



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA – PPGA/UnB

**ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO UTILIZANDO
IMAGENS MULTIESPECTRAIS E TERMAIS OBTIDAS POR
VANTS NA CULTURA DO MILHO VERDE IRRIGADO**

ANDREY ARAUJO MENEZES DA SILVA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM AGRONOMIA

Brasília - DF
2025



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA – PPGA/UnB

**ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO UTILIZANDO
IMAGENS MULTIESPECTRAIS E TERMAIS OBTIDAS POR
VANTS NA CULTURA DO MILHO VERDE IRRIGADO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Agronomia da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília como requisito para a obtenção do título de Mestre em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. João José da Silva Junior

Brasília - DF
2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Cessão de direitos

Nome do Autor: Andrey Araujo Menezes Da Silva

Título: Estimativa da evapotranspiração utilizando imagens multiespectrais e termais obtidas por vants na cultura do milho verde irrigado

ANDREY ARAUJO MENEZES DA SILVA

**ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO UTILIZANDO
IMAGENS MULTIESPECTRAIS E TERMAIS OBTIDAS POR
VANTS NA CULTURA DO MILHO VERDE IRRIGADO**

Banca Examinadora:

Prof. Dr. João José da Silva Junior

(Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária/UnB – Orientador)

Prof. Dr. Filipe Bittencourt Machado de Souza

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

Profa. Dra. Marina Rolim Bilich Neumann

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

Dr. Rodrigo Moura Pereira

(Examinador Externo)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por sempre estar ao meu lado e por continuar cumprindo suas promessas em minha vida, por ter me dado oportunidade, provisão e força para conduzir o mestrado nesses dois anos.

Aos meus pais Denis Menezes e Andrea Menezes por todo amor, esforço, cuidado e ensinamentos de valores. Ao meu irmão Lineker Menezes por ser minha referência junto ao meu pai. À minha irmã, Isabella Menezes por todo amor e companheirismo. Aos meus cunhados Heng e Gabi, que me deram a oportunidade de ser tio de três princesas (Heloísa, Helena e Lavínia).

Às minhas avós Noemia (Eme) e Eliene (Léla) por todo amor e orações.

Um agradecimento especial ao Capitão Moraes (Pr. Ailton), um homem íntegro e digno de honra, por me presentear, em 2007, com uma medalha que até hoje me inspira a buscar ser uma pessoa melhor a cada dia. À sua esposa, Pra. Rosa, pelo carinho e cuidado com nossa família.

À minha eterna orientadora, professora, amiga e mentora de vida Marina Bilich que sempre acreditou no meu potencial e me incentivou para o meu crescimento pessoal e profissional, sou muito grato por todos os ensinamentos.

Ao meu orientador João José pelos ensinamentos e confiança depositada durante esses anos, pela oportunidade de trabalhar em projetos grandes e promissores, e por todas as nossas conversas.

Ao Dr. Rodrigo Moura, que durante esse tempo virou um grande amigo, agradeço pela disposição e paciência em me ensinar e aconselhar.

A FAP-DF por financiar o projeto “Agro Learning” o qual tive a oportunidade de acompanhar e que me capacitou ainda mais na área.

Ao Sr. Martinho por ter aberto as porteiras da Fazenda Riacho Frio para que esse trabalho acontecesse, agradeço também aos funcionários da fazenda.

Aos colegas que de alguma forma contribuíram com esse trabalho, Maurício, Murillo, Guilherme, Bruno Henrique e Daniel.

À Universidade de Brasília pelas oportunidades e conhecimento.

“Porque sou eu que conheço os planos que tenho para vocês -declara o Senhor- “Planos de fazê-los prosperar, não de causar dano, planos de dar a vocês esperança e um futuro”.

JEREMIAS 29:11

ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO UTILIZANDO IMAGENS MULTIESPECTRAIS E TERMAIS OBTIDAS POR VANTS NA CULTURA DO MILHO VERDE IRRIGADO

RESUMO

O entendimento da variação temporal e espacial da evapotranspiração, componente fundamental do ciclo hidrológico e do balanço hídrico, auxilia na gestão dos recursos hídricos e no manejo de irrigação em sistemas agrícolas. Em um cenário de constante aumento da demanda por alimentos e consequente expansão de novas áreas agrícolas irrigadas, o monitoramento torna-se ainda mais relevante. Nessa perspectiva, nas últimas décadas, diversos modelos, que utilizam sensoriamento remoto, foram estudados e desenvolvidos, se apresentando como uma alternativa promissora para determinação da evapotranspiração. Dessa maneira, o uso de câmeras ou sensores de alta resolução acoplados em veículos aéreos não tripulados (VANT's) tem ganhado notoriedade para a aquisição de dados em lavouras. Sendo assim, o presente trabalho teve como objetivo principal avaliar a estimativa da evapotranspiração real na cultura do milho verde irrigado, utilizando VANT's equipados com sensores multiespectrais e termais, comparando o desempenho dos modelos SSEBop e DATTUTDUT. O experimento foi conduzido em um pivô central de milho verde na fazenda Riacho Frio, localizada na região do PAD/DF, durante o ciclo da cultura, foram realizados voos semanais com VANTs para a aquisição de imagens, além da coleta de dados meteorológicos. As imagens obtidas passaram por processamento e avaliação posterior. Os resultados obtidos pelos modelos foram comparados a evapotranspiração determinada pelos métodos padrões da FAO, com dados obtidos em campo. A análise de desempenho do modelo SSEBop apontou um coeficiente de correlação $r = 0,87$ e $0,82$ indicando um bom desempenho. O modelo DATTUTDUT apresentou valores de $r = 0,86$ e $0,87$ mostrando também um desempenho satisfatório. Os resultados apontaram que o modelo DATTUTDUT para essas condições, apresentou uma melhor precisão na estimativa da evapotranspiração real ao ser comparado ao método padrão da FAO, onde seu R^2 se mostrou superior.

Palavras-chave: sensoriamento remoto, geoprocessamento, evapotranspiração, milho verde.

EVAPOTRANSPIRATION ESTIMATION IN IRRIGATED GREEN CORN CROP: COMPARISON OF MODELS BASED ON MULTISPECTRAL AND THERMAL IMAGES OBTAINED BY UAVs

ABSTRACT

Understanding the temporal and spatial variation of evapotranspiration, a fundamental component of the hydrological cycle and water balance, helps in the management of water resources and irrigation in agricultural systems. In a scenario of constant increase in the demand for food and consequent expansion of new irrigated agricultural areas, monitoring becomes even more relevant. In this perspective, in the last decades, several models that use remote sensing have been studied and developed, presenting themselves as a promising alternative for determining evapotranspiration. Thus, the use of high-resolution cameras or sensors attached to unmanned aerial vehicles (UAVs) has gained notoriety for data acquisition in crops. Therefore, the present work had as main objective to evaluate the estimation of evapotranspiration in irrigated green corn crops, using UAVs equipped with multispectral and thermal sensors, comparing the performance of the SSEBop and DATTUTDUT models. The experiment was conducted on a central pivot of green corn at the Riacho Frio farm, located in the PAD-DF region. During the crop cycle, weekly flights with UAVs were carried out to acquire images, in addition to collecting meteorological data. The images obtained underwent processing and subsequent evaluation. The results obtained by the models were compared to the evapotranspiration determined by the FAO standard methods, with data obtained in the field. The performance analysis of the SSEBop model showed a correlation coefficient of $r = 0.87$ and 0.82 , indicating good performance. The DATTUTDUT model presented values of $r = 0.86$ and 0.87 , also showing satisfactory performance. The results indicated that the DATTUTDUT model, for these conditions, presented better accuracy in estimating real evapotranspiration when compared to the FAO standard method, where its R^2 was superior.

Keywords: Remote sensing, geoprocessing, evapotranspiration, green corn.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Balanço energético entre superfície e atmosfera.	28
Figura 2. Drone multirrotor.....	32
Figura 3. Asa fixa.....	32
Figura 4. Asa híbrida.....	33
Figura 5. Sensor RGB.....	34
Figura 6. Sensor multiespectral.....	35
Figura 7. Sensor termal.....	37
Figura 8. Sensor LiDAR.....	38
Figura 9. Mapa de localização da área de estudo, Distrito Federal.....	40
Figura 10. Fluxograma de atividades.....	43
Figura 11. Plugin QWater Model - Qgis.....	50
Figura 12. Variação da evapotranspiração Real (ET _r) obtida pela estação.....	52
Figura 13. Evolução do NDVI na cultura do milho verde ao longo do ciclo.....	53
Figura 14. Gráfico de valores médios do NDVI ao longo do ciclo.....	53
Figura 15. Dados de irrigação do pivô.....	55
Figura 16. Correlação entre os métodos de K _c	56
Figura 17. Estimativa da evapotranspiração real da cultura pelos métodos de K _c	57
Figura 18. Correlação entre os resultados de ET _{creal}	58
Figura 19. Correlação entre ET _{creal} FAO e a umidade do solo.....	59
Figura 20. Correlação entre ET _{creal} K _c NDVI e a umidade do solo.....	59
Figura 21. Variação espacial e temporal da ET _{rSSEBop} ao longo do ciclo da cultura do milho verde.....	60
Figura 22. Gráficos com valores obtidos pela ET _{rSSEBop}	61
Figura 23. Correlação entre a ET _{rSSEBop} e a ET _{creal} (K _c NDVI).....	62
Figura 24. Correlação entre a ET _{rSSEBop} e a ET _{creal} (FAO).....	63
Figura 25. Variação espacial e temporal da ET _{rDATTUTDUT} ao longo do ciclo da cultura do milho verde.....	64
Figura 26. Gráficos com valores obtidos pela ET _{rDATTUTDUT}	65
Figura 27. Correlação entre a ET _{rDATTUTDUT} e a ET _{creal} (K _c NDVI).....	66
Figura 28. Correlação entre a ET _{rDATTUTDUT} e a ET _{creal} (FAO).....	67
Figura 29. Correlação entre a ET _{rSSEBop} e a ET _{rDATTUTDUT}	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Métodos de estimativa da evapotranspiração.	23
Tabela 2. Modelos de estimativa de evapotranspiração que utilizam sensoriamento remoto. ...	25
Tabela 3. Informações de voo (Trinity Pro).....	41
Tabela 4. Especificações da câmera (Altum-PT).....	42
Tabela 5. Datas dos voos realizados durante o experimento.....	42
Tabela 6. Equipamentos utilizados no experimento	50
Tabela 7. Dados do NDVI obtidos ao longo do ciclo.....	54
Tabela 8. Kc da cultura do milho verde.....	56
Tabela 9. Evapotranspiração Real da Cultura (ETcreal).....	57
Tabela 10. Valores obtidos pela $ET_{r_{SSEBop}}$	61
Tabela 11. Valores obtidos pela $ET_{r_{DATUTDUT}}$	65

ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ET	Evapotranspiração
ETc	Evapotranspiração de cultura
ETcreal	Evapotranspiração real de cultura
ETf	Fração evapotranspirativa
ETo	Evapotranspiração de referência
Etp	Evapotranspiração potencial
ETr	Evapotranspiração real
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
G	Fluxo de calor no solo
H	Fluxo de calor sensível
IAF	Índice de área foliar
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
Kc	Coeficiente de cultivo
LE	Fluxo de calor latente
METRIC	Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
P	Pressão atmosférica
Pa	Densidade do ar
PAD-DF	Programa de Assentamento Dirigido do Distrito Federal
Rn	Saldo de radiação
SEBAL	Surface Energy Balance Algorithm for Land
SSEB	Simplified Surface Energy Balance
SSEBop	Operational Simplified Surface Energy Balance
T	Temperatura
Ta	Temperatura do ar

T_h	Temperatura de superfície estimada para a condição de pixel quente
T_{max}	Temperatura máxima do ar
T_s	Temperatura da superfície
u	Velocidade do vento
UR	Umidade relativa do ar
z	Altitude local
Δe_a	Diferença da pressão real de vapor
ΔT	Diferença de temperatura
λ	Calor latente de vaporização da água

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVO	18
2.1 Objetivos específicos	18
3. REVISÃO DE LITERATURA	19
3.1 Evapotranspiração (ET)	19
3.1.1 Evapotranspiração de referência (ET _o):.....	20
3.1.2 Evapotranspiração da cultura (ET _c):.....	20
3.1.3 Evapotranspiração Real (ET _r).....	21
3.2 Métodos e modelos de estimativa de evapotranspiração	21
3.2.1 Sensoriamento remoto para estimativa de evapotranspiração.....	23
3.3 Balanço de energia	26
3.4 Balanço hídrico climatológico	28
3.5 Uso de vants na agricultura.....	29
3.5.1 Drone multirrotor	31
3.5.2 Asa fixa	32
3.5.3 Drones híbridos	33
3.6 Tipos de sensores	33
3.6.1 Sensor RGB.....	34
3.6.2 Sensor multiespectral	35
3.6.3 Sensor termal.....	36
3.6.4 Sensor lidar	37
3.7 Milho verde	38
4. MATERIAL E MÉTODOS	39
4.1 Localização e caracterização da área de estudo	39
4.2 Etapas do experimento	41
4.3 Dados meteorológicos de entrada	43
4.4 NDVI	44
4.5 Evapotranspiração da cultura (ET _c).....	45
4.6 Modelo SSEBop.....	46
4.7 Modelo DATTUTDUT	48
4.8 Equipamentos utilizados no experimento	50
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
5.1 Evapotranspiração real (ET _r) obtida por dados da estação	52
5.2 NDVI	52
5.3 Dados de irrigação do pivô	55
5.4 Evapotranspiração Real da cultura (ET _{real})	56
5.5 Resultados do modelo SSEBop.....	60

5.6	Análise de desempenho do modelo SSEBop	62
5.7	Resultados do modelo DATTUTDUT	64
5.8	Análise de desempenho do modelo DATTUTDUT.....	66
6.	CONCLUSÕES	69
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o crescimento populacional acelerado tem impulsionado a demanda mundial por alimentos. Em 2050, segundo dados da FAO (2022), estima-se que a população mundial alcance entre 9 a 10 bilhões de pessoas, conseqüentemente exigindo que a produção de alimentos seja o dobro da atual para suprir a necessidade populacional (RAGAB, 2015). Neste contexto, é de suma importância garantir a segurança de futuras gerações, levando em consideração o uso sustentável dos recursos hídricos.

