivou dentro da Universidade.

À minha orientadora Marina Rolim que não hesitou em me apoiar neste trabalho tão importante.

Aos meus coorientadores Morris Scherer e Juliana Dias, que acreditaram no meu potencial e me deram a oportunidade de ampliar meus conhecimentos com o geoprocessamento e me incentivaram a usar isso no meu trabalho de conclusão de curso.

Aos meus familiares, principalmente meus pais e meus irmãos, que sempre estiveram do meu lado, sempre acreditaram no meu potencial e nunca mediram esforços para me dar o melhor.

“Somos o que fazemos, mas somos,  
principalmente, o que fazemos para mudar o  
que somos.”

Eduardo Galeano

# COMPARAÇÃO DE MODELOS PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POR SENSORIAMENTO REMOTO NA BACIA DO RIO JARDIM - DF

## RESUMO

A evapotranspiração é um parâmetro de grande importância no manejo da irrigação em áreas agrícolas e está intimamente ligado ao balanço hídrico nos ecossistemas. Por isso, sua estimativa é relevante para que haja uma gestão eficiente dos recursos hídricos. O objetivo do trabalho foi comparar as estimativas de evapotranspiração da cultura do trigo irrigado por pivô central no cerrado, por meio dos modelos SEBAL adaptado, SSEBop e Equação linear Kc-NDVI. A evapotranspiração foi estimada utilizando imagens Landsat-8, referentes as datas 25/06/2018, 11/07/2018 e 28/08/2018. Os modelos SSEBop e o Kc-NDVI, apresentaram resultados muito semelhantes, com coeficiente de correlação igual a  $R^2=0,83$  e quando comparados aos valores obtidos pelo modelo SEBAL adaptado, apresentaram um  $R^2=0,16$  para o SSEBop e  $R^2= 0,02$ , respectivamente. Os modelos SSEBop e Kc-NDVI apresentaram valores de evapotranspiração similares, mostrando-se promissores para a estimativa da evapotranspiração na região. Os resultados obtidos por meio do modelo Sebal adaptado apresentaram menor similaridade em relação aos modelos SSEBop e Kc-NDVI, entretanto, a escolha do modelo mais adequado depende das condições da região em que será utilizado, bem como da disponibilidade de dados e da finalidade de seu uso.

Palavras-chave: Trigo; Geoprocessamento; Cerrado; SEBAL; Kc-NDVI; SSEBop.

## ABSTRACT

Evapotranspiration is a very important parameter in the management of irrigation in agricultural areas and is closely linked to the water balance in ecosystems. Therefore, its estimation is relevant for the efficient management of water resources. The objective of this study was to compare the evapotranspiration estimates of the central pivot irrigated wheat crop in the cerrado, using the adapted SEBAL, SSEBop and KC-NDVI linear equation models. Evapotranspiration was estimated using Landsat-8 images, for the dates 25/06/2018, 11/07/2018 and 28/08/2018. The SSEBop and Kc-NDVI models, presented very similar results, with a correlation coefficient equal to  $R^2=0.83$  and when compared to the values obtained by the adapted SEBAL, presented a  $R^2=0.16$  for the SSEBop and  $R^2=0.02$  respectively. The SSEBop and Kc-NDVI models showed similar evapotranspiration values, showing promise for the estimation of evapotranspiration in the region. The results obtained through the adapted SEBAL model presented lower similarity in relation to SSEBop and Kc-NDVI models, however, the choice of the most appropriate model depends on the conditions of the region in which it will be used, as well as the availability of data and the purpose of its use.

Keywords: Wheat; Geoprocessing; Cerrado; SEBAL; Kc-NDVI; SSEBop.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Finalidades do plano de ampliação da agricultura irrigada. Fonte: mapa 2016 .....	21
<b>Figura 2:</b> Representação esquemática dos processos relacionados à irrigação. Fonte: conjuntura de recursos hídricos de 2017 _ ana. ....	24
<b>Figura 3:</b> Mapa de localização da área de estudo pad-df.....	28
<b>Figura 4:</b> Mapa de localização dos pivôs estudados. ....	29
<b>Figura 5:</b> Fluxograma do modelo sebal adaptado. ....	34
<b>Figura 6:</b> Metodologia do modelo ssebop. Fonte: manual ssebop <sup>br</sup> evapotranspiration.....	36
<b>Figura 7:</b> Fluxograma do modelo baseado na equação kc-ndvi. ....	38
<b>Figura 8:</b> Gráfico de valores de evapotranspiração real geradas pelo sebal, ssebop e equação kc-ndvi, do pivô 1 em mm d <sup>-1</sup> . ....	39
<b>Figura 9:</b> Gráfico de valores de evapotranspiração real gerados pelo sebal, ssebop e equação kc-ndvi, do pivô 2 em mm d <sup>-1</sup> . ....	40
<b>Figura 10:</b> Gráfico de valores de evapotranspiração real gerados pelo sebal, ssebop e equação kc-ndvi, do pivô 3 em mm d <sup>-1</sup> . ....	40
<b>Figura 11:</b> Gráfico com os valores de evapotranspiração em mm d <sup>-1</sup> , dos modelos sebal, ssebop, kc-ndvi e razão de bowen gerados por lopes et al. (2019).....	41
<b>Figura 12:</b> Mapa de evapotranspiração (mm d-1) pelo modelo ssebop referente a imagem do dia 25 de junho de 2018. ....	43
<b>Figura 13:</b> Mapa de evapotranspiração (mm d-1) pelo modelo ssebop referente a imagem de 11 de julho de 2018. ....	43
<b>Figura 14:</b> Mapa de evapotranspiração (mm d-1) pelo modelo ssebop referente a imagem do dia 28 de agosto de 2018. ....	44
<b>Figura 15:</b> Imagem de landsat adquirida no dia 28 de agosto de 2018. ....	45
<b>Figura 16:</b> Gráfico de dispersão entre os dados de evapotranspiração (mm d-1) gerados pelo modelo ssebop e a equação kc-ndvi. ....	46
<b>Figura 17:</b> Gráfico de dispersão entre os dados de evapotranspiração (mm d <sup>-1</sup> ) gerados pelos modelos sebal adaptado e ssebop. ....	46
<b>Figura 18:</b> Gráfico de dispersão entre os dados de evapotranspiração (mm d <sup>-1</sup> ) gerados pelos modelos sebal adaptado e equação kc-ndvi.....	47

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Datas das imagens landsat 8 utilizadas para estimativa da evapotranspiração do trigo pelos modelos sebal adaptado, ssebop e equação kc-ndvi.....	30
<b>Tabela 2:</b> Datas das imagens, altitudes e temperaturas médias utilizadas no cálculo de etr pelo algoritmo sebal adaptado. ....	31
<b>Tabela 3:</b> Dados de entrada do modelo ssebop e as fontes usadas. Fonte: manual ssebop <sup>br</sup> evapotranspiration.....	35
<b>Tabela 4:</b> Parâmetro de restrição para a produção do fator c filtrando o tcorr. Os pixels do landsat que atendem a todos os critérios listados são usados para o cálculo do fator c. Fonte: manual ssebop <sup>br</sup> evapotranspiration.....	35

## LISTA DE ABREVIATURAS

ANA - Agência Nacional de Águas  
CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento  
DF - Distrito Federal  
dt - diferença de temperatura  
EMATER-DF - Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Distrito Federal  
ETo - Evapotranspiração de referência  
ETp - Evapotranspiração potencial  
ETr/ ETc - Evapotranspiração real da cultura  
EVI - *Enhanced Vegetation Index*  
FAO - *Food and Agriculture Organization of the United Nations*  
G - Fluxo de calor no solo  
H - Fluxo de calor sensível  
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia  
Kc - Coeficiente de cultura  
Kc-NDVI - coeficiente de cultura obtido por meio do NDVI  
Ks - Coeficiente de redução em função da umidade do solo  
METRIC - *Mapping Evapotranspiration at high Resolution with Internalized Calibration*  
NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*  
NIR - infravermelho próximo  
OLI - *Operational Land Imager*  
PAD-DF - Programa de Assentamento Dirigido  
R - Vermelho  
Rn - Saldo de radiação à superfície  
SAFER - *Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*  
SEBAL - *Surface Energy Balance Algorithms for Land*  
SEBI - *Surface Energy Balance Index*  
SEBS - *Surface Energy Balance System*  
SSEB - *Simplified Surface Energy Balance*  
S-SEBI - *Simplified Surface Energy Balance index*  
SSEBOP - *Operational Simplified Surface Energy Balance*

TIRS - *Thermal Infrared Sensor*

Ts - Temperatura de superfície

TSEB - *Two Source Energy Balance*

USGS - *United States Geological Survey*

$\rho$ NIR - reflectância nas bandas do infravermelho próximo

$\rho$ RED - reflectância nas bandas do vermelho

## Sumário

1. INTRODUÇÃO .....	15
2. HIPÓTESE .....	19
3. JUSTIFICATIVA .....	19
4. OBJETIVO.....	19
5. REVISÃO TEÓRICA .....	20
5.1 Uso dos recursos hídricos na agricultura irrigada .....	20
5.1.1 Agricultura irrigada na região do Distrito Federal .....	22
5.2 Conceito de Evapotranspiração .....	23
5.2.1 Estimativa da evapotranspiração real por meio de modelos que utilizam dados de sensoriamento remoto .....	25
6. MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
6.1 Descrição da área de estudo.....	28
6.2 Estimativa da evapotranspiração real da cultura do trigo pelo algoritmo SEBAL adaptado.....	30
6.3 Estimativa da evapotranspiração real da cultura do trigo pelo modelo SSEBop.....	34
6.4 Estimativa da evapotranspiração real da cultura do trigo por meio da Equação Kc-NDVI .....	36
7. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
8. CONCLUSÃO.....	48
BIBLIOGRAFIA .....	49

## 1. INTRODUÇÃO

A irrigação tem como objetivo complementar a quantidade de água provida naturalmente pela chuva, a fim de proporcionar umidade adequada ao solo, para suprir as necessidades hídricas das culturas. O seu uso é fundamental para o desenvolvimento e produtividade da agricultura, visto que o manejo adequado permite elevar significativamente os resultados da produção (TESTEZLAF et al., 2002).

Contudo, a água é um recurso natural que está cada vez mais escasso, principalmente em se tratando de condições ideais para consumo e uso. Por isso, é de extrema importância que se faça um uso consciente da água, tanto para uso doméstico, quanto na agricultura. Tendo em vista que a agricultura irrigada é a maior usuária de água, a irrigação se coloca no centro das atenções, ao mesmo tempo em que requer grande responsabilidade quanto a eficiência ou a racionalização no uso desse recurso (ALBUQUERQUE; DURÃES, 2008).

No bioma Cerrado há mais de 50% da produção de grãos do país (IBGE, 2017) e onde também estão inseridas bacias hidrográficas fundamentais, tendo bastante importância no fornecimento de recursos hídricos para diversas regiões (LIMA; SILVA, 2007).

Ao longo dos anos o bioma cerrado, vem passando por uma intensificação quanto a agricultura, e o cenário é de que para uma agricultura economicamente viável, tem-se a necessidade de uso da irrigação (ANA, 2017; FAO, 2015). Nesse bioma há a sazonalidade de precipitação bem definida, uma de estação de chuvas (verão) e outra estação de seca (inverno), havendo a necessidade de irrigação, principalmente nos cultivos de inverno.

O trigo (*Triticum aestivum*) é uma das principais culturas de inverno no Cerrado, o que requer uma irrigação frequente (GUERRA et al., 2003). De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB, o Distrito Federal, apresenta o melhor índice de produtividade de trigo por área plantada do país, com média em torno de 5.734 t ha<sup>-1</sup>, enquanto a média nacional é de 2.472 t ha<sup>-1</sup>. Isso é possível devido à estabilidade climática e à presença de dias bem quentes e noites frias no inverno, além de haver uma força tarefa, para desenvolver tecnologias de ponta para a produção de trigo na região do cerrado brasileiro (CONAB, 2017).

Para o aperfeiçoamento do manejo da irrigação, a compreensão e estimativa da evapotranspiração pode ser de grande valia. Por meio da evapotranspiração, aproximadamente 70% do total precipitado retorna à atmosfera, desempenhando um importante papel como regulador do balanço hídrico (KITE; DROOGERS, 2000; SHUKLA; MINTZ, 1982).

Portanto, a compreensão da variação temporal e espacial da evapotranspiração, é indispensável para o gerenciamento de recursos hídricos (BASTIAANSEN et al., 2005), principalmente em bacias hidrográficas com predominância de agricultura irrigada.

A determinação da evapotranspiração torna-se grande aliada do gerenciamento e manejo dos recursos hídricos, e pode ser realizada por meio de técnicas e parâmetros físicos, que são considerados complexos, como é o caso da medição através do balanço hídrico do solo usando lisímetros, que tem diversas limitações (ALLEN et al., 2002).

Uma alternativa, são os modelos físico-matemáticos. Existem várias equações baseadas em dados meteorológicos para estimar a evapotranspiração, e a equação de Penman-Monteith é uma das mais conhecidas. A equação de Penman-Monteith leva em consideração aspectos aerodinâmicos, termodinâmicos, resistência ao fluxo de calor sensível, vapor de água e a resistência da superfície à transferência de vapor de água para a atmosfera. Esta equação é recomendada pela FAO como método padrão para a mensuração da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) (ALLEN et al., 1998).

Para a estimativa da evapotranspiração, o sensoriamento remoto pode prover dados e o uso desta ferramenta é de grande utilidade, pois pode apresentar uma cobertura espacial superior às medições de campo.

As metodologias que utilizam dados provenientes de sensoriamento remoto para essas estimativas vêm sendo aperfeiçoadas, proporcionando a determinação de parâmetros relacionados à temperatura e radiação em áreas heterogêneas, em que as espécies cultivadas exibem estádios fenológicos distintos (CAMPOS et al., 2016; WARREN et al., 2014; YANG et al., 2013; MINACAPILI et al., 2009; BEZERRA et al., 2008; CIRAOLO et al., 2006).

Neste contexto, a utilização de sensoriamento remoto em estudos hidrológicos, incentivada nos últimos anos pela evolução de novos sensores orbitais, apresenta-se como uma alternativa propícia para o monitoramento do

uso de recursos hídricos e manejo da irrigação (WARREN et al., 2014). A evapotranspiração pode ser mapeada e monitorada por meio de modelos que empregam imagens de sensores orbitais e dados meteorológicos (ALLEN et al., 2007b; BASTIAANSSEN et al., 2005; SENAY et al., 2011).