A água é indispensável para nossa sobrevivência e com crescimento populacional é de extrema importância a aplicação de estratégias mitigatórias direcionadas a seu uso sustentável em âmbito mundial, para que ocorra o desenvolvimento econômico com a finalidade de sustentar as futuras gerações (DING & GHOSH, 2017).

A agricultura, por sua vez, desempenha um papel crucial no abastecimento alimentar do mundo, sendo o setor que mais demanda água, de acordo a FAO (2017), cerca de 70% do uso da água doce mundial é atribuída a essa atividade, atualmente 23% das áreas cultivadas no mundo são irrigadas (PORTMANN et al., 2010). De acordo BRAGA (2010), a irrigação por sua finalidade é responsável por fornecer água para uma cultura para que produza em conformidade, atendendo, assim, suas necessidades hídricas.

Atualmente, o Brasil está entre os 10 países com as maiores áreas agrícolas irrigadas do mundo, possuindo cerca de 8,2 milhões de hectares, sendo que deste total 64% utilizam água de mananciais e 35,5% adota a fertirrigação com água de reuso (FAO, 2017; ANA, 2020). Estudos indicam que o Brasil possui um grande potencial para a ampliação de suas áreas agrícolas irrigadas, cerca de 22% da área agrícola Brasileira podem ser irrigadas, elevando consideravelmente os valores atuais (ANA, 2020).

Conforme estudos de ASSUNÇÃO (2018), o tratamento de uma base de dados georreferenciada da rede de distribuição de energia elétrica do Brasil, é crucial para analisar o potencial de expansão da agricultura irrigada do país. Com isso o poder público toma conhecimento sobre a implantação de avaliação e ramificação de novas redes elétricas distribuídas em todo território nacional, propiciando uso sustentável de água no meio rural.

Nesse contexto MAULE (2020), ressalta que a difusão da agricultura irrigada conta com aplicação de políticas públicas direcionadas ao planejamento e gestão estratégica com foco na espacialização do território, investigação de impactos, capacidade

de expansão e tomadas de decisões para contribuição de uma agricultura irrigada limpa e sustentável.

No entanto, a expansão das áreas agrícolas irrigadas não deve se basear exclusivamente no maior consumo de recursos hídricos. Esse avanço desejado é cada vez mais dependente da eficiência dos sistemas já existentes e em operação, representando um dos principais desafios da agricultura irrigada (RODRIGUES, 2020). Assim, a necessidade de estudos hidrológicos, suas variações espaciais e temporais vem se tornando cada vez mais necessários para um gerenciamento eficiente dos recursos hídricos, visando minimizar os conflitos pelo uso da água (LIMA et al., 2018).

A utilização eficiente dos recursos hídricos é essencial para o equilíbrio da produção e preservação do meio ambiente, dessa forma, quantificar a demanda hídrica das culturas agrícolas é uma ação primordial para que não haja desperdício de água com aplicações além do necessário, além de auxiliar órgãos gestores na avaliação adequada das necessidades de demandas hídricas adequadas, nesse sentido, a estimativa de evapotranspiração é uma ferramenta eficiente capaz de quantificar essa demanda das culturas agrícolas (MALTA, 2020 ; REYES-GONZÁLEZ et al., 2018).

Segundo BASTIAANSEN et al., (2005), compreender as mudanças temporais e espaciais da evapotranspiração é essencial pra a gestão de bacias hidrográficas, já que a água presente nos rios e solos é reduzida devido a transferência para a atmosfera realizada pelas culturas agrícolas irrigadas, de sequeiro e vegetação natural.

A evapotranspiração, somatório da evaporação da água presente na superfície do solo com a transpiração das plantas (ALLEN ET AL.,1998) é um parâmetro de suma importância pois é essencial para planejamento e manejo de irrigação, podemos ter aquisição por métodos diretos e indiretos. A sua aplicação é voltada para estudos meteorológicos, climatológicos e hidrológicos (JENSEN, 1968).

JENSEN et al. (1990) afirma que a equação de Penman-Monteith, é a mais precisa. Posteriormente a Comissão Internacional de Irrigação e Drenagem (ICID) e a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), considerou o método de Penman-Monteith como o padrão de cálculo da evapotranspiração de referência, a partir de dados meteorológicos (ALLEN et al., 1998; SMITH, 1991).

O termo evapotranspiração, descrito por Thornwhaite na década de 40 com o avanço da tecnologia no sensoriamento remoto ganhou força, a utilização dessas ferramentas ficou mais acessível para o auxílio no monitoramento hidrológico e na gestão de recursos naturais (CAMARGO, 2000). A evapotranspiração pode ser estimada através

de modelos que utilizam ou não o sensoriamento remoto, hoje diversos países investem em pesquisas relacionadas a evapotranspiração no intuito de gerenciar da melhor forma a água demandada pela agricultura.

Segundo LAURIN et al. (2018), a estimativa de evapotranspiração com o uso de sensoriamento remoto, como os satélites, em áreas agrícolas de grande escala, permite um planejamento e tomada de decisões mais eficazes sobre o uso e manejo da água, em diferentes escalas em regiões de difícil acesso e com pouca infraestrutura onde a coleta de dados é limitada. Além disso, o sensoriamento remoto se torna uma alternativa viável financeiramente, tendo em vista o custo elevado para aquisição de alguns equipamentos. (JAVADIAN et al., 2019).

No entanto, existem algumas limitações relacionadas às imagens obtidas por satélites em sua aplicação e uso em determinadas regiões, essas limitações incluem interferência atmosférica com cobertura significativa de nuvens, baixa resolução espacial, intervalo temporal limitado, latência de dados, dificultando trabalhos que exigem uma tomada de decisão mais rápidas e precisas (CHANG, 2016; TORRES – SÁNCHEZ 2014).

Uma alternativa que vem crescendo e se desenvolvendo no mundo é a utilização de veículos aéreos não tripulados (VANTs) com sensores acoplados pra a realização de aerolevantamentos para obtenção de imagens e dados com alta resolução e precisão (SIMÕES et al., 2019). Conforme YANG e HOFFMANN (2015), a aplicação dos VANTs é capaz de preencher lacunas deixadas por satélites, mesmo o levantamento convencional de lavouras sendo trabalhoso e demorado, em algumas situações, sua utilização possui diversas vantagens, entre elas pode-se destacar a fácil implantação e operação, disponibilidade de imagens quase em tempo real para avaliação visual, superação de limitações do clima como a presença de nuvens, maior precisão em relação ao alvo e horário de aquisição (SAWAMBO, 2023).

O desenvolvimento dos VANTS surge como uma importante ferramenta para agricultura de precisão, segundo CASTRO (2013), a sua utilização vem sendo favorecida e facilitada pelo grande avanço tecnológico, redução de custos e tamanho dos equipamentos auxiliando na otimização da produção. Alguns autores como CAI et al, (2014) classifica os veículos aéreos não tripulados de acordo com tamanho, peso, velocidade, altitude máxima, duração de voo, modo de decolagem e pouso, além do propósito do uso, vários fatos irão influenciar no objetivo do levantamento, principalmente o sensor, ou payloads, acoplados no equipamento.

2. OBJETIVO

Avaliar a estimativa da evapotranspiração na cultura do milho verde irrigado sob pivô central, utilizando veículos aéreos não tripulados (VANTs) equipados com sensores multiespectrais e termais, comparando o desempenho dos modelos SSEBop e DATTUTDUT na região do PAD/DF.

2.1 Objetivos específicos

Comparar a acurácia dos modelos SSEBop e DATTUTDUT na estimativa da evapotranspiração, relacionando com dados obtidos em campo.

Avaliar o ciclo da cultura através da obtenção do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI).

Avaliar a viabilidade do uso de VANTs para monitoramento da evapotranspiração na cultura do milho verde irrigado no Cerrado.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Evapotranspiração (ET)

A evapotranspiração (ET), termo sugerido por THORNTHWAITE & WILM (1944) ocorre em combinação dos processos de transferência de água a partir do solo por evaporação (E) e da vegetação por transpiração (T) para a atmosfera. A ET é um parâmetro fundamental no ciclo hidrológico em regiões agrícolas, tendo função fundamental na criação e gestão de projetos de irrigação (MARTÍ et al., 2015; ABDULLAH et al., 2015).

Segundo OKI e KANAE, (2006), quase 70% do volume de água precipitado no solo retorna para a atmosfera por meio da evapotranspiração, evidenciando sua grande importância no ciclo hidrológico. Na agricultura essa perda de água para atmosfera chega a cerca de 90% (RANA & KATERJI, 2000).

TEXEIRA, (2018) conceitua a evaporação como processo dinâmico do ciclo hidrológico, em que a água muda do seu estado líquido para vapor. Essa mudança se dá pela entrada de energia no sistema, em virtude da radiação solar, umidade do ar, velocidade do vento e temperatura do ar. A evaporação ocorre devido à força motriz gerada pela diferença de pressão entre a superfície de vaporização e a atmosfera (ALLEN et al., 1998).

A transpiração pode ser definida como um processo de evaporação da água presente nos tecidos das plantas, que é absorvida pelas raízes, transportado via xilema até a folha e sua liberação acontece a partir da abertura de estruturas celulares sensíveis chamadas de estômatos. Essas estruturas celulares são responsáveis por fazer o controle da saída de água para atmosfera, sendo que alguns fatores climáticos, tais como radiação solar, temperatura do ar, umidade e velocidade do vento, bem como características do solo e da planta podem interferir diretamente nesse processo. A transpiração é importante para evitar superaquecimento das folhas. (ALLEN et al., 1998).

Com o entendimento da ET, é possível conhecer as necessidades hídricas das culturas agrícolas irrigadas permitindo que o produtor use a água de forma racional no manejo de irrigação, sem que haja desperdício, mantendo a produtividade em alto nível, pois a planta não sofrerá estresse hídrico. (PAYERO & IRMAK, 2013).

Ao longo dos anos, de acordo com CARVALHO (2011), diversos métodos foram desenvolvidos para a estimativa da ET, três fatores principais são responsáveis por isso: a necessidade de ajuste do método relacionado a condições climáticas de cada região, a

inovação para facilitar a aplicação do método e as restrições do uso de dados meteorológicos e climáticos que são exigidos no processo. A medição da evapotranspiração é a mesma unidade da precipitação de chuva, milímetros (mm). Um milímetro de ET corresponde a um litro de água transferida para atmosfera (FERNANDES et al., 2010).

Segundo as definições de evapotranspiração contidas o manual da FAO, pode-se destacar:

3.1.1 Evapotranspiração de referência (ET_o):

A evapotranspiração de referência (ET_o), parâmetro essencial para o manejo da irrigação, é amplamente utilizada para estimar a demanda hídrica das culturas agrícolas. É definida como a evapotranspiração que ocorre em uma cultura hipotética em pleno desenvolvimento, sem restrições hídricas ou nutricionais, com altura de 0,12 m, albedo de 0,23 e resistência estomática de 70 s m⁻¹. Sua determinação se baseia em variáveis climáticas incluindo radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento, que podem ser obtidas por sensores, tornando sua obtenção viável em diferentes regiões (ALLEN et al., 1998).

Para padronizar essa estimativa, a Food and Agriculture Organization (FAO) estabeleceu o método de Penman-Monteith como padrão (FAO 56), o qual integra componentes termodinâmicos e aerodinâmicos para quantificar a demanda atmosférica de evapotranspiração (PENMAN, 1948).

3.1.2 Evapotranspiração da cultura (ET_c):

A evapotranspiração da cultura (ET_c) refere-se à evapotranspiração de determinada cultura sob condições padrão; condições ideais no controle da evapotranspiração, livre de doença, bem fertilizada, que abrange vasta área, sob condições de umidade de solo ótimas e alcançando a produtividade máxima esperada da cultura. A ET_c difere-se da ET_o, pois representa a evapotranspiração para determinada cultura que possui características intrínsecas. As culturas se diferenciam em valores de albedo e características morfológicas. Para relacionar ET_c e ET_o, há o coeficiente de cultura que representa essas diferenças, sendo $ET_c = K_c \cdot ET_o$. O coeficiente K_c varia ao longo do crescimento de uma cultura, do plantio até a colheita, no caso das culturas anuais

o K_c inicial varia de 0,3 a 0,5, K_c intermediário de 0,8 a 1,2, e o K_c final de 0,4 a 0,7 (ALLEN et al., 1998).

3.1.3 Evapotranspiração Real (ETr)

A evapotranspiração real (ETr) é o processo pelo qual a água é transferida da superfície terrestre para a atmosfera, combinando a evaporação direta do solo e corpos d'água com a transpiração das plantas. (TUCCI et al., 1998). A compreensão precisa da ETr é essencial para a gestão eficiente dos recursos hídricos, especialmente em bacias hidrográficas e áreas agrícolas. Métodos como o balanço de energia na superfície, utilizando algoritmos como o Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL), têm sido empregados para estimar a ETr a partir de imagens de satélite e dados meteorológicos, permitindo uma análise espacial detalhada (PROFETA, 2015).

Conforme abordagem de MOHAN et al., (1996) as variáveis meteorológicas responsáveis por influenciar a evapotranspiração são: precipitação, velocidade do vento, razão de insolação, umidades relativas do ar e temperatura. De maneira geral quanto maior a energia solar, temperatura do ar, velocidade do vento e baixa umidade, consequentemente maior será a taxa de evapotranspiração, desde que a umidade do solo não seja fator limitante (ALLEN et al., 1998).

3.2 Métodos e modelos de estimativa de evapotranspiração

O manejo de irrigação correto começa com uma adequada estimativa de evapotranspiração. De acordo com PIERDONÁ, H. L. et al (2019) existem muitos métodos para a realização da estimativa, desde os mais simples até os mais complexos que apresentam embasamento físico sobre os fenômenos. A escolha do método mais adequado para a estimativa da ET é importante em razão das dificuldades de mensurar diretamente as perdas de água, além de compreender a quantidade necessária a ser aplicada. Essa escolha tem como objetivo obter maior precisão, reduzindo os custos relacionados ao uso da água e energia (DE FRANÇA, 2021).

A estimativa da evapotranspiração pode ser determinada utilizando métodos diretos e indiretos (CUNHA, MAGALHAES & CASTRO, 2013). A estimativa pode ser feita através de base dados meteorológicos e algoritmos que descrevem a energia disponível na superfície coberta por vegetação e as propriedades aerodinâmicas das

plantas, podendo também utilizar princípios físicos de maior complexidade (ALLEN et al. 2011).

Os métodos diretos se destacam pela precisão e são baseados no balanço hídrico do solo, um exemplo desse método são os lisímetros, possuindo diferentes tipos de lisimetria, como os de pesagem, drenagem e lençol freático constante que entregam medições confiáveis da ET (SALES et al., 2017). No entanto, CAVALCANTE JUNIOR et al., (2011) relata que apesar de sua eficácia, esses métodos envolvem frequentemente equipamentos de alto custo e demanda de mão de obra especializada que geralmente inviabiliza sua utilização.

O balanço hídrico e o controle de umidade do solo também se destacam na medida direta, desenvolvido por THORNTHWAITE & MATHER (1955). O balanço hídrico de energia foi criado para determinar regime hídrico de uma região mesmo na ausência de medidas diretas das condições do solo. Essa metodologia considera as entradas e saídas de água no sistema, sendo eficaz na estimativa de evapotranspiração de culturas agrícolas (REICHARDT, 1985).

Os métodos indiretos são amplamente utilizados devido à sua menor complexidade. Eles se baseiam na combinação de dados climáticos e podem incluir equações empíricas que relacionam diferentes variáveis meteorológicas, fórmulas fundamentadas em princípios físico-fisiológicos e dispositivos que medem a evaporação da água (STONE, 1995). Diversas metodologias foram desenvolvidas com o objetivo de melhorar a precisão das estimativas, levando em consideração a disponibilidade de dados e as condições climáticas específicas de cada região.

Esses métodos indiretos possuem alguns modelos que envolvem o uso de dados que podem não estar sempre disponível, tais como alguns parâmetros de entrada como umidade relativa, radiação solar, velocidade do vento (ALBLEWI et al., 2015). Dentre vários modelos, o método de Penman-Monteith é reconhecido mundialmente como o método padrão em estimativa de evapotranspiração de referência (ET_o), após a publicação 56 da Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Esse método é baseado em princípios físicos e pode ser aplicado sem a necessidade de estimativa de parâmetros adicionais, além disso, foi validado e ajustado com dados de ET_o obtidos por diversos lisímetros de drenagem, o que fez esse modelo se consolidar na comunidade científica e ser implementado em diversos softwares (GOCIC, 2010).

Dentre esses métodos de estimativa de evapotranspiração, pode-se destacar os apresentados na **Tabela 1**:

Tabela 1. Métodos de estimativa da evapotranspiração.

MÉTODO	AUTOR	PARÂMETROS
Penman-MonteithFAO (PM-FAO)	Allen et al. (1998)	Tmin, Tmax, URmin, URmax, Rs, v, P
Penman (PEN)	Penman (1948), Yoder et al. (2005)	Tmin, Tmax, Rs, v
Thornthwaite (TW)	Thornthwaite (1948)	Tmin, Tmax
Tanque Classe A (TCA)	Doorenbos & Pruitt (1977), Allen et al. (1998), Barros et al. (2009)	URmin, URmax, v, E
Hargreaves (HG)	Allen et al. (1998), Sousa et al. (2010)	Tmin, Tmax, Tmed
Turc (TC)	Yoder et al. (2005), Trajkovic & Kolakovic (2009), Tabari (2010)	T, UR, Rs
Makkink (MK)	Pereira et al. (1997), Yoder et al. (2005)	Rs, P, T
Camargo (CAM)	Pereira et al. (1997)	F, Ho, ND
Radiação Solar (RS)	Doorenbos & Pruitt (1977), Pereira et al. (1997)	Tmin, Tmax, URmin, URmax, Rs, v
Jensen-Haise (JH)	Pereira et al. (1997), Trajkovic & Kolakovic (2009)	Rs, T
Priestley-Taylor (PT)	Pereira et al. (1997), Sentelhas et al. (2010),	T, P, Rn, G

Rn: saldo da radiação mensal, (MJ m/mês); G: Fluxo de calor no solo, (MJ m/mês); Tmax: Temperatura máxima (°C); Tmin: Temperatura mínima (°C); T: temperatura do ar média (°C); v: Velocidade do vento; Rs: Radiação solar; P: Pressão atmosférica; E: Evaporação; URmin, URmax: Umidade Relativa mínima e máxima.

3.2.1 Sensoriamento remoto para estimativa de evapotranspiração

O sensoriamento remoto, técnica de obtenção de informações de objetos, áreas ou fenômenos à distância sem a necessidade de contato físico direto, se destaca como uma ferramenta bastante utilizada para monitorar a superfície terrestre e vem se mostrando eficaz na coleta de informações do meio ambiente.

Através de sensores em órbita, suborbitais e terrestres, essa tecnologia possui a função de quantificar a energia eletromagnética emitida ou refletida pelos alvos de interesse. A maioria desses sensores utilizam o sol como fonte de energia, com exceção de sensores ativos tais como radares e laser (SCHOTT, 2007).

De acordo com MOREIRA (2011), a energia eletromagnética refletida pelos objetos é influenciada por características físico-químicas e biológicas dos objetos terrestres, assim possibilitando a identificação e diferenciação do alvo por meio da análise dos comprimentos de ondas refletidos.

A popularização dos satélites de monitoramento expandiu o alcance do sensoriamento remoto, aprimorando a maneira de coletar e analisar dados confiáveis em diferentes escalas, até em locais mais remotos. Imagens geradas por sensores multiespectrais são bastante utilizadas para geração de informações detalhadas e precisas em diversos ambientes, contribuindo para análises ambientais complexas (EMBRAPA, 2018).

Quando associado à ferramentas de geoprocessamento, o sensoriamento remoto pode auxiliar na estimativa regional de evapotranspiração, que preenche uma lacuna importante no monitoramento e gestão de grandes áreas, através da união de algoritmos que utilizam processos físicos relacionados ao balanço de energia e radiação solar na superfície (SILVA, 2023).

O aumento da disponibilidade de produtos de sensoriamento remoto gratuitos, combinado com avanços tecnológicos no processamento e análises de dados, tem permitido o avanço de ferramentas computacionais desenvolvidas para mapear a evapotranspiração real (ET_r) em diferentes escalas, abrangendo desde regiões locais até áreas globais (ANA, 2020).

Alguns modelos mais complexos utilizados para estimar a ET_r são inspirados no balanço de energia da superfície, nesse caso, é considerado que a energia disponível da radiação de ondas curtas e longas é equilibrada pelos fluxos de calor da superfície terrestre e pela mudança de fase da água. Essa estimativa da ET_r se baseia na solução total ou parcial do modelo de balanço de energia e na aplicação de abordagens analíticas baseadas em modelos físicos (MCSHANE et al., 2017).

Com o avanço tecnológico, os modelos que utilizam informações remotas para estimar a evapotranspiração, foram categorizados em dois tipos de métodos. O primeiro abrange os métodos empíricos, que utilizam dados de sensoriamento remoto juntamente com informações da superfície terrestre, aplicando funções estatísticas. Já o segundo tipo abrange os métodos analíticos, baseados em princípios físicos, empregando informações obtidas de forma direta ou indireta através do sensoriamento remoto. Esses modelos utilizam equipamentos estacionados na superfície para complementar as análises (LI et al., 2009).

Dentre os modelos que utilizam sensoriamento remoto se destacam os apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Modelos de estimativa de evapotranspiração que utilizam sensoriamento remoto.

MODELO	AUTOR	PARÂMETROS
SEBAL	BASTIAANSSEN et al., 1998	V, ha, VI, Rn, G
SSBOP	SENAY et al., 2013	ETf, K, ETo, Th, Ts, Dt, Ta, Rn, Cp
SEBS	JIA et al., 2003	Tair, ha, v, Ts, Rn, G
SEBI	PELGRUM, 2001	Tpbl, Hpbl, v, Ts, Rn, G
S-SEBI	ROERINK et al., 2000	Ts, Rn, G, As
METRIC	Allen et al., 2007	V, há, Ts, VI, Rn, G
3T model	MANSART et. al	Rn, Rnp, Tc, Tp, Ta
DATTUTDUT	TIMMERMANS et al. 2015	Rn, Sd, Ta, Tr, Ea, E
TSEB	NORMAN et al. 1995	Rn, H, LE, G, Rns, Rnc
TSM	SHAH et al., 2007	TairV, ha, LAI, Ts, Rn, G, FrTc
SIMDualKc	ROSA et al., 2012	Kcb, fewp, fewi, Dep e Dei, Dr, Kcmax, Kei, Kep, W

Tpbl :temperatura do limite da camada terrestre ; *hpbl* : altura do limite da camada terrestre; *v*: velocidade do vento; *Tc*: temperatura do dossel da vegetação; *Ts*: temperatura da superfície; *Rn*: saldo de radiação da superfície; *G*: fluxo instantâneo de calor no solo; *ha*: altura de medição da velocidade do vento e da temperatura do ar; *VI*: o Índice de vegetação; *IAF*: Índice de área foliar; *Fr*: cobertura de vegetação fracionada; *as*: albedo da superfície e; *Tair*: temperatura do ar; *Dr*: valor inicial da depleção na zona radicular; *Fc*: fração do solo coberta pela cultura; *Fw*: fração do solo humedecida pela rega; *Fewi*: fração do solo exposta à radiação e humedecida quer pela rega quer pela precipitação; *W*: coeficiente de ponderação.

Desenvolvido por BASTIAANSSEN et al. (1998), o Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) é um dos modelos mais utilizados no Brasil para análise do balanço energético da superfície. O SEBAL utiliza radiância espectral obtida por sensores de satélites, juntamente com dados meteorológicos. É um modelo que se destaca pela sua capacidade de processar informações através de rotinas computacionais, permitindo estimativas detalhadas e precisas de áreas extensas. O modelo gera dados sobre o balanço de energia pixel a pixel para o momento exato da passagem do satélite a partir do fluxo de calor latente (LE) (BASTIAANSSEN, 1998).

O METRIC (Mapping Evapotranspiration at High Resolution and Internalized Calibration) foi desenvolvido por ALLEN et al. (2007) e possui características e princípios do modelo SEBAL, utiliza princípios similares para determinar a temperatura da superfície a partir da temperatura radiométrica, porém elimina a necessidade de correções atmosféricas da temperatura do ar. Uma das vantagens desse modelo é sua autocalibração para imagens de satélite, que combina dados de evapotranspiração de referência de estações meteorológicas utilizando informações meteorológicas detalhadas em base horaria, resultando em estimativas de alta precisão.