Nas últimas duas décadas, alguns modelos vêm sendo desenvolvidos para estimar a evapotranspiração da superfície da terra usando dados de sensoriamento remoto (GLENN et al., 2007; KALMA et al., 2008; LI et al., 2009; ZHAO et al., 2013). Alguns desses modelos incluem *Two Source Energy Balance* (TSEB) (NORMAN et al., 1995), *Surface Energy Balance algorithm for Land* (SEBAL) (BASTIAANSSEN, 1995; BASTIAANSSEN et al., 1998), *Simplified Surface Energy Balance Index* (S-SEBI) (ROERINK et al., 2000), *Surface Energy balance System* (SEBS) (SU, 2002), *Mapping Evapotranspiration at high Resolution with Internalized Calibration* (METRIC) (ALLEN et al., 2005, 2007 b), *Simplified Surface Energy Balance* (SSEB) (SENAY et al., 2007) e *Operational Simplified Surface Energy Balance* (SSEBOP) (SENAY et al., 2013).

Dentre os modelos supracitados, tem-se o SEBAL, que é um método que utiliza imagens provenientes do sensoriamento remoto, validado por Bastiaanssen (1998), é aplicado em muitos países e tem sua eficácia validada em diversos estudos (BANDARA, 2006; BASTIAANSSEN et al., 2005; ALEXANDRIDIS; CHEMIN, 2001). O SEBAL foi proposto para estimar o balanço de energia, usando imagens orbitais e quando se dispõem de poucos dados de superfície, com a finalidade de gerar mapas de evapotranspiração tanto em escalas regionais quanto locais em áreas irrigadas (PAIVA, 2005; SILVA; BEZERRA, 2005). Existem também adaptações validadas do modelo, com a finalidade de facilitar os cálculos, como as feitas por Fernandes (2017), trazendo o uso do EVI (*Enhanced Vegetation index*) em vez do NDVI (*Normalized Difference Vegetation index*), como proposto por Allen et al. (2002), no cálculo do calor sensível instantâneo (H), desprezando a rugosidade da atmosfera e trocando algumas equações como a da emissividade e albedo (ANDRADE et al., 2009; VAN DE GRIEND; OWE, 1993).

Já o modelo SSEBop (SENAY et al., 2013) apresenta-se como uma solução mais direta para obtenção da evapotranspiração a partir de imagens de sensores orbitais. O SSEBop possibilita estimar a evapotranspiração real (ETr) como uma fração da evapotranspiração de referência, tendo como base o

balanço de energia na superfície, porém, sem requerer sua solução completa (SENAY et al., 2013; SENAY et al., 2016).

O SSEBop apresenta como principal vantagem sua simplicidade operacional. Outra importante vantagem desse modelo é o fato de não exigir a identificação de um conjunto de pixels quentes, o que pode ser um fator limitante durante o período chuvoso de uma região (SENAY et al., 2013; SENAY et al., 2016; TEIXEIRA, 2010; TEIXEIRA et al., 2013).

Outro método para estimar a evapotranspiração, é com base no coeficiente de cultura ( $K_c$ ) que é obtido a partir de índices de vegetação, como o NDVI, tem sido calculada em vários estudos e para diversas culturas (HUNSAKER et al., 2005 a,b; HUNSAKER et al., 2007; SIMMONEAUX et al., 2008; LÓPEZ-URREA et al., 2009). Em todos os estudos citados, as precisões foram consideradas boas, quando comparadas com valores de evapotranspiração da cultura -  $E_{Tc}$  observados em campo oriundas dos mais variados métodos, apresentando diferenças não superiores à 10%.

Sabe-se que o  $K_c$  é estimado a partir de dados experimentais de lisímetros, ou calculados a partir de equações empíricas ou físicas. No Boletim FAO-56 tem disponível valores de  $K_c$  para diferentes culturas, bem como procedimentos de cálculos para ajustes destes coeficientes. É importante sempre ter em mente que o  $K_c$  de cada cultura muda de região para região, e por isto é importante ter cuidado com o dado que vai utilizar. Akdim et al. (2014), Cuesta et al. (2004), Gonzales-Piqueras et al. (2004), Kamble et al. (2013), Rafn et al. (2008) e Tasumi et al. (2006) demonstraram que o  $K_c$  para diversas culturas irrigadas pode ser obtido a partir da relação direta deste parâmetro com o índice de vegetação da diferença normalizada — NDVI.

O NDVI é um produto de sensoriamento remoto, com a capacidade de indicar a densidade e o vigor de uma cobertura vegetal. Em suma, este índice tem como base a relação entre a intensa absorção de energia na região do vermelho pela clorofila e a intensa reflexão na região do infravermelho próximo por conta da estrutura celular das folhas e a estrutura da vegetação (SCHOTT, 2007; LOURENÇO & LANDIM, 2004).

## **2. HIPÓTESE**

É possível estimar a evapotranspiração real (ET<sub>r</sub>) da cultura do trigo irrigado por pivô central, utilizando imagens obtidas por sensoriamento remoto, por meio dos modelos *Surface Energy Balance Algorithms for Land* – SEBAL adaptado, *Operational Simplified Surface Energy Balance* – SSEBop e Equação Linear Kc-NDVI.

## **3. JUSTIFICATIVA**

Considerando a importância da evapotranspiração para compreensão do balanço hídrico, principalmente em bacias hidrográficas, e tendo em vista a situação dos recursos hídricos, é crescente a necessidade de que se faça um monitoramento e um manejo eficaz desses recursos. Dessa maneira, o presente estudo torna-se relevante e oportuno, uma vez que a quantificação da evapotranspiração real é de extrema importância em planos de gerenciamento de recursos hídricos.

## **4. OBJETIVO**

O objetivo do presente estudo foi comparar a estimativa da evapotranspiração da cultura do trigo irrigado por pivô central no cerrado, por meio dos modelos SEBAL adaptado, SSEBop e Equação linear Kc-NDVI.

## **5. REVISÃO TEÓRICA**

### **5.1 Uso dos recursos hídricos na agricultura irrigada**

Segundo estudo da Agência Nacional de Águas (ANA), realizado em 2017, a agricultura irrigada e o abastecimento animal representaram mais de 60% da demanda por água.

Além deste estudo, foi feito no ano de 2019, pela ANA (2019), uma projeção do consumo de recursos hídricos no país até o ano de 2030, e a estimativa é de que se tenha um aumento de 24% e que a maior demanda, proporcionalmente, seja da agropecuária, o que inclui a água para a irrigação.

Está evidente que o cenário é de crescimento quanto a produção de alimentos e que está cada vez mais dependente da disponibilidade de água de bacias que já estão em estado crítico em termos de oferta hídrica. Torna-se importante aprimorar o manejo da irrigação, bem como o planejamento, a gestão e a regulação do uso de recursos hídricos, sendo a quantificação do uso de água em áreas irrigadas imprescindível para que tais objetivos sejam alcançados (ALLEN et al., 2007 a).

É importante ter em mente que o crescimento da irrigação resulta em aumento das captações de água, muitas vezes associadas à criação de reservatórios artificiais. Mas por outro lado, como pode ser observado na Figura 1, os investimentos neste setor têm impacto também em um aumento substancial da produtividade e do valor da produção, diminuindo a pressão pela incorporação de novas áreas para cultivo (MAPA, 2016).

**Figura 1:** Finalidades do plano de ampliação da agricultura irrigada. Fonte: MAPA 2016



Nos últimos anos houve expansão das áreas agrícolas irrigadas, isso foi possível devido a intensificação tecnológica e principalmente pelo aumento de incentivo e suporte à agricultura irrigada. Em 2008 por exemplo, foi criado o fórum permanente de desenvolvimento da agricultura irrigada, pelo ministro de estado da integração nacional (ANA, 2017).

O bioma cerrado não ficou para trás quando se fala de expansão de áreas irrigadas, em 2013, foram identificados 10.942 pivôs centrais, totalizando uma área de 835.695 hectares irrigados por este método, demonstrando um crescimento de 5,2 % ao ano no período de 2002 a 2013 (LIMA et al., 2013). O crescimento do uso do método por pivôs centrais, na região do cerrado, é devido à sua facilidade operacional, à alta adaptabilidade a diferentes condições de solo e topografia e à pequena demanda por mão de obra (SILVA & AZEVEDO, 1998), o que também é percebido no Distrito Federal.

Entretanto, o crescimento das áreas irrigadas não cessou, no ano de 2015, a região centro oeste, apresentou 1,2 milhões de hectares irrigados, mostrando que quadruplicou sua área nos últimos 20 anos. O estado de Goiás

responde pela maior parte desse crescimento, sextuplicando a área irrigada entre 1996 e 2015, em grande parte pela expansão de pivôs centrais para produção de grãos (ANA, 2017)

No estado de Goiás houve o crescimento na área irrigada. E na região do Distrito Federal, teve uma enorme evolução de áreas irrigadas, principalmente no método com pivôs centrais, passando de uma área irrigada por pivôs centrais de 170 ha em 1985, para uma área de 13.000 ha em 2015, refletindo um crescimento anual de 5,8% nas últimas décadas. A irrigação por pivô central tem evoluído muito na região principalmente pelo apelo natural do clima da região e devido a disponibilidade de infraestrutura e a proximidade a Brasília (LIMA & FERRAZ, 2018).

### **5.1.1 Agricultura irrigada na região do Distrito Federal**

Segundo Landau et al. (2013), foi identificado por meio de inspeção visual, com base em imagens do satélite Landsat - 5, 181 pivôs centrais no Distrito Federal, compreendendo uma área irrigada de 11.733 ha. Com o aumento de incentivos econômicos para a produção de alimentos, prevê-se um aumento das áreas irrigadas na região.

O DF possui uma área total de 580.200 ha sendo destes, 400 mil hectares de área rural onde vivem aproximadamente 88 mil pessoas (EMATER, 2017).

A área do DF é relativamente pequena quando comparada com as demais regiões, mas apesar disso, a sua contribuição com a produção de cereais, leguminosas e oleaginosas, tem um percentual acima dos outros estados (IBGE, 2014).

O sistema de pivô central tem sido o mais utilizado em função da capacidade de distribuição uniforme da água requerida pelas culturas, alto grau de automação, adaptação a diferentes tipos de solo e irrigação de grandes áreas, além da mencionada capacidade de aplicação de fertilizantes e defensivos agrícolas (Evans, 2001).

Como previsto por Landau o crescimento na área irrigada por pivôs centrais ocorreu. Segundo levantamento da ANA em 2017 a área equipada de pivôs centrais na região do DF era de 14.417 ha, com um total de 256 pivôs (ANA, 2017a).

## 5.2 Conceito de Evapotranspiração

A evapotranspiração consiste na combinação de dois processos diferentes pelos quais a superfície terrestre perde água para a atmosfera. Um é o processo de evaporação da água livre na superfície evaporante e o outro é o processo de transpiração das plantas (ALLEN et al., 1998).

O conhecimento da evapotranspiração é de extrema importância para o entendimento do ciclo hidrológico, principalmente em sistemas irrigados (MARTINS et al., 2015), sendo fundamental para a gestão de recursos hídricos, sobretudo em regiões de escassez.

Para entender a evapotranspiração, é necessário conhecer suas três definições: evapotranspiração máxima da cultura ( $ET_c$ ), evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) e evapotranspiração real da cultura ( $ET_r$ ). A  $ET_c$  é a evapotranspiração de qualquer cultivo em condições ótimas. A  $ET_o$  reflete a demanda evaporativa máxima que ocorre em uma superfície coberta por uma cultura de referência, com aporte de água adequado. A evapotranspiração real da cultura se refere a qualquer cultivo que cresce em condições diferentes das condições potenciais (ALLEN et al., 1998).

O cálculo da  $ET_c$  se dá a partir da  $ET_o$  e do  $K_c$  da cultura presente na área, segundo a fórmula a seguir:

$$ET_c = K_c \times ET_o \quad (1)$$

O cálculo da  $ET_r$  se dá a partir da  $ET_c$  e do coeficiente de redução em função da umidade do solo ( $K_s$ ).

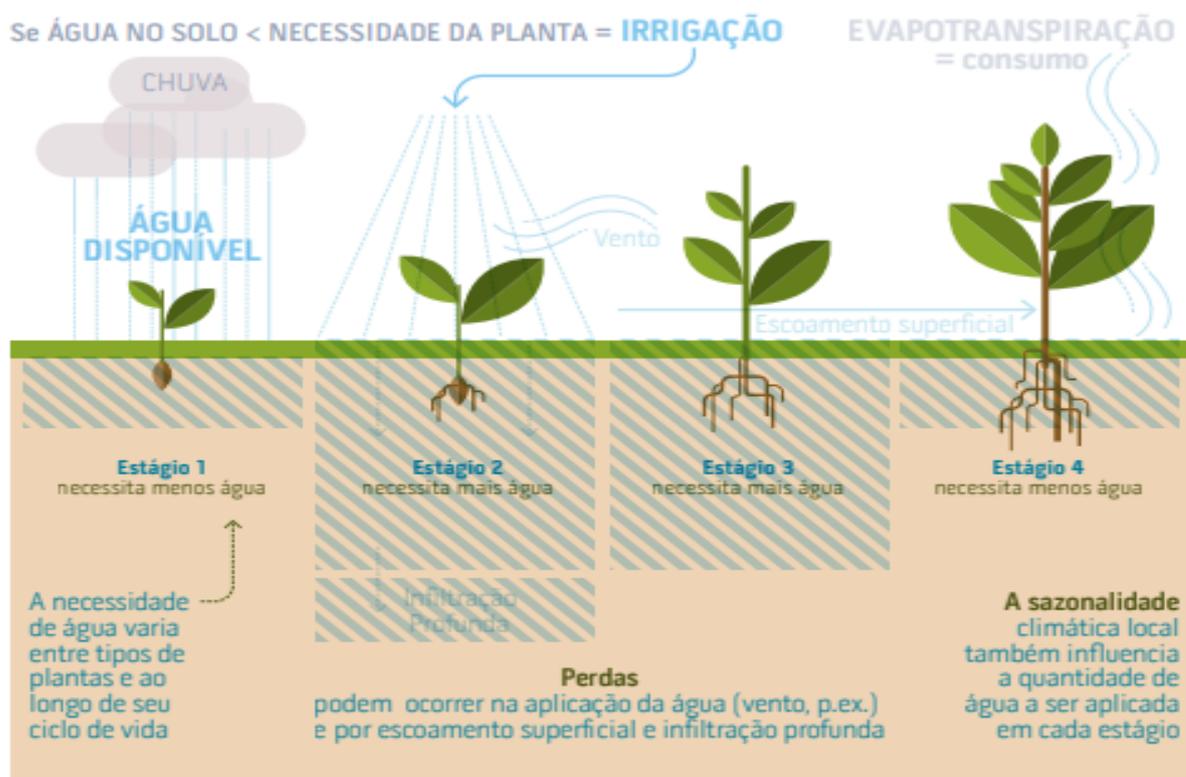
$$ET_r = K_s \times ET_c \quad (2)$$

A evapotranspiração potencial (ETP) foi definida por THORNTHWAITE (1948) como a “perda máxima de água de um solo vegetado, sem déficit hídrico, num determinado período.”

A evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) é determinada numa área com a de uma superfície revestida de grama verde de altura uniforme, em crescimento ativo, com o chão todo sombreado e sem déficit hídrico (SMITH et al., 1991). Portanto, não deverá ter sua variação associada ao tipo e ao estágio de desenvolvimento da cultura ou às práticas de manejo, visto que a cultura da superfície avaliada e seu estágio de desenvolvimento, são previamente definidos, tendo sua variação influenciada apenas pelos elementos climáticos ao redor da superfície (ALLEN et al., 1998).

Para entender melhor o conceito e a importância da evapotranspiração real, deve se ter em mente que cada cultura necessita de uma quantidade de água, e em cada fase de desenvolvimento da mesma cultura essa quantidade também varia, além de que as condições do ambiente e de umidade do solo também tem influência sobre a ETr. A irrigação tem o objetivo de suplementar o que a planta necessita, que é demonstrado pela ETr, ou seja, de complementar o que é fornecido pelas demais fontes (solo e chuva) (ANA 2017b). Todo este conceito pode ser observado na Figura 2.

**Figura 2:** Representação esquemática dos processos relacionados à irrigação. Fonte: Conjuntura de recursos hídricos de 2017 \_ ANA.



O método de Penman-Monteith foi indicado pela FAO como o método padrão para o cálculo da evapotranspiração de referência. Assim, foi desenvolvida a equação de Penman-Monteith-FAO, considerando como superfície de referência uma cultura hipotética com altura de 0,12 metros e albedo igual a 0,23, se remetendo a uma superfície extensa de grama verde em

crescimento ativo, de altura uniforme e adequadamente irrigada (ALLEN et al., 1998).

É comum que se calcule a evapotranspiração real da cultura, seguindo três passos, o primeiro consiste em fazer a estimativa da ETo, o segundo na conversão da ETo para ETc, por meio do Kc, e o terceiro na conversão para as condições reais de campo, obtendo uma ETr, considerando um Ks. Estes passos se alinham com a metodologia proposta no Boletim FAO 56 (ALLEN et al., 1998).

Com o avanço da tecnologia, a evolução do sensoriamento remoto, surgiram diversos modelos que permitem mapear e monitorar a evapotranspiração utilizando imagens de satélite e dados meteorológicos (ALLEN et al., 2007b; BASTIAANSSEN et al., 2005; SENAY et al., 2011). A possibilidade de mensurar de maneira indireta o processo de evapotranspiração a partir destas técnicas, representa uma mudança significativa na gestão de recursos hídricos (BASTIAANSSEN e BOSS, 1999; BASTIAANSSEN et al., 2000; MENENTI, 2000; COUREAULT et al., 2005).

### **5.2.1 Estimativa da evapotranspiração real por meio de modelos que utilizam dados de sensoriamento remoto**

O sensoriamento remoto pode ser uma alternativa eficaz para a obtenção de informações sobre evapotranspiração real sem a necessidade de dados de solo ou de cultura, permitindo uma ampla cobertura espacial e temporal, e tudo isto a um custo consideravelmente baixo (BASTIAANSSEN et al., 2005).

Diversos modelos foram desenvolvidos para estimativa de evapotranspiração por sensoriamento remoto como o SEBAL, o METRIC, o SAFER e outros. Os modelos *Surface Energy Balance Algorithm for Land* – SEBAL (BASTIAANSSEN et al., 1992) e *Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration* – METRIC (ALLEN et al., 2007b) estão entre os mais utilizados para determinação da evapotranspiração real por sensoriamento remoto. Ambos se baseiam no processamento de imagens de satélite nas bandas do visível, infravermelho próximo e infravermelho termal para obtenção da ETr como um resíduo do balanço de energia na superfície (ALLEN et al., 2007a; ALLEN et al., 2007b).

Os modelos SEBAL e METRIC têm eficiência avaliada, mas o nível de conhecimento e a quantidade de dados que é requerida limita sua aplicabilidade. Por isso, foram surgindo modelos alternativos a estes, para simplificar a aplicação, buscando diminuir a requisição de muitos dados. Um exemplo, é a adaptação feita no modelo SEBAL, por Fernandes (2017).

Outros exemplos são o surgimento de modelos mais simplificados como o SSEBop, que resolve parcialmente a equação do balanço de energia (SENAY et al., 2013; SENAY et al., 2016) e o modelo proposto por Yang et al. (2013), no qual a evapotranspiração é calculada em função de sua relação com a produção primária bruta, que indica a quantidade de energia captada por uma planta que pode ser convertida em biomassa. A razão entre esses dois parâmetros, conhecida como a eficiência no uso da água do ecossistema, mostrou-se relativamente constante ao longo do tempo. Desta forma, a evapotranspiração real pode ser estimada sem a necessidade de dados meteorológicos, sendo necessários apenas dados obtidos por sensoriamento remoto.

Além desse modelo alternativo proposto por Yang et al. (2013) que não requer dados meteorológicos, foi desenvolvido um modelo que se baseia no princípio do balanço de energia na superfície, porém, sem a necessidade de sua solução completa, permitindo uma agilidade na obtenção de estimativas da evapotranspiração real, esse modelo é o *Simplified Surface Energy Balance – SSEB*, desenvolvido por Senay et al. (2007).

Em 2013, Senay et al. (2013) apresentaram uma nova parametrização para o SSEB, denominada *Simplified Surface Energy Balance for operational application - SSEBop*. A adaptação consiste em incluir condições de contorno pré-estabelecidas para cada *pixel* referentes às condições de fluxo de calor latente máximo (*pixel* frio) e mínimo (*pixel* quente). O valor de referência do *pixel* frio é estimado como uma fração da temperatura do ar e o valor de referência do *pixel* quente obtido por meio da adição de uma diferença de temperatura predefinida, única para cada localização e sazonalmente dinâmica.

Essas mudanças permitem ampliar a aplicação do método em comparação ao modelo original e aos modelos mais complexos como o SEBAL e o METRIC, pois eles requerem uma região hidro-climatologicamente uniforme, onde as condições climáticas do conjunto de pixels quente e frio selecionados sejam representativas. Senay et al. (2016) testaram o modelo utilizando imagens

Landsat 8, nos Estados Unidos e os resultados apresentaram boa concordância, obtendo boa correlação entre a ETr observada e a ETr estimada nos locais de pastagem de Kendell, apresentando  $R^2$  0,82 para dados diários e 0,91 para dados mensais. e um coeficiente de eficiência do modelo Nash-Sutcliffe variando de 0,66 a 0,94.

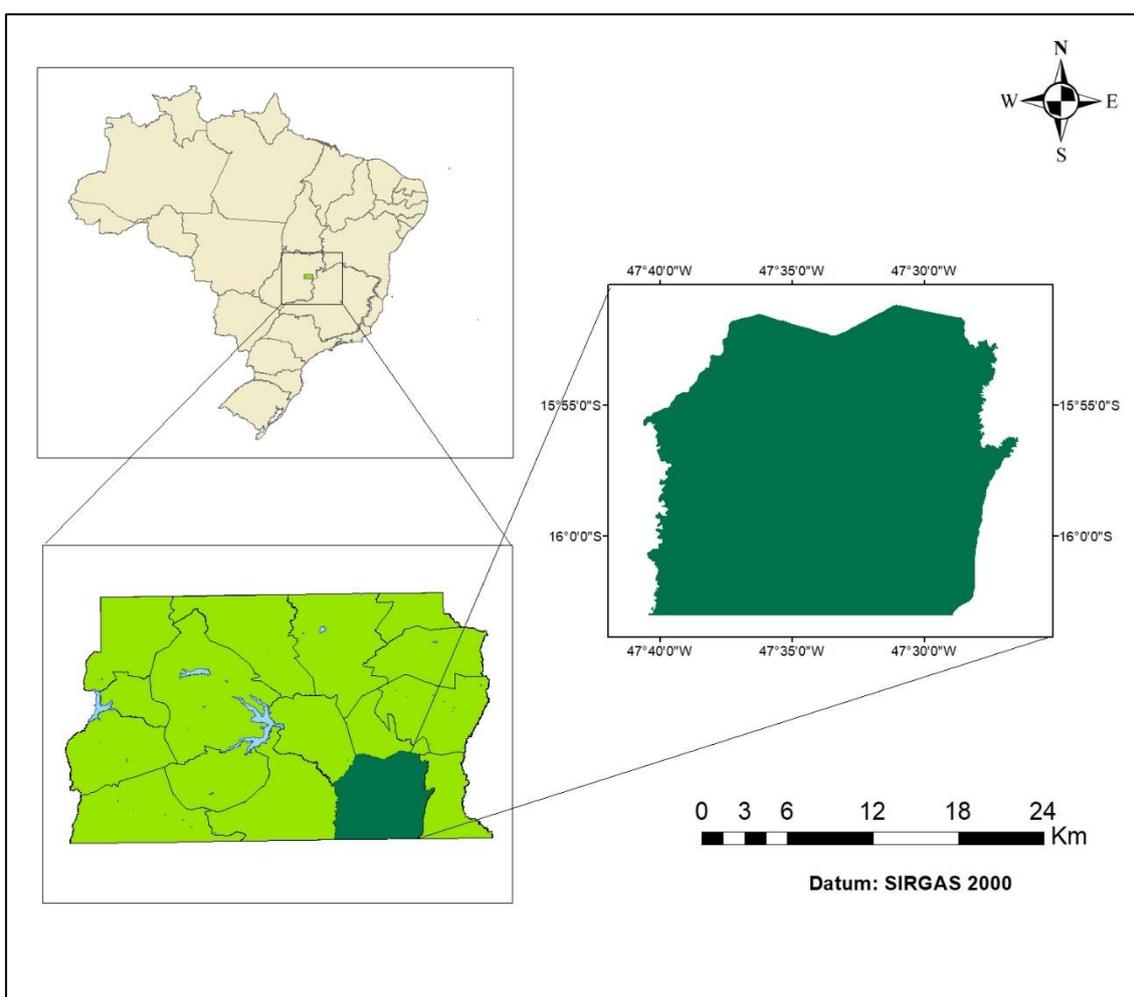
Outra metodologia que é promissora, e vem sendo constantemente explorada, é a estimativa da evapotranspiração real da cultura a partir do método Kc dual obtido por meio do índice de vegetação, principalmente o NDVI. No trabalho de Bezerra et al. (2010), o uso do método apresentou resultados com precisão bastante confiáveis, pois foram constatadas diferenças menores que 10%, quando comparadas com os valores de ETr obtidos pelo método de Bowen. O método também apresentou bom desempenho na região do cerrado, para a cultura do trigo, tendo  $R^2$  0,79 (LOPES et al., 2019).

## 6. MATERIAIS E MÉTODOS

### 6.1 Descrição da área de estudo

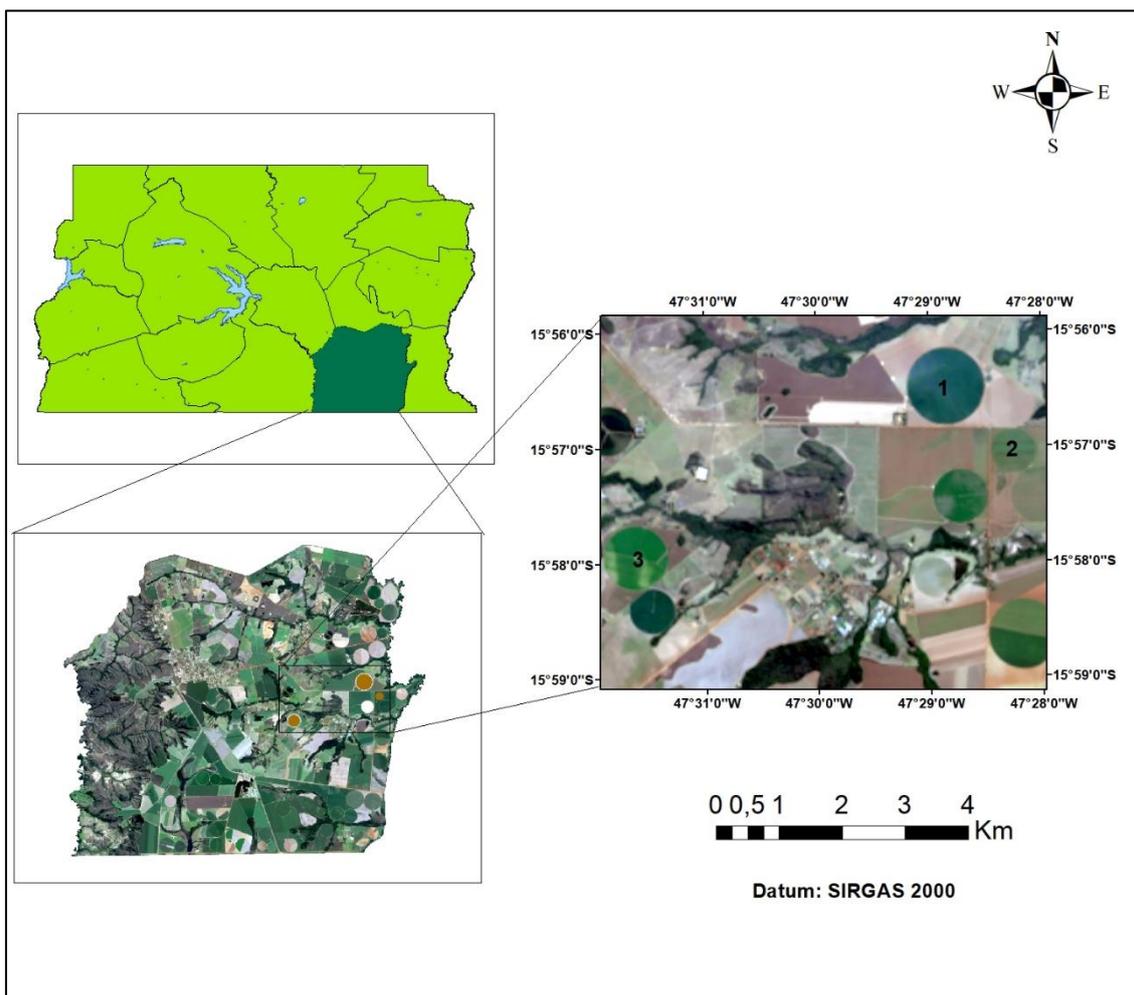
A região selecionada para o estudo foi a do Programa de Assentamento Dirigido (PAD-DF), no Distrito Federal (Figura 3). A região abrange uma área total de 43.777 ha. Essa região foi uma das primeiras do cerrado a alavancar a produção de trigo irrigado com o sistema do tipo pivô central. Segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, o clima da região é classificado como clima tropical de savana Aw (CLIMATE-DATA.ORG).

**Figura 3:** Mapa de localização da área de estudo PAD-DF.



Com base nos dados disponibilizados pela Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Distrito Federal - Emater-DF, foram selecionados 3 pivôs, que no período de maio a agosto de 2018, foram cultivados com a cultura do trigo, como pode ser observado na Figura 4.

**Figura 4:** Mapa de localização dos pivôs estudados.



O pivô 1 apresenta uma área de 115 ha, o pivô 2 de 45 ha e o pivô 3 possui 85 ha. Segundo os dados da Emater-DF, os pivôs foram plantados com a cultura do trigo entre a primeira e a segunda semana de maio e colhidos entre as duas últimas semanas de julho e a primeira semana do mês de agosto de 2018.

Os modelos aplicados no presente estudo foram o SEBAL, seguindo as adaptações desenvolvidas no trabalho de Fernandes (2017) e Reis (2019), o modelo SSEBop (DE PAULA, 2018), usando o Software SSEBop<sup>BR</sup> Evapotranspiration, desenvolvido pela ANA em parceria com a USGS e a Empresa Agrosatélite.

Para a estimativa da ETr foram utilizadas imagens obtidas pelos sensores OLI (Operational Land Imager) e TIRS (Thermal Infrared Sensor), a bordo do satélite Landsat 8.

As imagens foram obtidas gratuitamente junto ao United States Geological Survey – USGS por meio da plataforma Earth Explorer. Foram usadas imagens da Coleção1, com nível de processamento L1TP (Level 1- Standart Terrain Correction), que são imagens calibradas radiometricamente e ortorretificadas utilizando pontos de controle no solo e dados de modelo digital de elevação.

Foram selecionadas imagens para o período de interesse, que não apresentavam nuvem na área de estudo, totalizando 3 imagens, conforme a Tabela 1.

**Tabela 1:** Datas das imagens Landsat 8 utilizadas para estimativa da evapotranspiração do trigo pelos modelos SEBAL adaptado, SSEBop e Equação Kc-NDVI.

OLI-TIRS/ Landsat 8
25/06/2018
11/07/2018
28/08/2018

## **6.2 Estimativa da evapotranspiração real da cultura do trigo pelo algoritmo SEBAL adaptado.**

O SEBAL é um algoritmo que foi desenvolvido por Bastiaanssen (1995), como alternativa aos modelos já existentes, para realizar a estimativa de evapotranspiração real, por meio de sensoriamento remoto, utilizando dados de imagens vindas de satélites, aliado a dados complementares de superfície e meteorológicos.

O modelo possui vantagens e desvantagens; uma das vantagens do método é a possibilidade de fazer a estimativa de evapotranspiração de grandes extensões territoriais. Uma desvantagem é a sua limitação para uso em áreas de alta declividade. No presente estudo isso não acarretará problemas, pois a região de estudo apresenta características de declividade classificado como plano (REIS, 2019).

Para a obtenção dos valores de evapotranspiração foram seguidas as alterações feitas nos trabalhos de Fernandes (2017) e Reis (2019), no algoritmo SEBAL.

Os dados meteorológicos e de temperatura do ar foram obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia - INMET. A estação utilizada para a coleta de dados está localizada no Paranoá, sendo escolhida por ser a mais próxima da área de interesse, PAD-DF.

Foram utilizadas as temperaturas médias diárias observadas de acordo com a data de cada imagem, além de utilizar uma altitude padrão de 1020 m. As médias serviram para o cálculo do fluxo de radiação termal da atmosfera e de todos os outros parâmetros que dependem desse, além de dados de aerodinâmica. A Tabela 2 retrata as datas utilizadas, altitude e temperaturas médias diárias.

**Tabela 2:** Datas das imagens, altitudes e temperaturas médias utilizadas no cálculo de ETr pelo algoritmo SEBAL adaptado.

<b>Satélite</b>	<b>Data</b>	<b>Altitude (m)</b>	<b>T média diária (°C)</b>
<b>Junho</b>			
Landsat-8	25/06/2018	1020	21,23
<b>Julho</b>			
Landsat-8	11/07/2018	1020	20,26
<b>Agosto</b>			
Landsat-8	28/08/2018	1020	21,20

A evapotranspiração é estimada como um resíduo do balanço de energia. O saldo de radiação à superfície ( $R_n$ ) e o fluxo de calor no solo ( $G$ ) são dados considerando relações diretas com os dados espectrais orbitais. Leva-se em conta características da superfície, como albedo, temperatura e propriedades da vegetação. Já o fluxo de calor sensível ( $H$ ) assume uma função linear entre a temperatura da superfície ( $T_s$ ) e o gradiente de temperatura do ar próximo à

superfície e, juntamente com dados meteorológicos, possibilita a estimativa desse parâmetro (PROFETA, 2017).

Os cálculos feitos, seguiram os mesmos passos do trabalho de Reis (2019). Algumas das equações utilizadas para a adaptação do algoritmo SEBAL foram:

O cálculo de evapotranspiração que se dá pela equação 3:

$$ET = R_n - G - H \quad (3)$$

Onde a evapotranspiração (ET) é considerada como resíduo do balanço de energia. O  $R_n$  é o saldo de radiação para superfície, o  $G$  é o fluxo instantâneo de calor no solo e  $H$  é o fluxo de calor sensível instantâneo, todos medidos em  $W m^{-2}$ .

Para o cálculo do saldo de radiação de energia para a superfície ( $R_n$ ), é necessário obter valores de emissividade. Para este cálculo foi utilizada a fórmula proposta por Van de Griend e Owe (1993), que padroniza o índice de vegetação da região e pode ser replicada para diferentes áreas e culturas. A fórmula pode ser demonstrada por:

$$\text{Emissividade} = a + b \ln(\text{NDVI}) \quad (4)$$

Sendo:  $a=1,0094$  e  $B=0,04$ , valores obtidos através de uma regressão linear empírica.

Com a finalidade de aprimorar os resultados, o NDVI foi substituído pelo EVI, visto que este índice tem maior sensibilidade quando comparado com o NDVI, pois além de levar em consideração o vermelho e o infravermelho, leva-se em consideração, também as bandas do azul com o objetivo de descontar influências atmosféricas no índice, podendo ser utilizado em áreas que contém mais umidade, fornecendo maior precisão para estudos em áreas irrigadas (HUETE et al., 1997). A fórmula utilizada para calcular o EVI pode ser demonstrada por:

$$EVI = 2,5 \times \frac{NIR-R}{1+NIR+6R-7,5B} \quad (5)$$

Em que: NIR significa o espectral de infravermelho próximo, e R e B os espectrais vermelho e azul respectivamente (Huete et al.,1997).

Com estas informações é possível calcular o  $R_n$  que é expresso na equação 6 (ALLEN et al., 2002).

$$R_n = (1 - \alpha)R_s \downarrow + R_l \downarrow - R_l \uparrow - (1 - \varepsilon_0) R_l \downarrow \quad (6)$$

Onde  $R_s \downarrow$  representa a radiação solar de onda curta que atinge de fato a superfície terrestre, variando de 200-1000 W/m<sup>2</sup>,  $R_l \downarrow$  representa o fluxo de radiação termal da atmosfera, variando de 200-500 W/m<sup>2</sup>,  $R_l \uparrow$  representa o fluxo de radiação termal emitida pela Terra em direção a atmosfera, variando entre 200-700 W/m<sup>2</sup>. O detalhamento de todos os cálculos pode ser encontrado no trabalho de Fernandes (2017).

Finalizado o cálculo do saldo de radiação é possível dar sequência ao cálculo de evapotranspiração, para isso é necessário obter valores de fluxo instantâneo de calor no solo (G), de acordo com Bastiaanssen et al. (2000) que pode ser expresso pela equação 7:

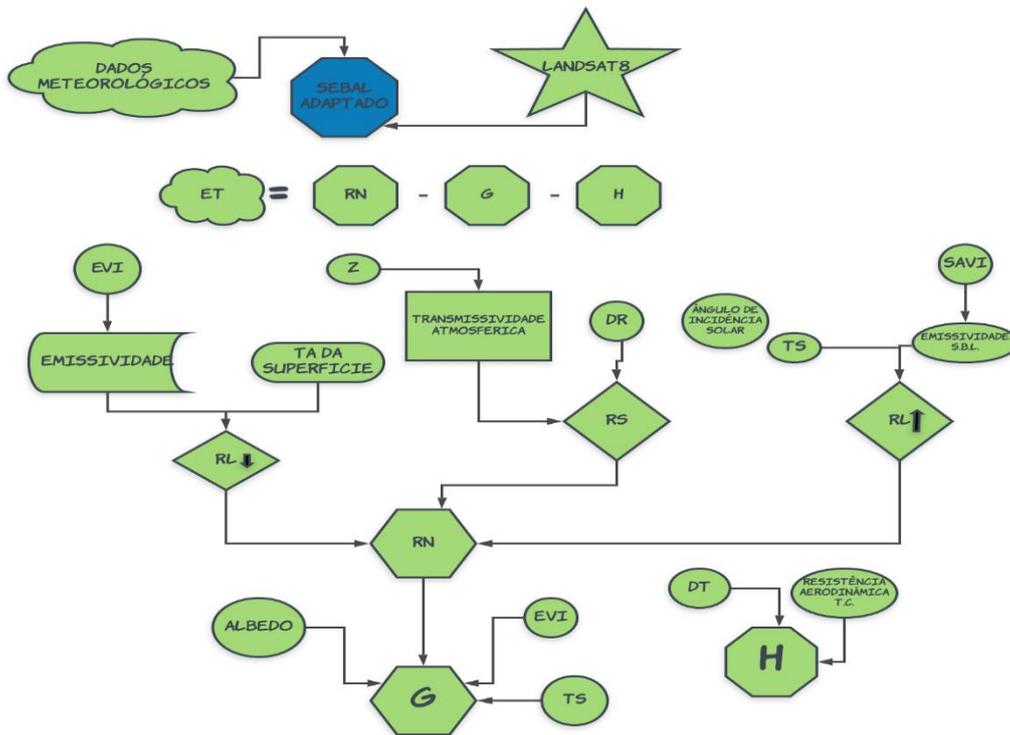
$$G = \frac{T_s}{\alpha} \times (0,0038 \alpha + 0,0074 \alpha^2) \times (1 - 0,98 \times EVI^4) \times R_n \quad (7)$$

Na equação original, no lugar de EVI, se utilizava valores de NDVI, porém, como supracitado, valores de EVI representam com maior precisão áreas irrigadas (Huete et al.,1997).

$T_s$  é igual a temperatura da superfície e é necessário que se converta de graus Kelvin para graus Celsius.  $\alpha$  representa o albedo instantâneo e  $R_n$  o saldo de radiação para superfície.

O modelo pode ser observado por meio do fluxograma presente na Figura 5.

**Figura 5:** Fluxograma do modelo SEBAL adaptado.



### 6.3 Estimativa da evapotranspiração real da cultura do trigo pelo modelo SSEBop.

A estimativa da evapotranspiração real da cultura de trigo foi realizada pelo modelo SSEBop. A implementação do modelo foi realizada através do software SSEBop<sup>BR</sup> Evapotranspiration. O aplicativo SSEBop processa cenas individuais do Landsat de qualquer período, desde 1984 até o presente e para quase todas as áreas do mundo.

O *software* desenvolvido pela ANA na plataforma Earth Engine Apps, usa os mesmos parâmetros que os sugeridos por Senay et al. (2013), Senay et al. (2017) e Senay (2018). É feita a demarcação de uma região de interesse, e é feita então a busca das imagens correspondentes da região de interesse, o sistema gera automaticamente dados de Evapotranspiração de referência e Evapotranspiração real.

A ET de referência (ET<sub>o</sub>) é calculado independentemente, usando os dados meteorológicos disponíveis através da equação de Penman-Monteith padronizada. O banco de dados usado como fonte para o cálculo da

evapotranspiração de referência foi o *Global Land Data Assimilation System – GLDAS 2.1 (SSEBop<sup>BR</sup>)*.

A Tabela 3 mostra os dados de entrada necessários para o modelo SSEBop e as fontes de dados usadas no aplicativo SSEBop. A Tabela 4 mostra a parametrização do modelo especificado para calibração do SSEBop no Brasil.

**Tabela 3:** Dados de entrada do modelo SSEBop e as fontes usadas. Fonte: Manual SSEBOP<sup>BR</sup> Evapotranspiration.