O modelo SSEBop (Operational Simplified Surface Energy Balance) é uma versão aprimorada do SSEB, desenvolvido por SENAY et al. (2013) comparado a outros modelos é considerado como uma alternativa simples por demandar menos dados e ser mais objetivo (ANA, 2020). A principal diferença e inovação do SSEBop está na parametrização do fluxo de calor latente sendo ajustado para cada pixel de acordo com a temperatura. De acordo com SENAY (2013), esse modelo estabelece um valor de referência para o pixel frio com base na temperatura do ar, enquanto o valor para o pixel quente é calculado pela diferença de temperatura, que varia sazonalmente e é específica de cada região.

A aplicação do SSEBop é realizada através de medições de temperatura de superfície e albedo no momento da passagem do satélite, mesmo que o modelo não defina todos os parâmetros do balanço de energia, ele é capaz de resolver as condições do saldo de radiação, assim, permitindo a estimativa da evapotranspiração de referencia (ET_o). Essa capacidade é um dos aspectos que torna o SSEBop um recurso prático e eficaz, capaz de acompanhar e ET em diversas situações.

3.3 Balanço de energia

O balanço de energia ou também conhecido como saldo de energia (Figura 1), é um conceito que descreve a interação dos vários tipos de energia com a superfície e a atmosfera terrestre, como essa energia disponível é distribuída em diferentes processos físicos e sua influência no ambiente. De acordo com PAYERO et al (2003), com o balanço de energia é possível determinar a quantidade de energia disponível para que a evaporação da água e o aquecimento do solo e do ar aconteçam. É uma das formas utilizadas para avaliar respostas dos ecossistemas em relação a fatores ou condições ambientais (Krishnan et al., 2012). Segundo PAIVA (2011), a superfície do solo e oceanos absorve

cerca de 70% da energia solar que entra pelo sistema climático, essa energia é liberada para atmosfera como radiação termal, vapor de água, calor latente e calor sensível.

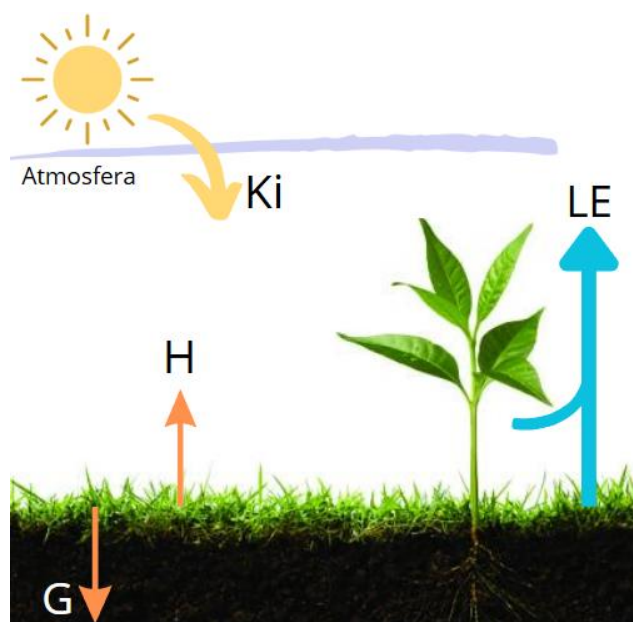
O balanço de energia possibilita a análise das trocas de massa e energia no sistema solo-planta-atmosfera, sendo importante na otimização do uso de recursos naturais na agricultura (LIMA et al., 2011). FONTANA (1991) afirma que esse método permite também a avaliação de alterações no microclima das culturas agrícolas, considerando os estágios de desenvolvimento da cultura e as condições do solo e atmosfera. O uso do balanço de energia vem sendo amplamente estudado em culturas de pequeno porte, tais como os trabalhos de CUNHA (2002) e YOSHIMOTO (2005) que reforçam a eficácia do balanço para eficiência do uso da água.

O fluxo de calor sensível para o ar (H) está relacionado com a energia transportada para a atmosfera por convecção, o fluxo de calor sensível no solo (G) é a quantidade de energia necessária para aquecer e transferir essa energia para níveis mais profundos do solo, já o fluxo de calor latente de evapotranspiração (LE) é a energia transportada para atmosfera em forma de vapor emitido pela evaporação e evapotranspiração, o saldo de radiação (Rn) é a quantidade de radiação disponível para ser convertida em outras energias (PEREIRA, 2002). Assim, estimando os fluxos de calor na superfície, e possível calcular a evapotranspiração, calculado pelo resíduo do balanço de energia expresso pela Equação 1.

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

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).

Figura 1. Balanço energético entre superfície e atmosfera.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4 Balanço hídrico climatológico

O balanço hídrico consiste em quantificar a entrada e saída de água no sistema solo-planta, para isso é necessário computar os valores da quantidade entrada de água no solo por infiltração via precipitação pluvial ou irrigação e as saídas através da evapotranspiração, drenagem interna e deflúvio superficial em uma quantidade de solo, considerando o sistema radicular de uma cultura, em um determinado período de tempo. Desta forma, caso a quantidade de água for maior que a quantidade que sai do sistema em um período de tempo considerado o saldo desse balanço será positivo, e caso seja menor, será negativo, esses saldos serão medidos pela alteração do armazenamento de água no solo (CINTRA e al., 2000; LIBARDI, 1995).

Proposto por THORNTHWAITE & MATHER (1955), o balanço hídrico climatológico (BHC) é um dos métodos mais utilizados e necessita de alguns dados como a precipitação (ET) e da capacidade de água disponível (CAD), dessa forma é possível obter a evapotranspiração real (ET_r), deficiência hídrica (DEF) e excedente hídrico (EXC). Além disso, é uma ferramenta aplicada para embasar tomadas de decisões e para contribuir no zoneamento agroclimático (JESUS, 2015).

Dentro do contexto agroindustrial, o balanço hídrico tem demonstrado grande eficiência, tendo em vista que possibilita a elaboração de planejamentos anuais de plantio,

com ele é possível obter a caracterização de variação sazonal com déficit ou excedentes ao longo do período analisado, atua também como um importante indicador climatológico da disponibilidade de hídrica na região (CARMO et al., 2007).

De acordo com CINTRA (2000), o balanço hídrico é uma ferramenta importante para a identificação de períodos mais prováveis de déficit hídrico que podem impactar no desenvolvimento da cultura, essa importância está associada além de fatores como evapotranspiração, precipitação e drenagem, mas também ao conhecimento de características das plantas como a fenologia, fundamental como base para interpretação dos resultados.

O cálculo do balanço hídrico climatológico normalmente é feito de maneira mais localizada, através de dados climáticos disponíveis em estações específicas, em seguida, para ampliar sua aplicação para grandes áreas, são empregadas técnicas de interpolação espacial com os elementos de saída chamado de “cálculo-interpolação” (LEMOS FILHO et al., 2007).

Atualmente, existem vários modelos que abordam os processos físicos em bacias hidrográficas. Muitos desses modelos possuem interfaces integradas a um Sistema de Informações Geográficas (SIG), modelos os quais muitas vezes exigem uma grande quantidade de informações sobre parâmetros físicos da bacia e dos solos que podem ser gerados com técnicas de SIG (BRESSIANI et al., 2015). Entre os modelos mais utilizados, o Soil and Water Assessment Tool (SWAT), desenvolvido pelo Agricultural Research Service/United States Department of Agriculture (ARS/USDA) dos Estados Unidos se destaca, permitindo simular comportamento de grandes bacias hidrográficas ao longo do tempo em diferentes cenários (NEITSCH et al., 2005), analisa áreas que sofreram impacto do manejo de solo com a quantidade de água, transporte de sedimentos e transporte químico agrícola em escala de tempo diárias, mensais e anuais (ARAGÃO et al., 2013).

3.5 Uso de vants na agricultura

Nos últimos anos a chamada “Agricultura 4.0” vem sendo bastante citada, que de acordo com a FAO (2019), é uma estratégia moderna que combina tecnologias de ponta, análises de dados e tomadas de decisões para aumentar a eficiência, produtividade e a sustentabilidade na agricultura. Para alguns autores, representa um marco na história da produção agrícola, revolucionando a forma de como se pratica agricultura, se baseando

em tecnologias digitais, como internet, inteligência artificial e automação. Esses autores afirmam que a adoção dessas tecnologias contribui significativamente para a produtividade, redução de custos, minimização de impactos ambientais e melhoria na qualidade da cadeia produtiva (GÓMEZ, 2019).

A agricultura 4.0 se destaca em diversos setores, entre eles o uso de sensoriamento remoto, que viabiliza a coleta de dados precisos, em tempo real, do solo, plantas e condições climáticas, sem a necessidade de uma grande quantidade de equipamentos fixos em solo (PEREZ et al. 2020). Segundo DE SOUZA et al (2021), esse setor utiliza tecnologias avançadas para o monitoramento como sensores, drones, sistemas de informação geográfica e inteligência artificial para gerenciar as etapas do cultivo.

De acordo com VIANA (2018), inicialmente, os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT's) foram desenvolvidos para uso militar, tendo resistência e autonomia em diferentes ambientes de difícil acesso humano, mas atualmente o seu uso vem se popularizando no mundo com avanços tecnológicos que permitem desenvolvimento de softwares, sistemas globais de navegação, matérias mais leves e resistentes, adaptação com sensores, além da compactação de aeronaves.

Os VANT's têm se tornado ferramenta indispensável em diversas áreas e na agricultura de precisão vem sendo bastante utilizado. Esse equipamento vem sendo constantemente desenvolvido para diversas funções e se destaca por sua eficiência e redução de custos (DE CASTRO, 2013). O termo "Veículo Aéreo Não Tripulado" inclui diversas aeronaves autônomas e semiautônomas sendo remotamente operadas. Segundo a COBRA- (Confederação Brasileira de Aerodelismo), é definido como: “um veículo capaz de voar na atmosfera, fora do efeito de solo, que foi projetado ou modificado para não receber um piloto humano e que é operado por controle remoto ou autônomo” (COBRA, 2015).

Dentro desse contexto, os drones, termo popular para VANT, tem ganhado popularidade na agricultura e pecuária por sua multifuncionalidade, se tornando um investimento atraente tendo em vista que é capaz de desempenhar diversas funções em regiões rurais com um custo acessível dependendo do modelo, da tecnologia e de sua aplicabilidade (ANTUNES, 2023). Nos últimos anos, os drones tiveram uma rápida evolução, ampliando sua aplicação para áreas não exploradas por essa tecnologia, como o caso da agricultura (GIRALDELLI, 2019).

Os drones equipados com câmeras multiespectrais e sensores termais pode fornecer informações em tempo real importante para tomada de decisão do produtor,

incluindo dados de sinais de estresse hídrico, deficiência nutricional, presença de patógenos, sendo muitas vezes inviável identificar a olho nu, permitindo assim que o produtor tome decisão de forma precisa, evitando perdas e melhorando o rendimento da lavoura, além disso, atualmente tecnologias tem permitido o uso dos drones na aplicação de defensivos e fertilizantes de maneira mais precisa e eficaz (SILVA, 2019).

Segundo REZENDE (2019), a introdução do drone como ferramenta, diminui de forma significativa o tempo de mapeamento e monitoramento, permitindo uma ação mais rápida do agricultor aos problemas encontrados, sendo essa uma redução importante, pois promove um aproveitamento mais eficiente da mão de obra, podendo contribuir para o aumento da produtividade. Outra ação importante para a tomada de decisão é a combinação de drones com big data e inteligência artificial. Isso é possível por meio da captação de imagens pelo drone e dados ambientais diários, que são processados por algoritmos avançados para identificar padrões, prever tendências e otimizar práticas agrícolas.

No entanto, ANTUNES (2023) ressalta que a adoção dessa tecnologia pode apontar alguns desafios, como a necessidade de qualificação técnica para operar drones e interpretar dados fornecidos, tendo em vista que sem o conhecimento adequado não é possível aproveitar todo o potencial da tecnologia. Além disso, alguns equipamentos de drones e sensores apresentam valores altos, podendo inviabilizar em alguns casos sua implementação em pequenas propriedades.

Essa tecnologia oferece diversos benefícios aos produtores, porém é fundamental considerar as características dos equipamentos afins de atender a necessidade de cada situação. Os principais drones utilizados na agricultura incluem: “multirrotor”, “asa fixa” e “Drones híbridos” (SENAR, 2018).

3.5.1 Drone multirrotor

Os drones multirrotores (Figura 2), são modelos mais comuns no mercado e possui ampla aplicação de acordo com a câmera ou sensor acoplado a ele, esse equipamento utiliza vários rotores posicionados de forma estratégica para movimentação e sustentação. Os drones multirrotores podem ser subdivididos em três categorias principais de acordo com a quantidade de rotores, sendo eles os quadricópteros, hexacópteros, octocópteros, cada categoria possui uma certa estabilidade e força para diferentes finalidades. Dentre os benefícios pode-se destacar o custo-benefício, compactação, segurança de pouso e

decolagem e a facilidade de pilotagem, por outro lado possuem menor autonomia comparado a outros tipos de drone, geralmente limitado a 20-30 minutos (DJI, 2024).