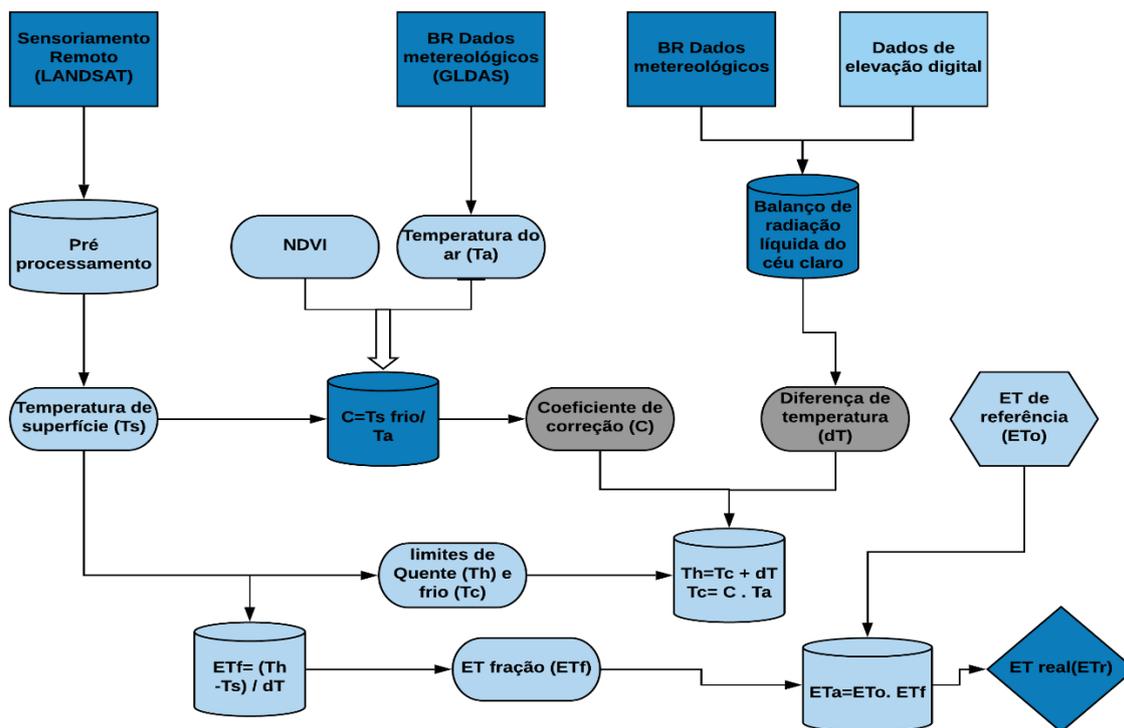
Conjunto de dados	Símbolo	Fonte	Objetivo
Elevação	Z	SRTM	Air Pressure
Fator C: coeficiente de correção de temperatura	C	Meteorological data	Tc
Temperatura da superfície terrestre	T <sub>s</sub>	Landsat	E <sub>tf</sub> , E <sub>ta</sub>
Temperatura máxima do ar	T <sub>a</sub>	Meteorological data	R <sub>n</sub> , T <sub>h</sub> , T <sub>c</sub> , dT
Diferença de temperatura	D <sub>t</sub>	Model	dT
Radiação líquida em céu claro	R <sub>n</sub>	Model	dT
ET de referência	E <sub>to</sub> /E <sub>tr</sub>	Meteorological data	E <sub>ta</sub>
Resistência aerodinâmica	r <sub>ah</sub>	Model	dT
Albedo	α	Landsat	T <sub>a</sub>
Índice de vegetação com diferença normalizada	NDVI	Landsat	c, Tc

**Tabela 4:** Parâmetro de restrição para a produção do fator C filtrando o T<sub>corr</sub>. Os pixels do Landsat que atendem a todos os critérios listados são usados para o cálculo do fator C. Fonte: Manual SSEBOP<sup>BR</sup> Evapotranspiration.

Dados	Parâmetros	Observação
NDVI	$0.75 \leq NDVI \leq 1.0$	Vegetação mais verde e saudável
T <sub>s</sub>	> 270 K	Mascarar pixels de nuvens e neve
QA Band	≥ 500 PIXEL LIMPOS	Tamanho mínimo válido da amostra
T <sub>diff</sub>	$0 K \leq (T_a - T_s) \leq 30K$	Diferenças irreais removidas (T <sub>a</sub> -T <sub>s</sub> )
T <sub>corr</sub>	T <sub>a</sub> /T <sub>s</sub>	Fator c preliminar baseado em pixel sobre superfícies bem vegetadas atendendo aos critérios acima
Fator-c	Significa T <sub>corr</sub>	Fator c baseado na vegetação mais verde e mais úmida/mais fria

A Figura 6 demonstra as etapas que o modelo segue para obter dados de evapotranspiração de referência (E<sub>to</sub>) e de evapotranspiração real (E<sub>tr</sub>).

**Figura 6:** Metodologia do modelo SSEBop. Fonte: Manual SSEBOP<sup>BR</sup> Evapotranspiration.



Os dados gerados pelo sistema, foram processados no ARCMAP® 10.7.1 ESRI, usando a ferramenta Extract multi values to points, para obter os dados de ETo e ETr referentes aos pivôs estudados.

#### 6.4 Estimativa da evapotranspiração real da cultura do trigo por meio da Equação Kc-NDVI

Nesse estudo, também foi utilizada a equação desenvolvida por Lopes et al. (2019), que relacionou Kc e NDVI para a cultura do trigo.

Segundo Lopes et al. (2019), a equação obtida para estimativa do coeficiente de cultura do trigo irrigado em função do NDVI apresentou bom ajuste ( $R^2 = 0,79$ ), sendo os coeficientes angular e linear da equação iguais a 0,9742 e 0,2576, respectivamente. A equação pode ser expressa por:

$$kc = 0,9742 NDVI + 0,2576 \quad (8)$$

O NDVI (ROUSE et al., 1973) foi calculado a partir da reflectância nas bandas do vermelho ( $\rho_{RED}$ ) e do infravermelho próximo ( $\rho_{NIR}$ ), conforme a equação 9:

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{RED}) / (\rho_{NIR} + \rho_{RED}) \quad (9)$$

O NDVI foi gerado por meio do processamento das imagens, no ARCMAP® 10.7.1, usando a ferramenta *Image analysis*.

As medidas de índice de vegetação têm, na maioria das vezes, ligação direta com o valor de biomassa, área foliar, cobertura do solo e rendimento agrícola (ANTUNES et al., 1993).

Foi aplicada a equação 8 com os dados de NDVI obtidos, para gerar os valores de  $K_c$  e, posteriormente, os de evapotranspiração da cultura através da equação 10 demonstrada a seguir:

$$ET_c = ET_r \times K_{c_{ndvi}} \quad (10)$$

Os dados de  $ET_r$  foram obtidos a partir do processamento de dados meteorológicos, disponibilizados pelo INMET, da estação Paranoá-DF, no software REF-ET (ALLEN, 1998).

O REF-ET é um *software* que calcula a evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ), que utilizado para a geração de dados de  $ET_o$ . Ele fornece resultados padronizados de evapotranspiração de referência para quinze métodos e equações mais comuns (ALLEN, 1998), a equação usada no estudo foi a de Penman-Monteith FAO 56.

Uma limitação da metodologia proposta por Penman-Monteith está relacionada ao grande número de variáveis necessárias para sua aplicação, dependendo diretamente de dados fornecidos por estações meteorológicas locais, que geralmente não fornecem todos os parâmetros fundamentais para aplicação desta metodologia. Mesmo quando utilizados são pontuais e representativos para pequenas áreas homogêneas, dificultando estimativas em níveis regionais (MACHADO et al., 2014).

O modelo pode ser resumido através do fluxograma presente na Figura 7.

Figura 7: Fluxograma do modelo baseado na Equação Kc-NDVI.

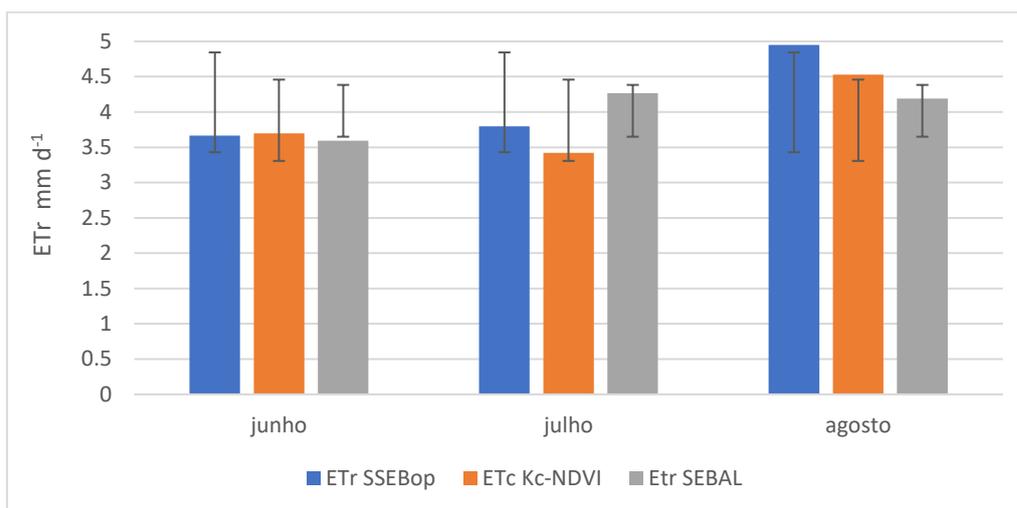


## 7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

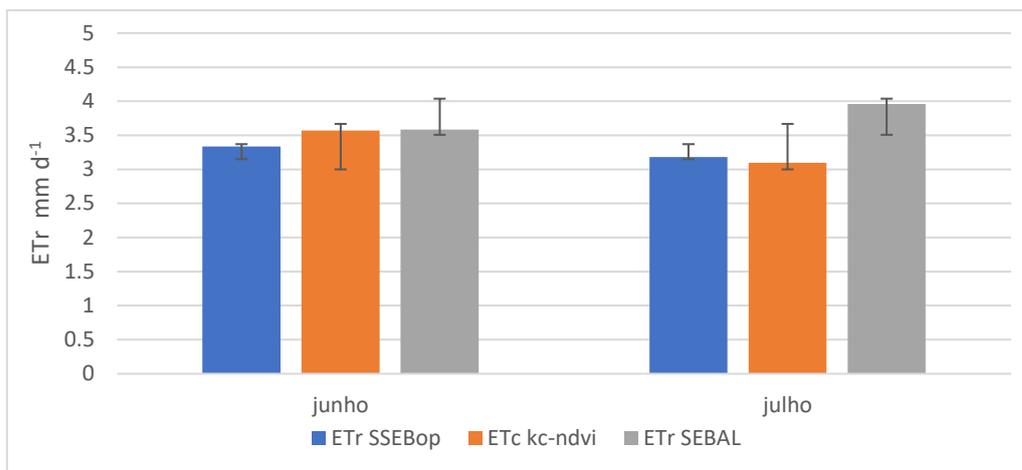
Os valores de evapotranspiração estimados por Reis (2019), por meio do algoritmo SEBAL adaptado foram semelhantes aos resultados obtidos no presente estudo para o modelo SSEBop e para a equação Kc-NDVI, como é possível observar nas Figuras 8, 9 e 10.

Cabe ressaltar que os modelos avaliados no presente estudo apresentam diferenças entre si, mas que devido as condições em que o estudo foi realizado, considerando adequada umidade do solo e condição de céu limpo, sem interferência de precipitação e de nuvens, é possível fazer comparações entre os resultados obtidos.

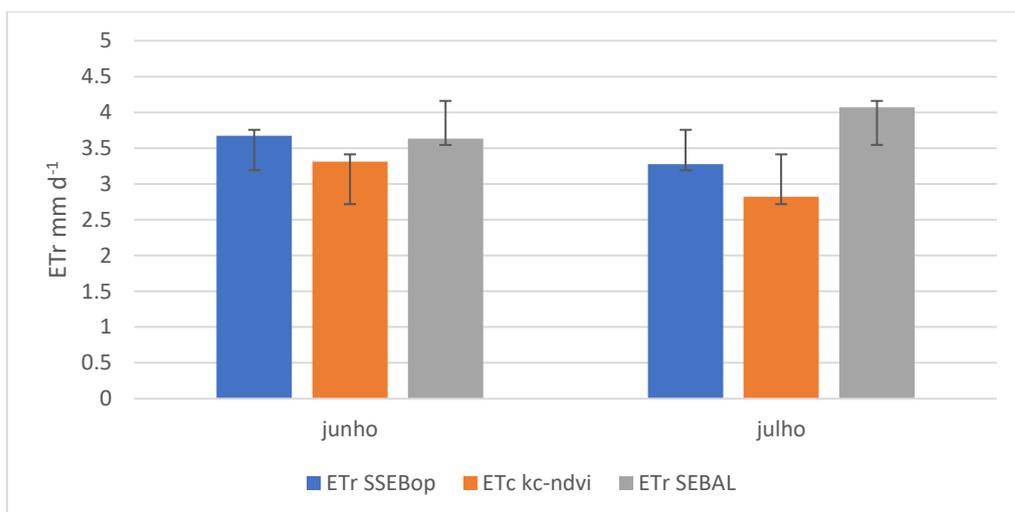
**Figura 8:** Gráfico de valores de evapotranspiração real geradas pelo SEBAL, SSEBop e equação Kc-NDVI, do pivô 1 em  $\text{mm d}^{-1}$ .



**Figura 9:** gráfico de valores de evapotranspiração real gerados pelo SEBAL, SSEBop e equação Kc-NDVI, do pivô 2 em  $\text{mm d}^{-1}$ .



**Figura 10:** gráfico de valores de evapotranspiração real gerados pelo SEBAL, SSEBop e equação Kc-NDVI, do pivô 3 em  $\text{mm d}^{-1}$ .



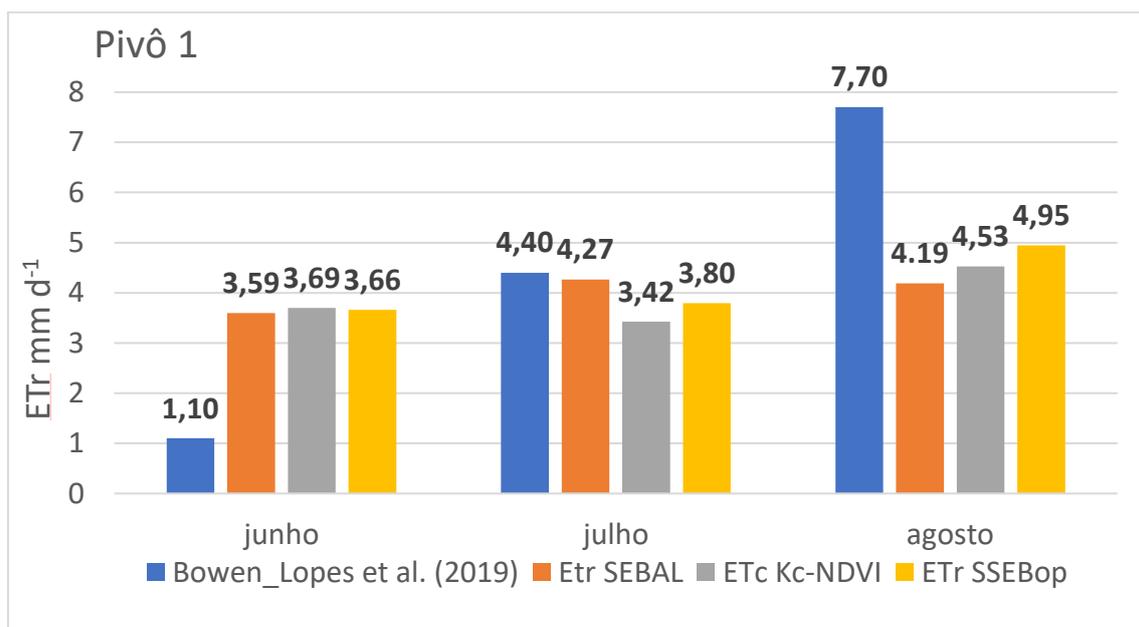
A evapotranspiração do pivô 1 (Figura 8) nos meses de junho, julho e agosto, foram respectivamente, 3,66 mm, 3,79 mm e 4,95 mm pelo método SSEBop; e 3,69 mm, 3,42 mm e 4,53 mm pelo método Kc-NDVI; e 3,60 mm, 4,27 mm e 4,20 mm pelo método SEBAL adaptado.

No pivô 2 (Figura 9), a evapotranspiração nos meses de junho e julho, foram respectivamente, 3,34 e 3,18 mm, pelo método SSEBop; 3,57 mm e 3,10 mm pelo método Kc-NDVI e 3,59 mm e 3,96 mm pelo método SEBAL adaptado.

No pivô 3 (Figura 10), a evapotranspiração nos meses de junho e julho, foram respectivamente, iguais a 3,67 mm e 3,27 mm pelo método SSEBop; 3,31 mm e 2,82 mm pelo método Kc-NDVI e 3,64 mm e 4,07 mm pelo método SEBAL adaptado.

Lopes et al. (2019), utilizou o método da razão de Bowen para validar os modelos SSEBop e SAFER, para a estimativa da evapotranspiração real, na região do planalto central, no período de 28 de junho à 2 de outubro, com o trigo BRS 394. Sendo a mesma classificação climática e cultura do presente estudo. Onde obtiveram valores de evapotranspiração, através do método da razão de Bowen, iguais a 7,7 mm d<sup>-1</sup> no mês de agosto, 1,1 mm d<sup>-1</sup> no mês de junho, e 4,4 mm d<sup>-1</sup> no mês de julho.

**Figura 11:** Gráfico com os valores de evapotranspiração em mm d<sup>-1</sup>, dos modelos SEBAL, SSEBop, Kc-NDVI e razão de Bowen gerados por Lopes et al. (2019).



Observando a Figura 11 pode-se observar que o valor obtido por Lopes et al. (2019) no mês de agosto foi superior aos do presente estudo, sendo em média 56% superior ao calculado pelo SSEBop; 84% superior ao calculado pelo SEBAL e 70 % superior ao calculado pela equação Kc-NDVI. E inferior no mês de junho, em geral 69% inferior aos valores calculados no presente estudo. Essas diferenças podem ser explicadas pela diferença na data de plantio, possível diferença no manejo da cultura e no tipo de solo. Sendo 20 de junho no

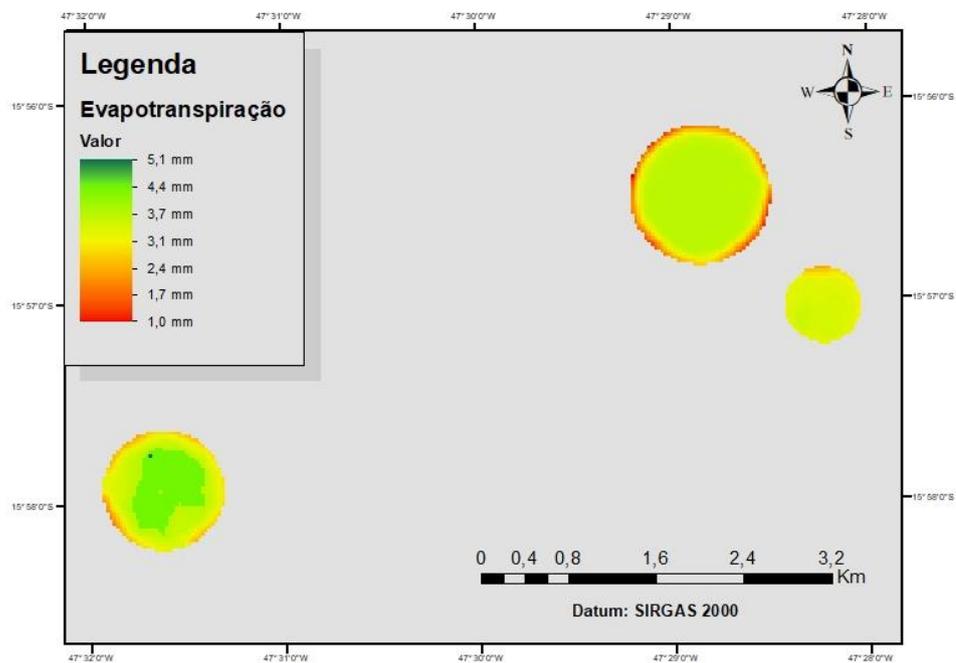
trabalho de Lopes et al. (2019) e início de maio no presente estudo, tendo conseqüentemente, diferença no estágio de desenvolvimento da cultura. Em junho a cultura do trabalho de Lopes et al. (2019) estava em estágio inicial de desenvolvimento, apresentando valores de evapotranspiração inferiores, e no mês de agosto a cultura do presente estudo estava em início de senescência, período pré-colheita, diferente da cultura desenvolvida por Lopes et al. (2019), que estava em pleno estágio de desenvolvimento, apresentando valores superiores de evapotranspiração.

Rosário (2019) estimou um valor médio de evapotranspiração total da cultura do trigo (BRS394), através do modelo SIMDUALKC, na mesma região do presente estudo, igual a 385,5 mm. Observou uma evapotranspiração da cultura em torno de 2,4 mm d<sup>-1</sup> no mês de junho, no geral 32% inferior ao calculado pelo presente estudo, 4,0 mm d<sup>-1</sup> no mês de julho, em média 17% superior ao SSEBop; 3% inferior ao SEBAL e 28% superior a equação Kc-NDVI, 5,8 mm d<sup>-1</sup> em agosto, em média 17% superior ao SSEBop; 38% superior ao SEBAL e 28% superior a equação Kc-NDVI, de novo a diferença observada é explicada pela diferença no estágio de desenvolvimento.

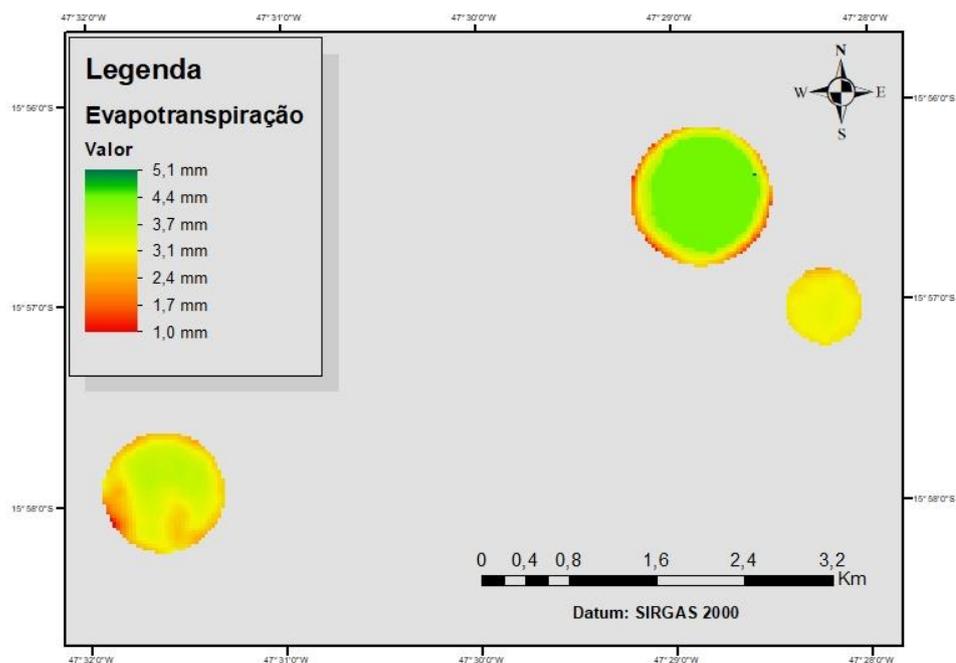
O trabalho de Guerra et al. (2003), avaliou a necessidade hídrica do trigo cultivado no inverno, na região do cerrado, através do método de lisímetros de pesagem. Onde foi obtido o valor máximo de evapotranspiração igual a 6,2 mm d<sup>-1</sup>. Superior aos valores observados pelo presente estudo.

Fazendo uma análise dos mapas de evapotranspiração, Figuras 12, 13 e 14, pode-se perceber que mesmo estando em uma mesma região, existe uma variação na evapotranspiração entre os pivôs.

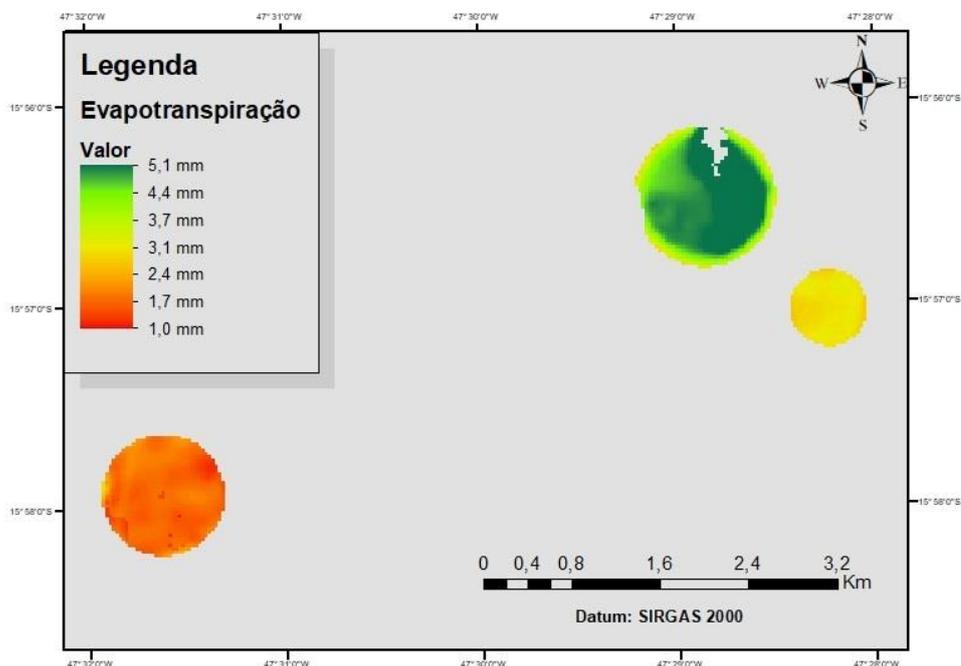
**Figura 12:** Mapa de evapotranspiração (mm d-1) pelo modelo SSEBop referente a imagem do dia 25 de junho de 2018.



**Figura 13:** Mapa de evapotranspiração (mm d-1) pelo modelo SSEBop referente a imagem de 11 de julho de 2018.



**Figura 14:** Mapa de evapotranspiração (mm d-1) pelo modelo SSEBop referente a imagem do dia 28 de agosto de 2018.

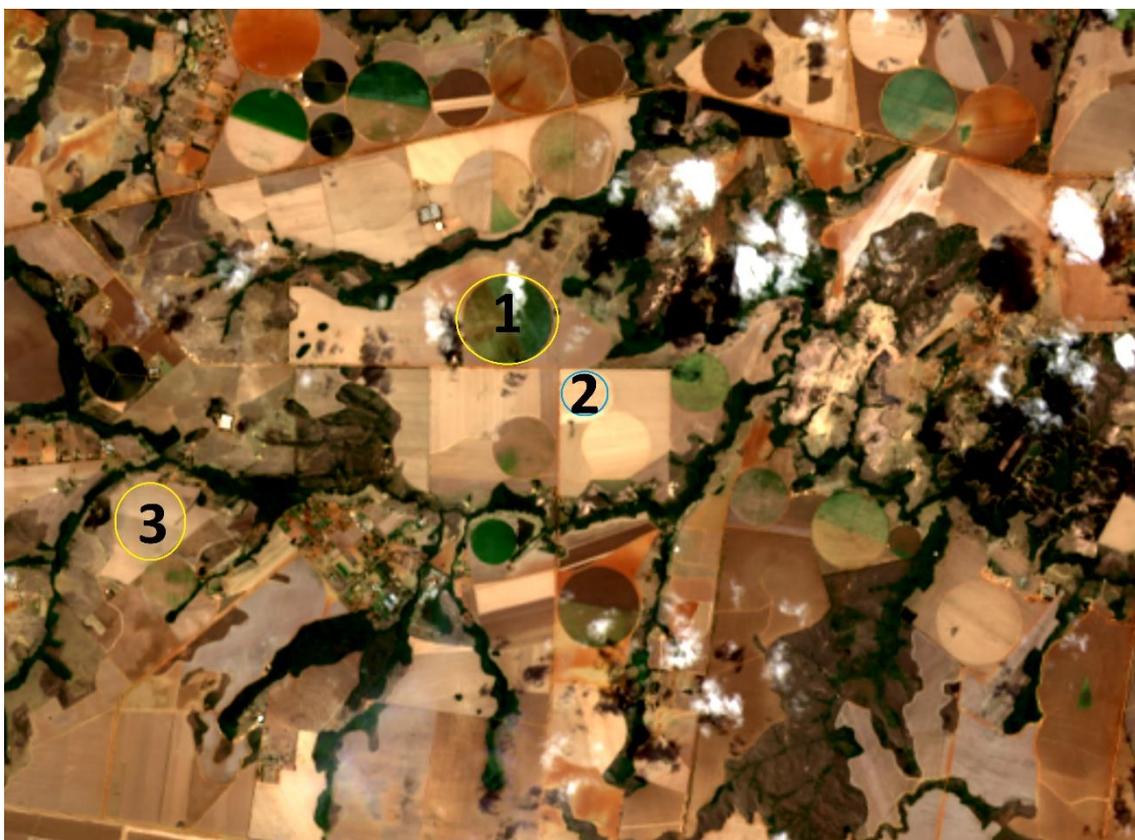


Na Figura 14 é possível observar uma falha no pivô 1, consequência da presença de nuvem na imagem de referência. De acordo com os mapas das Figuras 12, 13 e 14, foi possível observar uma variação espacial da evapotranspiração real do trigo simulada pelo SSEBop. O comportamento da ETr ao longo do ciclo pode estar relacionado ao momento de passagem do satélite, momento da passagem do braço do pivô e às fases de desenvolvimento da cultura, que podem divergir dentro de um mesmo talhão. Em conformidade com Slafer e Rawson (1994), existem três fases no ciclo de desenvolvimento da cultura do trigo, sendo elas: fase vegetativa, que compreende o período desde a germinação até a formação do primeiro duplo anel (primórdio floral); fase reprodutiva, que compreende o período posterior ao vegetativo até a antese (abertura das flores); e a fase de enchimento de grãos, que se estende até a maturação fisiológica.