Figura 2. Drone multirrotor



Fonte: DJI Agriculture.

3.5.2 Asa fixa

Os drones de asa fixa (Figura 3), são os que utilizam asas, semelhantes às de um avião tradicional para sustentação. São utilizados principalmente em atividades de mapeamento e inspeções devido a sua eficiência em abranger grandes áreas. Entre as principais vantagens está a maior duração de voo comparado a outros modelos e a capacidade de mapear regiões extensas, porém, possui algumas limitações, exigindo grandes espaços para decolagem e pouso, dificuldade de controlar e são mais propícios a acidentes (DJI, 2024).

Figura 3. Asa fixa

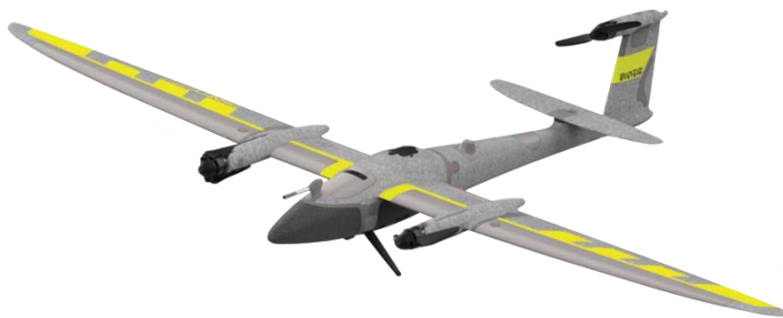


Fonte: Sentera PHX.

3.5.3 Drones híbridos

Os drones híbridos, também conhecidos como VTOL (*Vertical Take-Off and Landing*), possuem características e vantagens dos modelos de asa fixa e multirrotores, unindo suas propriedades positivas, capacitando o equipamento a ter mais segurança de decolagem e pouso de forma horizontal e aumentando sua autonomia. Suas especificidades permitem seu uso em pequenas e grandes áreas, sendo comumente utilizado para fins militares, barragens, mineração, linhas de energia, recursos hídricos e indústria em geral (QUANTUM SYSTEMS).

Figura 4. Asa híbrida



Fonte: Quantum systems.

3.6 Tipos de sensores

Os drones vem se consolidando como ferramenta de grande importância na agricultura tecnológica moderna, oferecendo soluções eficazes para um bom manejo e gestão da produção. Um dos motivos do seu sucesso na agricultura são as tecnologias que permitem serem combinadas nesses equipamentos, entre elas a possibilidade de acoplar diferentes tipos e sensores ampliando a capacidade de obtenção de dados de campo confiáveis e em tempo real. Entre os sensores mais conhecidos destacam-se, o RGB, multiespectrais, térmicos e LiDAR, cada um desempenhando um papel específico para cada tipo de serviço (EMBRAPA, 2018).

3.6.1 Sensor RGB

Os sensores RGB se destacam por sua facilidade de uso e custo acessível comparado a outros sensores. Essas câmeras capturam imagens em três bandas espectrais, vermelho, Verde e Azul (R: red, G: green e B: blue) permitindo a obtenção de fotografias de alta resolução. Sua operação acontece na faixa de luz do visível, no comprimento de ondas entre 400 e 700 nm. As câmeras com essas configurações normalmente já vêm acopladas na maioria dos drones comuns. As câmeras podem ser de baixo custo, de lentes simples até as mais profissionais, de valores altos (PÁDUA, 2017).

Na agricultura, as câmeras RGB são utilizadas para mapear áreas, monitorar lavouras, avaliar qualidade do plantio, identificação de falhas, contagem de plantas, podendo ser utilizada também para identificação de danos por inundação ou queimadas, por exemplo (SANTOS et al. 2020). De acordo com ZHANG (2012), a integração das imagens obtidas em campo com softwares de processamento de imagens permite uma análise detalhada. As imagens RGB são utilizadas em aplicações florestais por conta da riqueza de detalhes visuais fornecidos, porém para investigações mais profundas sobre propriedades biofísicas da vegetação podem não ser suficientes, exigindo complementação de outras bandas como a NIR (infravermelho próximo) (XIE et al., 2008).

Figura 5. Sensor RGB



Fonte: DJI

3.6.2 Sensor multiespectral

As câmeras multiespectrais tem se tornado ferramenta importante no campo do sensoriamento remoto com a evolução dos drones. Inicialmente o uso de sensores era limitado em VANTs devido ao peso, que dificultava sua incorporação, porém, atualmente a tecnologia tem possibilitado diversas adaptações e compactações desses equipamentos (PÁDUA, 2017). Os sensores multiespectrais permitem a obtenção de outras bandas além da RGB no total essas câmeras captam cerca de cinco bandas, entre elas: azul (Blue), verde (Green), vermelho (Red), red-edge e infravermelho próximo (NIR- Near infrared).

Com o avanço da tecnologia, as câmeras multiespectrais tornaram-se ferramentas versáteis, permitindo a realização de diversos serviços em diferentes setores, como o monitoramento de áreas florestais. Na agricultura, essas bandas podem ser utilizadas para geração de índices como NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e NDRE (Normalized Difference Red Edge), importantes para monitorar a saúde das culturas entre outras aplicações tais como o mapeamento de zonas de manejo, avaliação de danos por pragas e doenças, identificação de estresse nutricional e detecção de ervas daninhas. Também é capaz de realizar estimativas de biomassa e produtividade (HOLLER, 2022).

Figura 6. Sensor multiespectral



Fonte: AgEagle Aerial Systems Inc.

3.6.3 Sensor termal

As câmeras termais, também conhecidas como câmeras termográficas, são sensores que permitem a medição da temperatura de corpos sem precisar de contato físico, operam com base no princípio de que todo corpo com temperatura acima de 0 grau Kelvin emite radiação na forma de infravermelho (VIANA, 2018). De acordo com KHANAL (2027), a tecnologia dessas câmeras é amplamente utilizada em diversas atividades onde dados de temperatura influenciam na análise de processos. Essa técnica consiste na conversão do padrão da radiação não visível, banda do infravermelho em imagens visíveis, permitindo a extração e análise de informações de determinado objeto (HUSSAIN et al., 2018).

As aplicações das câmeras térmicas são variadas, possuem o potencial de fornecer estimativas de temperatura da superfície e a eficiência de sistemas de irrigação, além de outras possibilidades (SENAR, 2018). A precisão detecção da temperatura pelo sensoriamento remoto depende de alguns fatores, entre eles as características do objeto alvo, condições atmosféricas e equipamentos utilizados para aquisição das imagens (câmeras, drones, calibradores). segundo a EMBRAPA (2020), a emissividade e a refletividade nos comprimentos de ondas do infravermelho, são as propriedades medições que mais influenciam na medição térmica.

Um dos principais desafios que estão relacionados ao uso de imagens térmicas é a calibração adequada do equipamento e correção atmosférica e da emissividade. O mercado atualmente oferece uma grande variedade de câmeras térmicas, cada uma com diferentes processos de calibração, sensibilidade e resolução de temperatura, impactando diretamente na qualidade dos dados obtidos. A correta configuração do sensor para cada tipo de atividade é essencial para garantir resultados precisos e confiáveis do alvo (EMBRAPA, 2020).

Figura 7. Sensor termal



Fonte: DJI.

3.6.4 Sensor lidar

O sensoriamento LiDAR (Light Detection and Ranging), é uma tecnologia de sensoriamento remoto que se baseia na emissão de pulsos de laser a partir de plataformas aéreas, terrestres e orbitais para medir distancias com precisão (CENTENO & MITISHITA, 2007). É um sensor ativo que possui sua própria fonte de luz, assim permitindo a aquisição de dados independente da iluminação solos, vantagem que evita interferências de sombras ou objetos vizinhos (WAGNER et al., 2004). O resultado de uma boa varredura desse sensor dependerá da combinação da rota e velocidade da aeronave com a configuração correta do sensor utilizado (RIBEIRO, 2019).

O mercado do sensor LiDAR vem crescendo no mundo e no Brasil sua utilização em aerolevantamentos para áreas urbanas e projetos de engenharia, vem se tornando mais comum pelo alto grau de precisão cartográfica (RIBEIRO, 2019). Na vegetação, a capacidade de penetração em aberturas do dossel florestal possibilita a obtenção de dados detalhados sobre a estrutura de vegetação e relevo (ANDERSEN et al., 2006). O aumento da aplicação do LiDAR se deve principalmente pela precisão de captura de informações tridimensionais da superfície terrestre em áreas que possuem características complexas (GIONGO, 2010).

Figura 8. Sensor LiDAR

Fonte: DJI.

3.7 Milho verde

O milho (*Zea mays* L.) é uma das culturas mais importantes e amplamente cultivadas em todo o mundo, nativo das américas, pertence à família das Poaceae e se destaca mundialmente tanto pelo seu valor alimentar, quanto pela sua versatilidade na indústria. Segundo a USDA (2021), o Brasil está entre os três maiores produtores de milho do mundo, perdendo apenas para China e Estados Unidos e entre os cinco maiores exportadores. O cultivo do milho ocorre em todas as regiões do país, com destaque para a segunda safra, que tem se mostrado cada vez mais relevante para a produção nacional (CONAB, 2024).

O milho possui grande importância econômica e alimentar, sendo utilizado em diferentes setores, desde alimentação animal até processos industriais mais complexos que exige alta tecnologia. A nutrição animal representa entre 70 a 90% da demanda consumida do grão no Brasil, se apresentando como um dos principais setores de consumo, o que representa grande relevância para a agropecuária do país (CRUZ et al., 2011).

O ciclo do milho destinado à produção de grãos compreende estádios vegetativos e reprodutivos bem definidos. Durante os estádios vegetativos, a planta desenvolve folhas e raízes, até atingir o pendoamento (VT). Nos estádios reprodutivos, que se iniciam no R1 (embonecamento), a planta passa por fases como grão leitoso (R3), grão pastoso (R4),

formação de dente (R5) e atinge a maturidade fisiológica no R6, aproximadamente 65 dias após a emergência (CRUZ, 2008). Já o milho verde é colhido antes da maturidade completa, geralmente durante o estágio R3, quando os grãos apresentam consistência leitosa e alta umidade. Essa antecipação resulta em um ciclo mais curto para o milho verde em comparação ao milho para grãos (PEREIRA, 2002).

A espiga de milho verde, em seu estágio de maturação precoce, é comercializada por todo o Brasil, sendo consumida de várias formas: cozida, assada ou processada em produtos como mingau, pamonha, sorvetes e bolos, entre outros (SANTOS et al., 2011). Mesmo não tendo uma representatividade tão grande no Brasil comparado a outras culturas, o milho verde vem se destacando devido ao preço acessível e a grande demanda in natura e para indústria alimentícia (EMBRAPA, 2012).

O manejo cultural na produção do milho verde é parecido ao utilizado na cultura do milho destinado a produção de grãos, tendo diferença no tipo da cultivar e na densidade de plantas por hectare. De acordo com PAIVA JUNIOR (1999) o milho verde pode ser cultivado durante todo o ano desde que as exigências hídricas e nutricionais sejam supridas.

Apesar de o cultivo de milho verde no Brasil ainda apresentar produtividade relativamente baixa, a adoção de novas tecnologias tem gerado avanços significativos. A irrigação, por exemplo, tem se mostrado crucial para o aumento da produtividade, especialmente em regiões com períodos de seca ou precipitações irregulares, garantindo o desenvolvimento adequado da planta durante as fases críticas de crescimento, sabendo que o milho verde é altamente sensível ao déficit hídrico (CALDARELI, 2012).