Houve também uma variação temporal da evapotranspiração real do trigo simulado pelo SSEBop, o pivô 1 apresentou o valor máximo no mês de agosto 5,083 mm.d<sup>-1</sup> e o mínimo no mês de junho, em conformidade com o observado por Lopes et al. (2019); Reis (2019) e Rosário (2019). No entanto, nos pivôs 2 e

3, isso não foi observado, pois ao avaliar visualmente a imagem do Landsat 8, na referida data, foi detectado solo exposto, como pode ser observado na Figura 15, pois a cultura já havia sido colhida

**Figura 15:** Imagem de Landsat adquirida no dia 28 de agosto de 2018.

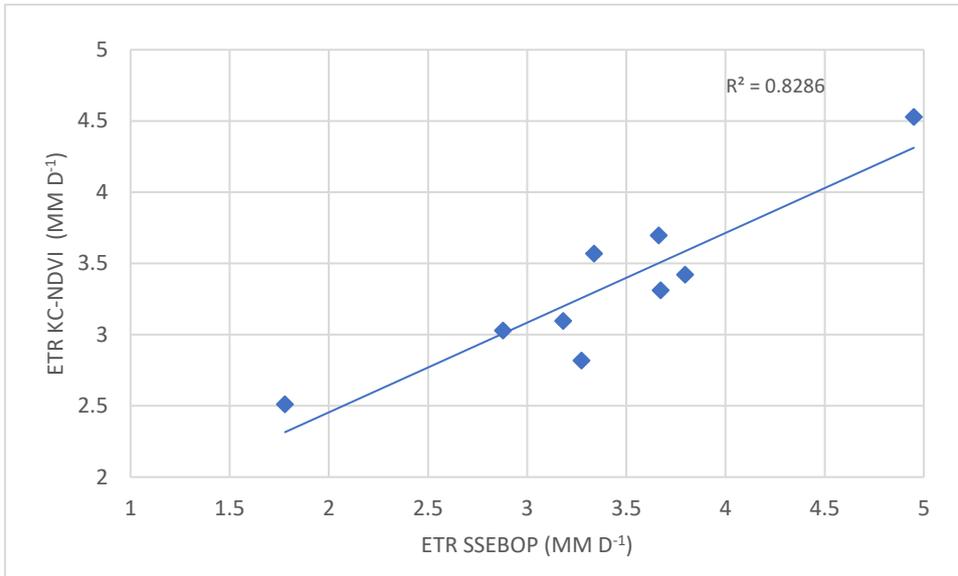


Conforme os dados obtidos no presente estudo, os modelos SSEBop e equação Kc-NDVI, apresentaram resultados semelhantes, apresentando uma alta correlação entre os dados de  $R^2= 0,83$ , (Figura 16). Apesar do Kc-NDVI não levar em consideração a temperatura de superfície do solo ( $T_s$ ), diferente do modelo SSEBop, e considerar apenas o NDVI como base, não houve diferença expressiva entre os resultados. Isso pode ser explicado pelo fato do cultivo estar no sistema de pivô-central, considerando não haver estresse hídrico, não alterando pontualmente a  $T_s$ , o que não seria refletido no NDVI, resultando em valores semelhantes por ambos os modelos.

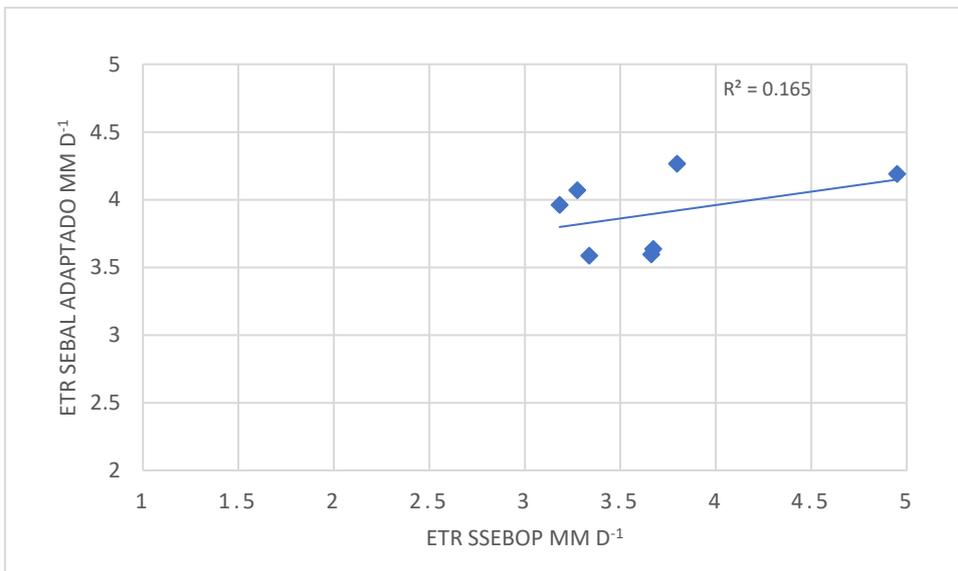
Em contrapartida, os modelos SSEBop e equação Kc-NDVI apresentaram baixa correlação com o modelo SEBAL adaptado ( $R^2=0,16$ ;  $R^2=0,01$ ), Figuras 17 e 18. O modelo SSEBop apresentou correlação ligeiramente

superior, o que era esperado tendo em vista a maior similaridade do modelo com o SEBAL adaptado, quando comparado com o da equação Kc-NDVI. A diferença entre os resultados pode ser explicada pela diferença dos dados de entrada no modelo.

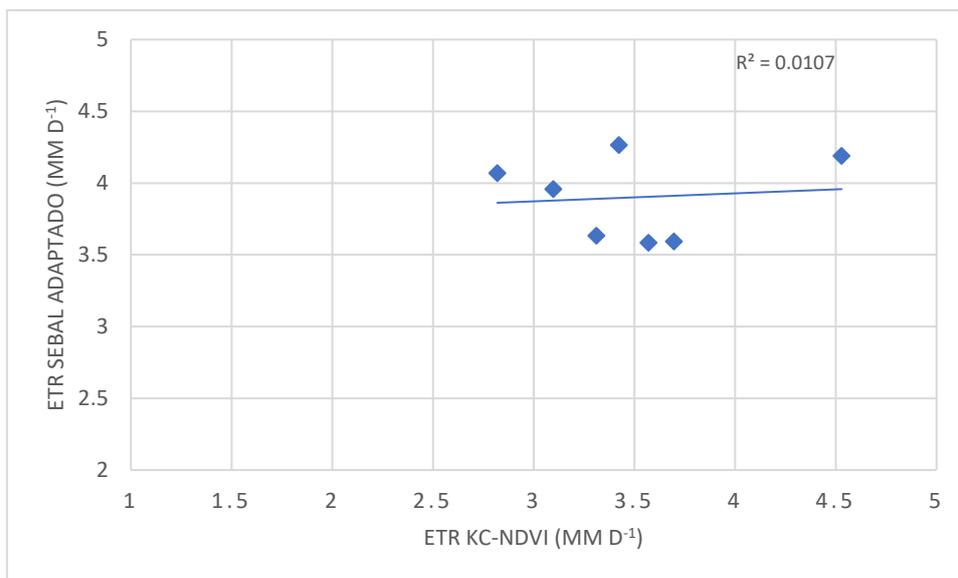
**Figura 16:** Gráfico de dispersão entre os dados de evapotranspiração (mm d<sup>-1</sup>) gerados pelo modelo SSEBop e a equação Kc-NDVI.



**Figura 17:** Gráfico de dispersão entre os dados de evapotranspiração (mm d<sup>-1</sup>) gerados pelos modelos SEBAL adaptado e SSEBop.



**Figura 18:** Gráfico de dispersão entre os dados de evapotranspiração (mm d<sup>-1</sup>) gerados pelos modelos SEBAL adaptado e Equação Kc-NDVI.



A vantagem do Kc-NDVI é o fato de ser um modelo fácil de ser implementado, com baixa exigência de dados de entrada e baixo custo, quando comparado aos modelos convencionais. Mas existem desvantagens, o modelo usa como base o NDVI, que é um índice que irá refletir falhas de ataque por pragas ao longo do ciclo, falha de adubação e correção, mas que não irá refletir mudanças pontuais na umidade do solo, e em fase inicial de desenvolvimento da cultura, quando o NDVI se apresenta baixo, pode acarretar em subestimativa da evapotranspiração, visto que, solo exposto, implicará em aumento da evaporação (ROSÁRIO, 2019). Além disso, o modelo encontra-se validado apenas para a cultura do trigo no cerrado e caso o produtor queira utilizá-lo em outra cultura, deverá realizar a validação prévia.

Já o modelo SSEBop, é um modelo que também é mais simples de ser implementado e além disso, encontra-se validado para uso nas culturas da soja e do feijão (PAULA, 2018). De acordo com Paula (2018), o modelo apresentou boa correlação com o método da razão de Bowen, tendo obtido  $R^2 = 0,87$  para a soja e  $R^2 = 0,85$  para o feijão. O SSEBop ainda pode passar por modificações, sugerindo métodos mais eficazes de calibração do fator de correção  $c$  e da diferença de temperatura ( $dt$ ) (LOPES et al., 2019).

## 8. CONCLUSÃO

Com isto o presente estudo permite concluir que o modelo SSEBop e o Kc-NDVI, apresentam semelhança na estimativa da evapotranspiração na região do cerrado para o cultivo de trigo irrigado, apresentando resultados próximos aos observados na literatura.

Ainda é necessária a validação por meio de dados de obtidos à campo, na região de estudo. Sendo essa uma sugestão como futura linha de pesquisa.

A escolha dos métodos deve ser baseada nas condições de contorno da região de interesse. A equação Kc-NDVI desenvolvida por Lopes et al. (2019), se apresentou consistente para a cultura do trigo na região descrita, eficiente e de fácil aplicação, sendo uma alternativa promissora aos produtores de trigo da região da bacia do Rio Jardim-DF.

O modelo SSEBop se mostrou uma boa alternativa para estimativa de evapotranspiração na região do cerrado, uma vez que a ferramenta já está disponível online para a comunidade. Entretanto, ainda carece de validação com dados de campo.

## BIBLIOGRAFIA

AKDIM, N.; ALFIERI, S. M.; HABIB, A.; CHOUKRI, A.; CHERUIYOT, E.; LABBASSI, K.; MENENTI, M. Monitoring of irrigation schemes by remote sensing: Phenology versus retrieval of biophysical variables. **Remote Sensing** v. 6, p. 5815–5851, 2014.

ALBUQUERQUE, P. E. P.; DURÃES, F. O. M. **Uso e manejo de irrigação**. Brasília, DF: Embrapa informação Tecnológica, 2008.

ALEXANDRIDIS, T.; CHEMIN, Y. **Irrigation water consumption through remote sensing. Comparison at different scales in Zhanghe irrigation system, China**. *Progress in Water Resources*, p. 59–68, 2001.

ALLEN R. G. **Ref-ET Software**, 1998. Disponível em: <<https://www.uidaho.edu/cals/kimberly-research-and-extensions-center/research/water-resources/ref-et-software>>. Acesso em: 03 set. 2019.

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. Disponível em: <<http://www.climasouth.eu/sites/default/files/FAO%2056.pdf>>. Acesso em: 13 de novembro de 2019.

ALLEN, R.; TASUMI, M.; TREZZA, R.; WATERS, R.; BASTIAANSEN, W. **SEBAL: Surface Energy Balance Algorithms for Land, Idaho implementation**. Idaho: Waters Consulting: University of Idaho: Water Watch, Inc. p. 97, 2002. Disponível em: <<http://www.posmet.ufv.br/wp-content/uploads/2016/09/MET-479-Waters-et-al-SEBAL.pdf>>. Acesso em: 18 de novembro de 2019.

ALLEN, R.G., TASUMI, M., MORSE, A. **Satellite-based evapotranspiration by METRIC and Landsat for western states water management**. U.S. Bureau of Reclamation Evapotranspiration workshop, ft. Collins, CO, p.8-10, 2005. Disponível em: <[https://www.idwr.idaho.gov/Geographicinfo/METRIC/PDFs/allen\\_et\\_al\\_metric\\_summary\\_paper2.pdf](https://www.idwr.idaho.gov/Geographicinfo/METRIC/PDFs/allen_et_al_metric_summary_paper2.pdf)>. Acesso em: 12 de novembro de 2019.

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; MORSE, A. T.; TREZZA, R.; KRAMBER, W.; LORITE, I.; ROBISON, C. W. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC) – Applications. ASCE. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. p. 395-406, 2007a.

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC) – Model. ASCE. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, 133(4), p. 380-394, 2007b.

ANA. **Estudo da ANA aponta perspectiva de aumento do uso de água no Brasil até 2030**, 2019. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/noticias/estudo-da-ana-aponta-perspectiva-de-aumento-do-uso-de-agua-no-brasil-ate-2030>>. Acesso em: 03 set 2019.

ANA. **Atlas de irrigação - uso da água na agricultura irrigada**, 2017a. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/publicacoes/AtlasIrigacao-UsodaAguanaAgriculturalIrigada.pdf>>. Acesso em: 16 de Novembro de 2019.

ANA. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil**, 2017b. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/relatorio-conjuntura-2017.pdf/view>>. Acesso em: 03 set. 2019.

ANA. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil**, 2018. Disponível em: <<http://conjuntura.ana.gov.br/>>. Acesso em: 03 set. 2019.

ANDRADE, R. G.; SEDYAMA, G. C.; BASTITELLA, M.; VICTORIA, D. C.; PAZ, A. R.; LIMA, E. P.; NOGUEIRA, S.F. **Mapeamento de parâmetros biofísicos e da evapotranspiração no Pantanal usando técnicas de sensoriamento remoto**. 2º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Corumbá. Embrapa Informática Agropecuária/INPE, p. 695-704, 2009.

ANTUNES, M.A.H.; ASSAD, E.D.; BATISTA, G.T. Variação das medidas espectrais ao longo do ciclo da soja (Glicine Max (L.) Merrill.). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7, 1993, Curitiba. **Anais...** Curitiba: INPE, p. 1-9, 1993.

BANDARA, K. M. P. S. **Assessing irrigation performance**. Doctoral thesis- Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, p. 172, 2006.

BASTIAANSEN, W. G. M.; ROEST, C. W. J.; PELGRUM, H; ABDEL KHALEK, M. A. Monitoring of the irrigation performance on the basis of actual evapotranspiration: Comparison of satellite data and simulation model results. **Advances in planning, design and management of irrigation systems as related to sustainable land use**, Center for Irrigation Engineering and ECOWARM, Leuven, Belgium, p. 473-483, 1992.