4. MATERIAL E MÉTODOS

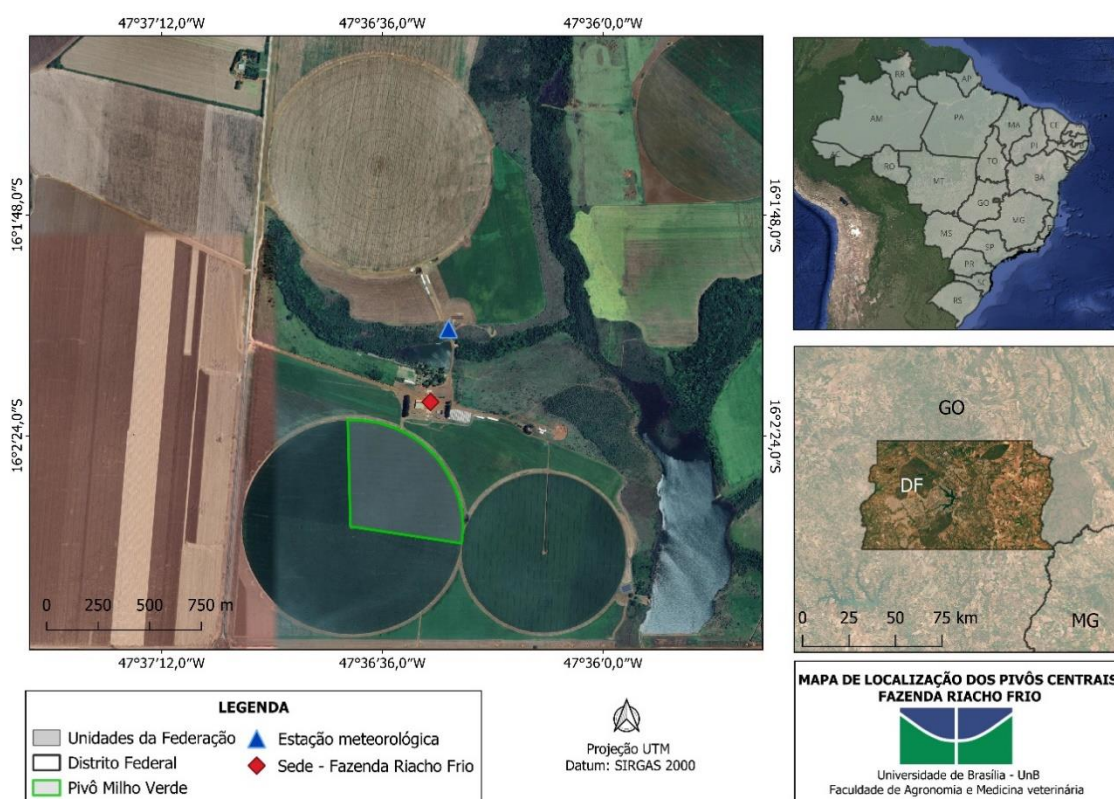
4.1 Localização e caracterização da área de estudo

O experimento foi conduzido na fazenda parceira Riacho Frio (Figura 9), situada no Distrito Federal, na divisa com o estado de Goiás, próxima ao município de Cristalina-GO, Rodovia DF-130, km 42 localizada nas coordenadas Latitude: 16° 02' 18" Sul e Longitude: 47° 36' 27" Oeste. A propriedade abrange uma área total de 645,7 hectares e é caracterizada por um sistema de produção agrícola tecnificada possuindo três pivôs centrais de irrigação. As principais atividades agrícolas da fazenda incluem o cultivo de milho e tomate, culturas de grande relevância econômica e estratégica para a região.

De acordo com a classificação climática de Köppen o clima do Distrito Federal é do tipo Aw, região tropical caracterizada por duas estações bem definidas, uma seca no inverno e uma chuvosa no verão. A precipitação média anual varia de 1200 mm a 1750 mm com maior concentração na estação chuvosa (NUNES e ROIG, 2016). A região possui um relevo predominantemente planalto com pequenas ondulações e está inserido no bioma cerrado com vegetação típica de savana, onde plantas nativas buscam se adaptar em condições ambientais de pouca água, falta de umidade e acidez no solo.

De acordo com a EMBRAPA (2004) as principais classes de solos identificadas no Distrito Federal são: Latossolos Vermelhos (38,92%), Cambissolos (30,98%), Latossolos Vermelho-Amarelos (15,58%), Neossolos Quartzarênicos (0,51%), Argissolos (2,89%), Nitossolos (1,36%), Chernossolos (0,08%), Plintossolos (0,40%), Solos Hidromórficos, Gleissolos Háplicos e Gleissolos Melânicos, Espodossolos (3,98%) e Neossolos Flúvicos (0,18%). Na área trabalhada em questão o solo predominante é o latossolo amarelo.

Figura 9. Mapa de localização da área de estudo, Distrito Federal



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Etapas do experimento

A primeira etapa da atividade foi a definição e aquisição dos equipamentos necessários para a execução do projeto. Foram utilizados VANTs equipados com câmeras termais e multiespectrais, base RTK para georreferenciamento preciso e uma estação meteorológica para coleta de dados climáticos na área de estudo.

A área de estudo foi definida na fazenda Riacho Frio, abrangendo um pivô de milho verde. Com os equipamentos e a área definida, o próximo passo em campo foi a instalação da estação meteorológica próxima à área de estudo para garantir uma coleta diária precisa dos dados atmosféricos, incluindo temperatura, umidade, velocidade do vento e radiação solar, junto a estação, sensores de umidades foram instalados na área estudada para monitorar a disponibilidade hídrica do solo.

Para o mapeamento da área de estudo, foi selecionado estrategicamente um quarto do pivô devido às limitações de hardware relacionadas ao armazenamento e processamento de dados. O extenso tamanho da área total, cerca de 90 hectares, resultaria em arquivos de grande volumetria, exigindo alta capacidade computacional para manipulação e análise, o que tornaria o processamento inviável ou excessivamente caro.

Essa abordagem permitiu a obtenção de dados representativos sem comprometer a eficiência da análise, especialmente considerando que os voos foram realizados semanalmente. Para isso, cada levantamento exigiu um planejamento de voo específico levando em considerações alguns fatores como: sentido e velocidade do vento e temperatura, o planejamento de voo foi realizado utilizando softwares especializados dos fabricantes, como Qbase da Quantum Systems e DJI Terra. Esses softwares permitiram definir parâmetros como altitude de voo, sobreposição de imagens e áreas de interesse, como o exemplo da Tabela 3.

Tabela 3. Informações de voo (Trinity Pro).

Informações de voo	
Drone	Trinity Pro
Câmera	Micasense Altum-PT
GSD	2,0 cm
Altura de voo	95 m
Sobreposição frontal	55%
Sobreposição lateral	70%
Tempo de voo	25 minutos
Quantidade de fotos	529 por banda

Posteriormente, para a aquisição de imagens, foram utilizados VANTs do tipo VTOL TrinityPro e Multirrotor Quadricóptero DJI Mavic modelos da linha Enterprise, multiespectral e termal equipados com sensores multiespectrais e termais (Tabela 4). Com o mapeamento realizado nas datas da Tabela 5, a etapa seguinte foi a de processamento, para isso foram utilizados os softwares Pix4D, Agisoft Metashape e QGIS, gerando mosaicos georreferenciados que permitiram uma análise espacial detalhada.

Tabela 4. Especificações da câmera (Altum-PT)

Banda	Comprimento de Onda Central (nm)	Largura da Banda (nm)	Aplicação
Azul	475	32	Monitoramento da qualidade da água e saúde da vegetação
Verde	560	27	Análise de vigor das plantas e estresse nutricional
Vermelho	668	14	Identificação da biomassa e monitoramento do crescimento
Borda Vermelha	717	12	Detecção precoce de estresse vegetal
Near-IR	842	57	Mapeamento da biomassa e índices de vegetação (NDVI)
Térmica			Geração de mapas térmicos para análise de temperatura e estresse hídrico

Fonte: Ageagle – Micasense.

Tabela 5. Datas dos voos realizados durante o experimento

Nº do VOO	DATA DO VOO
1	21/05/2024
2	24/05/2024
3	31/05/2024
4	07/06/2024
5	13/06/2024
6	27/06/2024
7	11/07/2024
8	19/07/2024
9	25/07/2024
10	16/08/2024
11	22/08/2024

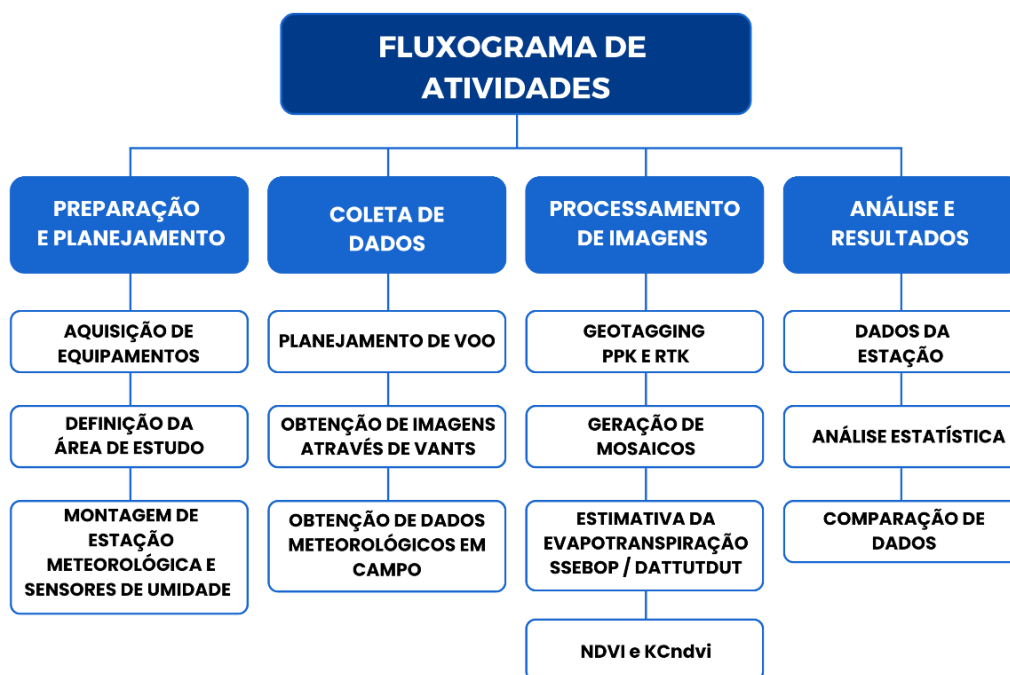
A partir dos dados processados foi possível realizar a estimativa da evapotranspiração através do QWaterModel, plugin disponível no repositório do QGIS

baseado no modelo de balanço de energia DATTUTDUT, além dos índices de vegetação (NDVI) para acompanhar o vigor vegetativo da cultura. Após isso, os resultados foram avaliados e analisados.

Outro modelo utilizado para estimar a evapotranspiração foi o SSEBop, implementado em Python, permitindo a automação do processamento das imagens adquiridas por sensores embarcados em VANTs. O script desenvolvido foi responsável por realizar todos os cálculos da evapotranspiração real.

Após a geração dos mosaicos, os dados coletados pela estação meteorológica foram comparados com os dados processados das imagens. Essa análise permitiu a criação de mapas e gráficos representativos das condições da área de estudo. Além disso, foi realizada uma regressão linear para comparar os resultados obtidos por diferentes métodos e modelos. A Figura 10 ilustra o fluxo desse processo.

Figura 10. Fluxograma de atividades



4.3 Dados meteorológicos de entrada

Os dados meteorológicos foram obtidos por meio da estação meteorológica (METOS By Pessl Instruments) montada próximo ao pivô, dados de temperatura do ar, ponto de orvalho, radiação solar, umidade relativa, precipitação, velocidade do vento. Essas informações foram aplicadas para o cálculo da evapotranspiração de referência

(ET_o) pelo método de Penman Monteith-FAO (ALLEN et al., 1998), como mostra a Equação 2.

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \left(\frac{900}{t_{med} + 273} \right) u_2(es - ea)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad [2]$$

Onde: ET_o = evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹); Δ = inclinação da curva de pressão de vapor d'água (kPa °C⁻¹); R_n = saldo de radiação, MJ m⁻² d⁻¹; G = fluxo de calor no solo sendo igual a 0 para estimativas diárias; γ = constante psicrométrica, kPa °C⁻¹; t_{med} = temperatura média do ar diária, °C; u₂ = 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.

A equação de Penman-Monteith FAO 56 (ALLEN et al., 1998), foi utilizada no modelo SSEBop para a determinação da evapotranspiração real (ET_r) e para estimar a evapotranspiração da cultura. Para o modelo DATTUTDUT foi utilizado dados de Radiação solar (W/m²) pra estimar a ET_r.

4.4 NDVI

Para obter o NDVI da cultura do milho ao longo do ciclo, foram utilizadas imagens multiespectrais captadas pelo sensor Micasense Altum-PT acoplada no V-TOL Trinity Pro e pelo VANT Mavic 3 Multiespectral. O processamento das imagens foi realizado no software PIX4D, para a geração de ortomosaicos e a calibração espectral dos dados. Posteriormente, as imagens foram analisadas e avaliadas no QGIS, permitindo a extração e interpretação dos valores de NDVI.

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) é calculado a partir de dados obtidos por sensores multiespectrais, utilizando as bandas do vermelho (Red) e do infravermelho próximo (NIR). É realizada pela Equação 3:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad [3]$$

Esse índice é amplamente utilizado para estimar o vigor vegetativo, pois se baseia na alta reflectância da vegetação no infravermelho próximo e na baixa reflectância no

vermelho, que é absorvido pela clorofila. Quanto maior o NDVI, maior a biomassa vegetal e a atividade fotossintética da cultura (ROUSE et al., 1974).

4.5 Evapotranspiração da cultura (ETc)

A estimativa da evapotranspiração da cultura (ETc) é fundamental para o manejo eficiente da irrigação, permitindo o uso racional da água e evitando desperdícios ou déficits hídricos que possam comprometer a produtividade agrícola (ALLEN et al., 1998). Nesse sentido, para esse trabalho, foram utilizados dados de evapotranspiração de referência (ETo) obtidos a partir da estação meteorológica montada próxima ao pivô.