BASTIAANSEN, W.G.M. **Regionalization of Surface Flux Densities and Moisture Indicators in Composite Terrain: A Remote Sensing Approach Under Clear Skies in Mediterranean Climates.** SC-DLO, Wageningen, Netherlands, 1995.

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

BASTIAANSEN, W. G. M.; BOS, M. G. Irrigation performance indicators based on remotely sensed data: a review of literature. **Irrigation and Drainage Systems**, 13, p. 291–311, 1999.

BASTIAANSEN, W. G. M.; MOLDEN, D. J.; AND MAKIN, I. W. Remote sensing for irrigated agriculture: Examples from research of possible applications. **Agricultural Water Management**, 46(2), p. 137–155, 2000.

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

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

BEZERRA, B.G.; SILVA, B.B.; BEZERRA; J.R.C.; BRANDÃO, Z.N. Evapotranspiração real obtida através da relação entre o coeficiente dual de cultura da FAO-56 e o NDVI. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, n.3, p. 404-414, 2010.

CAMPOS, I.; GONSÁLEZ-PIQUERAS, J.; CARRARA, A.; VILLODRE, J.; CALERA, A. Estimation of total available water in the soil layer by integrating actual evapotranspiration data in a remote sensing-driven soil water balance. **Journal of Hydrology**, v. 534, p. 427–439, 2016.

CIRAULO, G.; D'URSO, G.; MINACAPILLI, M. Actual evapotranspiration estimation by means of airborne and satellite remote sensing data. **Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering**, v. 6359, 12 p. 2006.

CLIMATE-DATA.ORG. Classificação do clima do Distrito Federal. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/distrito-federal-204/>>. Acesso em: 26 de novembro de 2019.

CONAB. **A. Cultura do Trigo: Análise dos custos de produção e da rentabilidade nos anos-safra 2009 a 2017**, 2017. Disponível em <conab.gov.br>. Acesso em: 19 de OUT 2019.

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

CUESTA, A.; MONTORO, A.; JOCHUM, A.; LÓPEZ FUSTER, P.; CALERA, A. **Metodología operativa para la obtención del coeficiente de cultivo desde imágenes de satélite**. Proc., 22nd Congreso Nacional de Riegos, Logroño, Spain, 2004.

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

EMATER **Informações agropecuárias do Distrito Federal**, 2017. Disponível em: <[http://www.emater.df.gov.br/wp-content/uploads/2018/06/relatorioatividadesagropecuarias\\_2017.pdf](http://www.emater.df.gov.br/wp-content/uploads/2018/06/relatorioatividadesagropecuarias_2017.pdf)>. Acesso em: 12 de novembro de 2019.

EVANS, R.G. **Center Pivot Irrigation**. Research Report, USDA-Agricultural Research Service: Sidney, MT, USA, 2001.

FERNANDES, E.S. **Sinergia de dados dos satélites Sentinel-2 e Landsat-8 para estimar evapotranspiração de áreas agrícolas na região do cerrado**, 2017. Disponível em: <[http://bdm.unb.br/bitstream/10483/20323/1/2017\\_EduardoDeSouzaFernandes\\_tcc.pdf](http://bdm.unb.br/bitstream/10483/20323/1/2017_EduardoDeSouzaFernandes_tcc.pdf)>. Acesso em: 16 de novembro de 2019.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION – FAO. **FAO statistical pocketbook world food and agriculture**. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome: FAO, p. 231, 2015. Disponível em: <http://www.fao.org/3/a-i4691e.pdf> . Acesso em: 24 de setembro, 2019.

GLENN, E.P.; HUETE, A.R.; NAGLER, P.L.; HIRSCHBOECK, K.K. and BROWN, P. Integrating remote sensing and ground methods to estimate evapotranspiration. **Plant Science**, 26, p. 139-168, 2007.

GONZALEZ-PIQUERAS, J., CALERA, A., GILABERT, M. A. Estimation of crop coefficients by means of optimized vegetation indices for corn. Proc. SPIE, v. 5232, **Remote sensing for agriculture, Ecosystems, and Hydrology** Barcelona, Spain, 110–118, 2004.

GUERRA, A. F., G. C. RODRIGUES, O. C. ROCHA, & W. EVANGELISTA. **Necessidade hídrica no cultivo de feijão, trigo, milho e arroz sob irrigação no bioma Cerrado**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. EMBRAPA Cerrados, Planaltina-DF, Brasil, 2003.

HUETE, A.; LIU, H.; BATCHILY, K.; VAN LEEUWEN, W. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, p. 440–451, 1997.

HUNSAKER, D. J.; PINTER JR., P. J.; KIMBALL, B. A. Wheat basal crop coefficients determined by normalized difference vegetation index. **Irrigation Science**, New York, v.24, p. 1-14, 2005a.

HUNKASER, D. J.; BARNES, E. M.; CLARKE, T. R.; FITZGERALD, G. J.; PRINTER JR., P. J. Cotton irrigation scheduling using remotely sensed and FAO-56 basal crop coefficients., **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v.48, n.4, p. 1395-1407, 2005b.

HUNSAKER, D. J.; FITZGERALD G. J.; FRENCH, A. N.; CLARKE T. R.; OTTMAN M. J.; PRINTER JR. P. J. Wheat irrigation management using multispectral crop coefficients: I Crop evapotranspiration prediction. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 50, n. 6, p. 2017-2033, 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Indicadores IBGE, 2014.** Disponível em: [ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao\\_Agricola/Levantamento\\_Sistematico\\_da\\_Producao\\_Agricola\\_\[mensal\]/Comentarios/lspa\\_201402comentarios.pdf](ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistematico_da_Producao_Agricola_[mensal]/Comentarios/lspa_201402comentarios.pdf)>. Acesso em: 12 de novembro de 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Levantamento sistemático da produção agrícola.** Rio de Janeiro, v. 30, n.2, p. 1-83, 2017. Disponível em: [ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao\\_Agricola/Levantamento\\_Sistematico\\_da\\_Producao\\_Agricola](ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistematico_da_Producao_Agricola)

[o\\_Agricola\\_Imensal/Fasciculo/lspa\\_201709.pdf](#). Acesso em: 24 de setembro, 2019.

KALMA, J.D.; MCVICAR, T.R. and MCCABE, M.F. Estimating land surface evaporation: a review of methods using remotely sensed surface temperature data. **Surveys in Geophysics**, 29, p. 421-469, 2008.

KAMBLE, B.; IRMAK, A.; HUBARD, K. Estimating crop coefficients using remote sensing-based vegetation index. **Remote Sensing**, 5, 1588–1602, 2013.

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

LANDAU, E. C.; GUIMARAES, D. P.; REIS, R.J. **Mapeamento das áreas irrigadas por pivôs centrais no Estado de Goiás e no Distrito Federal-Brasil**, 2013. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/974474/mapeamento-das-areas-irrigadas-por-pivos-centrais-no-estado-de-goias-e-no-distrito-federal-brasil>> Acesso em: 30 de Outubro de 2019.

LI, Z.L. et al. **A review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation from remotely sensed data. Sensors 9**, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3390/s90503801>> Acesso em 21 de outubro de 2019.

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

LIMA, J.E.F.W.; SANO, E.E.; EVANGELISTA, B.A.; LOPES, T.S.S. **Monitoramento de área irrigada por pivô-central no cerrado em 2013 como subsídio à gestão integrada dos recursos hídricos**, 2013. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/cerrados/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/3670/mapeamento-da-area-irrigado-por-pivo-central-no-cerrado>>.

Acesso em: 16 de Novembro de 2019.

LIMA, J.E.F.W. e FERRAZ, L. **Evolução da área irrigada por pivô central no Distrito Federal**, 2018. Disponível em: <<http://www.codeplan.df.gov.br/wp-content/uploads/2018/03/Bras%C3%ADia-em-Debate-18.pdf>>. Acesso em: 16 de Novembro de 2019.

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, p. 6930-6947, 2019.

LÓPEZ-URREA, R.; MONTORO, A.; GONZÁLEZ-PIQUERAS, J.; LÓPEZ-FUSTER, P.; FERERES, E. Water use of spring wheat to rise water productivity. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 96, p. 1305-1310, 2009.

LOURENÇO, R.W.; LANDIM, P.M.B. Estudo da variabilidade do “Índice de vegetação por diferença normalizada/NDVI” utilizando krigagem indicativa. **Holos environment**, v.4, n.1, p.38-55, 2004.

MACHADO, C. C.; SILVA, B.B.; ALBUQUERQUE, M.B. e GALVINCIO, 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.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - MAPA **Plano de irrigação**, 2016 Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/camaras-setoriais-tematicas/documentos/camaras-tematicas/agricultura-sustentavel-e-irrigacao/ano/plano-de-irrigacao-mapa-28.pdf/view>>. Acessado em: 14 de novembro de 2019.

Martins, D.S., Paulo, A.A., Rosa, R., Pereira, L.S. **Análise da variabilidade espacial e temporal das secas utilizando índices combinando precipitação e evapotranspiração: Sc-PDSI E Sc-MedPDSI**, 2015. Disponível em: <<http://idl.campus.ciencias.ulisboa.pt/wp-content/uploads/2016/11/Livro-2.pdf>>. Acesso em: 13 de novembro de 2019.

MENENTI, M. Remote sensing in hydrology and water management, **Irrigation and drainage**, Springer, Berlin, p. 377–400, 2000.

MINACAPILLI, M.; AGNESE, C.; CAMMALLERI, C.; CIRAOLO, 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 Science**, v. 13, n. 7, p. 1061–1074, 2009.

NORMAN, J.M.; KUSTAS, W.P. and HUMES, K.S. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. **Agriculture and Forest Meteorology**, p. 263-293, 1995.

PAIVA, C. M. **Estimativa do balanço de energia e da temperatura da superfície via satélite NOAA-AVHRR**. Tese (Doutorado em Ciência em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro- COPPE. Rio de Janeiro, p. 218, 2005.

PAULA, A.C.P. **Estimativa da evapotranspiração real da cultura da soja e do feijoeiro pelo método da razão de Bowen e pelo modelo SSEBop**. Dissertação de mestrado em agronomia, Universidade Federal de Brasília, 2018.

PROFETA, A. L. **Estimativa Da Evapotranspiração Real Em Área De Relevo Acidentado utilizando o SEBAL, 2017**. Disponível em: <[http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/IGCM-AV4MJT/dissertacao\\_andreluizprofeta.pdf?sequence=1](http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/IGCM-AV4MJT/dissertacao_andreluizprofeta.pdf?sequence=1)>. Acesso em: 09 de novembro de 2019.

RAFN, E.B.; CONTOR, B.; AMES D.P. Evaluation of a method for estimating irrigated crop-evapotranspiration coefficients from remotely sensed data in Idaho. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, p. 722–729, 2008.

REIS, K.A. **Estimativa de evapotranspiração pelo modelo SEBAL adaptado para cultura do trigo na região do cerrado**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em agronomia) - Faculdade de agronomia e medicina veterinária, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2019.

ROSÁRIO, C. R. **Consumo de água e componentes da evapotranspiração da cultura do trigo em diferentes cenários climáticos: uma aproximação ao modelo SIMDUALKC**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria \_RS, 2019.

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.

SCHOTT, J. R. **Remote sensing: The image chain approach**. Rochester Institute of Technology. Oxford University Press, 2007.

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

SENAY, G. B.; 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. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 49, p. 577–591, 2013.

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

SENAY, G. B. et al. Satellite-based water use dynamics using historical Landsat data (1984-2014) in the southwestern United States. **Remote Sensing of Environment**, v. 202, p. 98-112, 2017.

SENAY, G.B. Satellite psychrometric formulation of the Operational Simplified Surface Energy Balance (SSEBop) Model for quantifying and Mapping Evapotranspiration. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 34, n.3, p. 555-566, 2018.

SHUKLA, J.; MINTZ, Y. Influence of Land-Surface Evapotranspiration on the Earth's Climate. **Science**, v. 215, p. 1498-1502, 1982.

SILVA, E.M.; AZEVEDO, J.A. **Dimensionamento da lateral de irrigação do pivô central**. Planaltina: Embrapa-CPAC, 1998.

SILVA, B. B.; BEZERRA, M. V. C. Determinação dos componentes do balanço de energia à superfície com técnicas de sensoriamento remoto e dados de superfície. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia. **Anais...** INPE, 2005. São José dos Campos, p. 3325-3332, 2005.

SIMONNEAUX V.; DUCHEMIN B.; HELSON D.; ERRAKI S.; OLIOSO A.; CHEHBOUNI A. G. The use of high-resolution image time series for crop classification and evapotranspiration estimate over an irrigated are in central

Morocco. **International Journal of Remote Sensing**, Abingdon, v. 29, n. 1, p. 95-116, 2008.

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

SMITH, M.; SEREGEN, A.; PEREIRA, L. S.; ALLEN, R. G. **Report the expert consultation on procedures for revision of crop water requirements**. Roma: IT: FAO, p. 45, 1991.

SSEBop<sup>BR</sup> EVAPOTRANSPIRATION **Manual de funcionamento e uso do software** Disponível em: <<https://ssebop.users.earthengine.app/view/ssebop>>. Acesso em: 16 de novembro de 2019.

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

TASUMI, M.; ALLEN, R. G.; TREZZA, R. **Calibrating satellite-based vegetation indices to estimate evapotranspiration and crop coefficients**. Proc., USCID Water Management Conf., Denver, Colo, 2006.

TEIXEIRA, A. H. C. Determining regional actual evapotranspiration of irrigated and natural vegetation in the São Francisco river basin (Brazil) using remote sensing a Penman-Monteith equation. **Remote Sensing**, v. 2, n. 5, p. 1287–1319, 2010.

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

TESTEZLAF, R.; MATSURA, E.E.; CARDOSO, J.L. **A importância da irrigação no desenvolvimento do agronegócio**. FEAGRI/UNICAMP, p.45, 2002. Disponível em: <<http://www2.feis.unesp.br/irrigacao/csei.pdf>>. Acesso em: 13 de novembro de 2019.

THORNTHWAITTE, C. W. An Approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, New York, v. 38, p. 55-94, 1948.

VAN DE GRIEND, A. A.; OWE, M. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. **International Journal of Remote Sensing**, v. 14, n. 6, p. 1119-1131, 1993.

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.

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

ZHAO, L. et al. Evapotranspiration estimation methods in hydrological models. **Journal of Geographical Sciences**, v. 23, p. 359-369, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11442-013-1015-9>>. Acesso em: 21 de outubro de 2019.