Desse modo, um bom manejo de irrigação depende de alguns fatores, entre eles a obtenção da evapotranspiração da cultura (ETc), a evapotranspiração de real (ETr) e o coeficiente de cultura (Kc) durante os estádios de desenvolvimento das plantas. Essas variáveis dependem principalmente da cultura, de elementos meteorológicos e do solo, podendo ser estimadas diretamente através de lisímetros ou indiretamente (CHAVES et al., 2005).

Para o cálculo da evapotranspiração real da cultura foi utilizada a Equação 4.

$$ETc(real) = Kc \times ETr \quad [4]$$

Em que: ETc(real) = evapotranspiração real da cultura (mm dia-1); Kc = coeficiente de cultura; ETr = evapotranspiração real (mm dia-1).

Para obter o coeficiente de cultura (Kc) da cultura foi determinado duas metodologias distintas. A primeira delas baseou-se no Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), resultando no chamado KcNDVI. O método KcNDVI estima o coeficiente de cultura (Kc) a partir do NDVI, baseado na correlação entre o vigor da vegetação e o consumo hídrico. Utiliza uma equação empírica para ajustar o Kc às condições reais da lavoura.

Para isso, foi utilizado a metodologia da Relação Linear (ROCHA et al., 2010) como mostra a Equação 5.

$$Kc = \alpha \times NDVI + b \quad [5]$$

Em que: α e b são coeficientes ajustáveis que dependem da cultura e do ambiente específico.

Para a cultura do milho foram considerados os valores $\alpha = 1.25$ e $b = 0.15$.

A segunda forma utilizada para determinar o coeficiente de cultura (K_c) foi por meio dos valores padrão recomendados pela Food and Agriculture Organization (FAO) para a cultura do milho. De acordo com ALLEN et al. (1998), no manual FAO 56, os valores de K_c variam ao longo do ciclo fenológico da cultura, sendo definidos para as fases inicial, de desenvolvimento, intermediária e final.

4.6 Modelo SSEBop

O modelo SSEBop (SENAY et al., 2018), é utilizado para estimar a evapotranspiração real (ET_r) com base em dados de sensoriamento remoto por imagens multiespectrais e informações meteorológicas. A metodologia consiste na determinação da fração de evapotranspiração (ET_f) da superfície através das bandas do visível, infravermelho e termal. Em seguida, a ET_r é obtida pelo produto entre a ET_f , um fator de escala (k) e a evapotranspiração de referência (ET_o), segundo a Equação 6.

$$ET_{r_{SSEBop}} = ET_f \times k \times ET_o \quad [6]$$

Em que: ET_f = fração de evapotranspiração, adimensional; k é o coeficiente que expressa a máxima evapotranspiração da cultura em relação à evapotranspiração de referência (ET_o), ET_o = evapotranspiração de referência.

A fração de evapotranspiração em um pixel é dada pela Equação 7.

$$ET_f = \frac{Th - Ts}{dT} = \frac{Th - Ts}{Th - Tc} \quad [7]$$

Em que: Th = temperatura estimada do pixel quente/seco no mesmo local e período; Tc = estimativa do valor do pixel frio/úmido também na mesma localidade e data; Ts = temperatura observada na superfície da terra por imagem termal do pixel; e dT = predefinida diferença de temperatura entre Th e Tc para cada pixel em análise.

O valor de referência do pixel frio/úmido (Tc) é calculado a partir da temperatura do ar (Ta), conforme a Equação 8.

$$Tc = c \times Ta \quad [8]$$

Sendo o fator c calculado de acordo com SENAY et al. (2013), de acordo com a Equação 9.

$$c_{pixel} = \frac{T_s | NDVI \geq 0,8}{T_{max}} \quad [9]$$

Em que: $T_s | NDVI \geq 0,8$ = temperatura da superfície em locais onde o Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI) é maior ou igual a 0,8; T_{max} = temperatura máxima do ar no período analisado; c = fator de correção que relaciona T_a e T_s em uma superfície bem vegetada e com boa disponibilidade hídrica.

O diferencial de temperatura dT é determinado previamente para cada pixel da cena. Seu valor varia conforme a localização e a época do ano, porém é considerado constante de um ano para outro. O cálculo de dT é baseado na equação do balanço de energia, aplicada a uma superfície de solo seco e exposto, representando a condição de contorno seca/quente. Nessas condições, assume-se que o fluxo de calor latente e o fluxo de calor no solo são nulos, tornando o fluxo de calor sensível equivalente ao saldo de radiação (SENAY et al., 2013) Equação 10.

$$dT_{SSEBop} = \frac{Rn \times r_{ah}}{\rho_a \times C_p} \quad [10]$$

Em que: dT = diferencial de temperatura, K; ρ_a = a densidade do ar; Kg/ m³; C_p = o calor específico do ar (1013 J kg⁻¹ K⁻¹); e r_{ah} = resistência aerodinâmica à transferência do calor de uma superfície nua e seca, usualmente seu valor é 110 s.m⁻¹; Rn = saldo de radiação.

O saldo de radiação (Rn) é dado pela Equação 11.

$$Rn = LE + H + G = H = \frac{\rho_a \times C_p \times dT}{r_{ah}} \quad [11]$$

Em que: Rn = saldo de radiação, MJ m⁻² d⁻¹; LE = o calor latente, MJ m⁻² d⁻¹ ; H = o calor sensível, MJ m⁻² d⁻¹ ; e G = o fluxo de calor no solo, MJ m⁻² d⁻¹ .

A temperatura de superfície do pixel quente (T_h) é determinada a partir da adição do diferencial de temperatura (dT), como mostra a equação 12.

$$T_h = T_c + dT \quad [12]$$

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]; dT = diferença previamente definida entre as temperaturas dos pixels quente e frio [K].

Para esse trabalho, o modelo SSEBop foi desenvolvido na linguagem de programação Python, permitindo a automação do processamento das imagens obtidas por sensores embarcados em VANTs, todos os cálculos da evapotranspiração real foram realizados pelo script desenvolvido pelo grupo de pesquisa.

O modelo SSEBop foi escolhido para a estimativa da evapotranspiração no presente trabalho devido à sua ampla utilização na literatura e aplicabilidade em diferentes escalas espaciais. Além da necessidade de poucos dados de entrada, o que o torna uma opção eficiente para estudos baseados em sensoriamento remoto, especialmente em áreas onde a disponibilidade de informações meteorológicas detalhadas é limitada.

4.7 Modelo DATTUTDUT

O DATTUTDUT, modelo empírico que utiliza como principal dado de entrada a temperatura de superfície de uma área, que se dá através de imagens termais obtidas por satélites ou sensores acoplados em VANTs. Os pixels mais quentes e mais frios são avaliados, assumindo que os pixels quentes resultam em uma pouca taxa de evapotranspiração, enquanto os pixels mais frios correspondem a taxas elevadas de evapotranspiração (TIMMERMANS et al., 2015).

Esse modelo utiliza o saldo de radiação líquido (R_n) que é estimado a partir da radiação solar de onda curta descendente Equação 11 O albedo da superfície (P_0) é determinado conforme TIMMERMANS et al. (2015) Equação 13, assumindo que, em imagens termais, áreas com vegetação densa tendem a ser mais frias do que superfícies expostas, como rochas ou solo.

$$P_0 = 0.05 + \left(\frac{T_0 - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \right) \times 0.2 \quad [13]$$

Em que: T_{min} = Temperatura mínima; T_{max} = Temperatura máxima

A radiação solar de onda curta descendente ($R_{s\downarrow}$) é estimada pela transmissividade atmosférica (τ) e pela radiação solar atmosférica ($SW_{exo} = 1360 \text{ W/m}^2$) (TIMMERMANS et al., 2015) conforme a Equação 15. A transmissividade (τ) é calculada

conforme BURRIDGE (1977) de acordo com a Equação 14, considerando o ângulo de elevação solar (α), determinado pela posição geográfica das medições.

$$\tau = 0.6 + 0.2 \times \sin(\alpha) \quad [14]$$

$$R_s \downarrow = \tau \times SW_{exo} \quad [15]$$

TIMMERMANS et al. (2015) recomendam valores constantes de 0,7 para a transmissividade (τ) e 0,8 para a emissividade atmosférica. No entanto, devido à variação dos horários que normalmente são realizados os voos entre 09:00 e 16:30 (horário local), o autor optou por incluir o ângulo de elevação solar (α) na Equação 14.

A soma dos fluxos é calculada subtraindo fluxo de calor no solo (G) do saldo de radiação (Rn). O resultado é fracionado em seus componentes de calor sensível (H) e calor latente (LE), utilizando a fração evaporativa (Ef) (Timmermans et al., 2015), conforme a Equação 16:

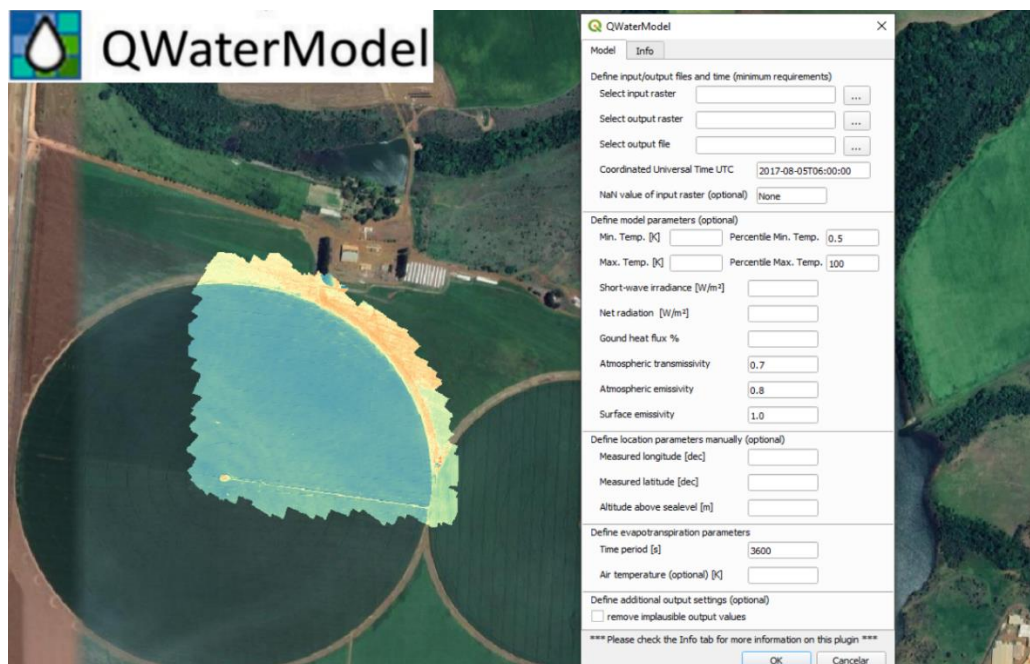
$$Ef = \frac{LE}{(LE + H)} = \frac{LE}{(Rn - G)} = \frac{T_{max} - T_{\emptyset surf}}{T_{max} - T_{min}} \quad [16]$$

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); T_{min} = Temperatura mínima; T_{max} = Temperatura máxima.

Para a implementação do modelo DATTUTDUT, foi utilizado o plugin QWaterModel no software QGIS (Figura 11). No modelo, foram utilizados dados de radiação solar, temperatura de superfície obtida por sensores termais, além de coordenadas geográficas e altitude.

O modelo DATTUTDUT foi escolhido para a estimativa da evapotranspiração real devido à sua facilidade de aplicação e eficiência na obtenção de resultados precisos. Ele requer poucos parâmetros de entrada, os quais são facilmente acessíveis e podem ser obtidos diariamente, garantindo atualizações frequentes e confiabilidade nos resultados. Sua implementação é automatizada por meio do Plugin QWater no software QGIS, uma plataforma gratuita e amplamente utilizada, o que elimina a necessidade de softwares pagos e torna o processo mais acessível. A interface do modelo, traduzida para o português, e sua operação simplificada tornam sua utilização intuitiva, permitindo que usuários com diferentes níveis de experiência possam aplicá-lo com facilidade.

Figura 11. Plugin QWater Model - Qgis



4.8 Equipamentos utilizados no experimento

Tabela 6. Equipamentos utilizados no experimento

Equipamento	Modelo
V-TOL	TrinityPro (Quantum Systems)
Drone Multirrotor	Mavic 3 T / 3M (DJI)

Sensor multiespectral e
termal

Altum-PT
(Micasense)



Base RTK

REACH RS2
(Emlid)



GPS portátil

GPSmap 62sc



Estação meteorológica

METOS By
Pessl Instruments



Sensores de Umidade

ThetaProbe
ML3/ CS616
Campbell

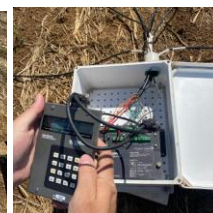


Figura 13. Evolução do NDVI na cultura do milho verde ao longo do ciclo

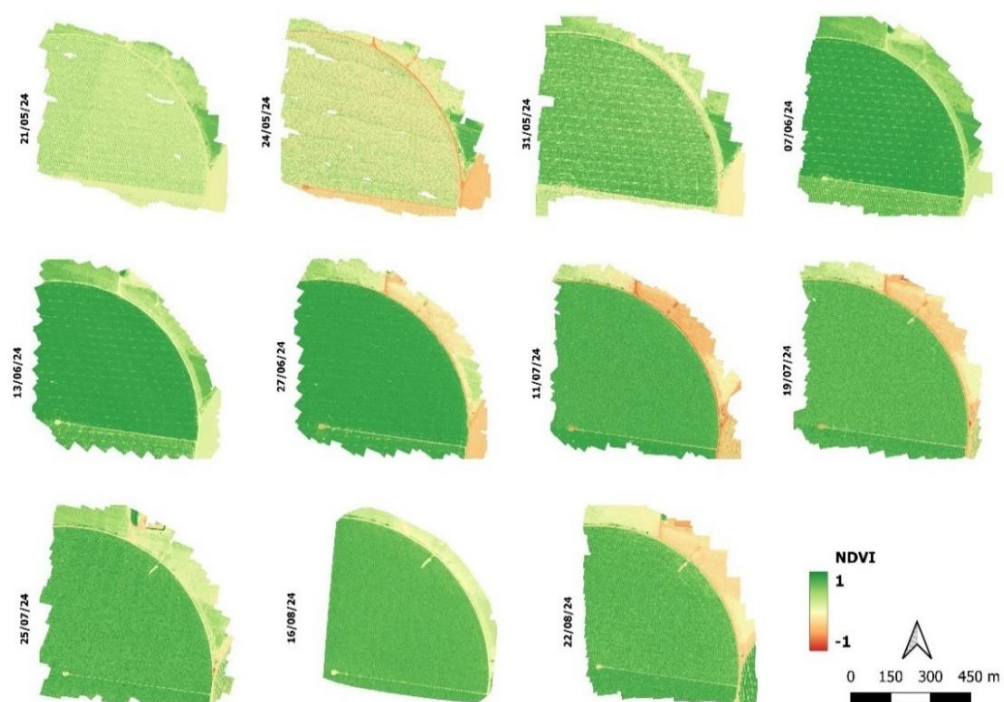


Figura 14. Gráfico de valores médios do NDVI ao longo do ciclo.

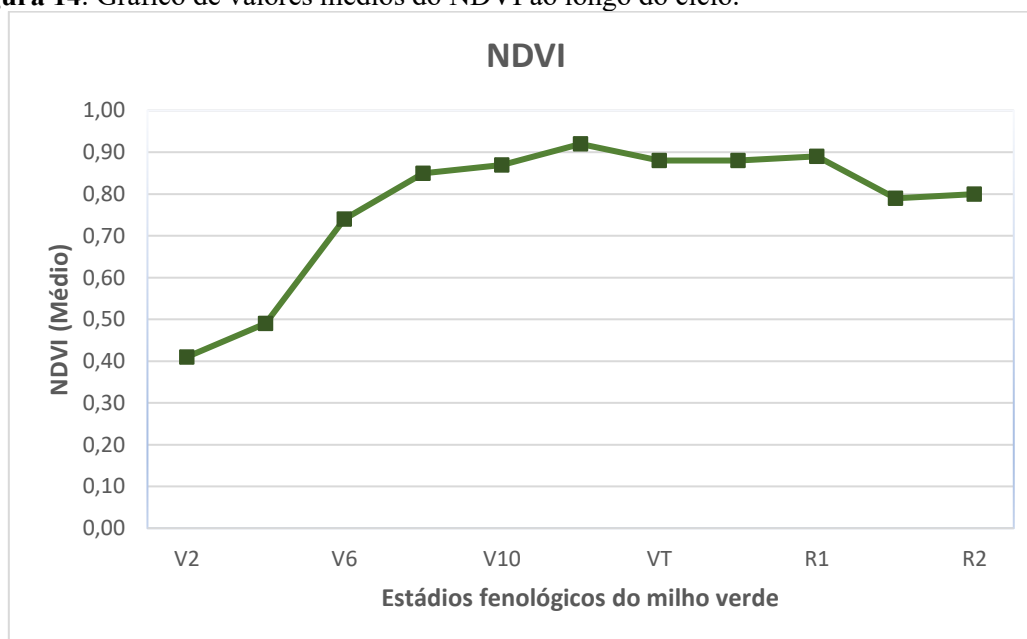


Tabela 7. Dados do NDVI obtidos ao longo do ciclo.

DATA DO VOO	NDVI (médio)
21/05/2024	0,41
24/05/2024	0,49
31/05/2024	0,74
07/06/2024	0,85
13/06/2024	0,87
27/06/2024	0,92
11/07/2024	0,88
19/07/2024	0,88
25/07/2024	0,89
16/08/2024	0,79
22/08/2024	0,80

O gráfico na Figura 14 mostra que os valores médios de NDVI ao longo do ciclo da cultura do milho verde apresentaram um aumento progressivo nas primeiras semanas na fase inicial, partindo de 0,41 em 21/05 até atingir um pico máximo de 0,92 em 27/06, indicando um aumento na cobertura vegetal e na atividade da fotossíntese. Após esse aumento, é possível observar uma certa estabilização no índice, com valores médios de 0,88 entre 11/07 e 19/07, em seguida ocorre uma redução gradual com valores médios de 0,79 na fase final de maturação onde o milho atinge o seu estágio leitoso, quando os grãos estão cheios entrando na fase de senescência.

De acordo com a EMBRAPA (2024), o milho verde é colhido antes da maturidade fisiológica, geralmente entre 70 e 90 dias após a semeadura, quando os grãos ainda se encontram no estágio leitoso ou pastoso. Fase em que as espigas apresentam grãos macios e com alto teor de umidade, características ideais para o milho na forma verde.

Essa diferença no tempo de colheita influencia no ciclo de cultivo e na dinâmica da biomassa vegetal, principalmente para análise do NDVI na variação temporal completa do milho, que considerando todas as fases, diferente do milho destinado a grão não apresenta queda considerável nos valores de NDVI na fase final onde ocorre a senescência avançada e redução significativa na atividade fotossintética.

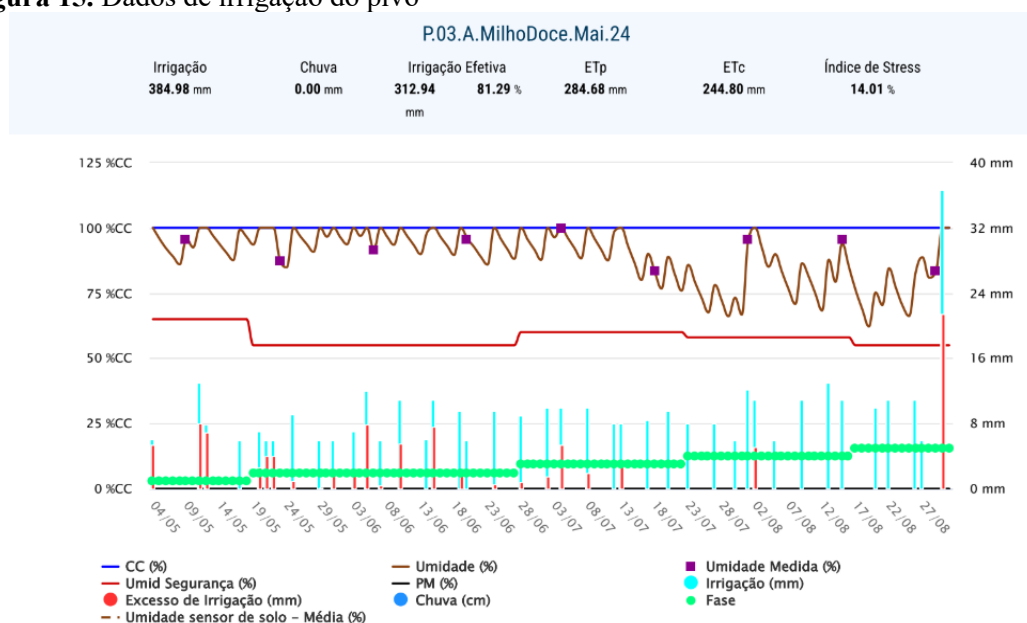
O trabalho de VIAN et al. (2018) Avaliou os limites críticos do NDVI para o potencial produtivo do milho em cada estágio fenológico. Foi identificado uma correlação significativa entre os valores de NDVI e a produtividade de grãos de milho em todos os estágios fenológicos avaliados. De acordo com os autores, valores mais elevados de NDVI ao longo do ciclo da cultura estão diretamente relacionados a maiores rendimentos, indicando que plantas com maior vigor vegetativo tendem a expressar melhor

desempenho produtivo. Além disso, a correlação entre NDVI e produtividade variou conforme o estágio fenológico, sendo moderada no estágio V3 e aumentando para alta correlação nos estádios V5, V6, V7 e V8.

5.3 Dados de irrigação do pivô

A Figura 15 apresenta dados de irrigação fornecidos pela empresa responsável pelo manejo de irrigação do pivô estudado. O manejo é baseado na variação do armazenamento de água no solo, controlando a umidade entre a capacidade de campo e o nível de segurança. Esse controle procura manter a umidade dentro de um intervalo ótimo, para garantir que o solo não atinja níveis críticos de déficit ou excesso hídrico. O monitoramento contínuo da umidade, complementado por dados de evapotranspiração, permite os ajustes nas lâminas de irrigação, evitando estresse hídrico na cultura. Em alguns momentos, a umidade do solo se aproxima do limite de segurança, o que pode estar relacionado ao manejo da cultura e à aplicação de estresse controlado.

Figura 15. Dados de irrigação do pivô



Os voos realizados em datas específicas coincidiram com a irrigação do pivô, permitindo a análise da influência da água aplicada na evapotranspiração real. No voo 2, em 24/05, foram registrados 9 mm de irrigação, enquanto no voo 4, em 07/06, e no voo 5, em 13/06, a lâmina aplicada foi de 12 mm. Já no voo 6, realizado em 27/06, a irrigação foi de 10 mm. Posteriormente, no voo 10, em 16/08, houve uma aplicação de 15 mm, seguida pelo voo 11, em 22/08, com 12 mm de irrigação. Esses dados são fundamentais

para avaliar a resposta da cultura à irrigação e sua relação com a estimativa da evapotranspiração.

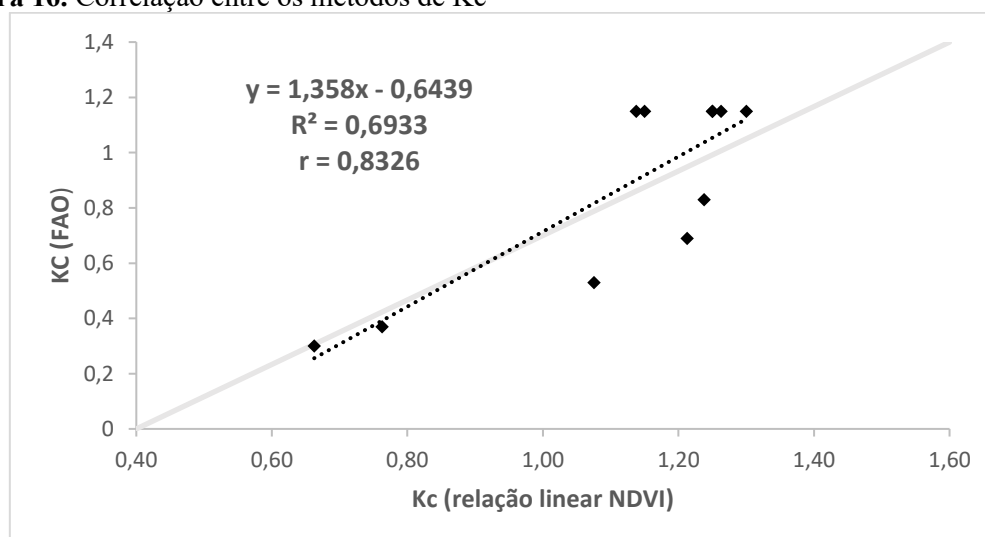
5.4 Evapotranspiração Real da cultura (ETreal)

A determinação da evapotranspiração real da cultura foi realizada em duas etapas principais. Primeiramente, o coeficiente de cultura (Kc) foi obtido por dois métodos: o Kc estabelecido pela FAO e o Kc derivado por meio da relação linear (ROCHA et al., 2010) como mostra a Equação 4. Com os valores obtidos por ambas as abordagens, foi realizada uma correlação entre os dois métodos.

Tabela 8. Kc da cultura do milho verde

DATA DO VOO	KC (FAO)	KC (NDVI)
21/05/2024	0,3	0,66
24/05/2024	0,37	0,76
31/05/2024	0,53	1,08
07/06/2024	0,69	1,21
13/06/2024	0,83	1,24
27/06/2024	1,15	1,30
11/07/2024	1,15	1,25
19/07/2024	1,15	1,25
25/07/2024	1,15	1,26
16/08/2024	1,15	1,14
22/08/2024	1,15	1,15

Figura 16. Correlação entre os métodos de Kc



A Figura 16 apresenta a relação entre as duas formas de obtenção do coeficiente de cultura (Kc) para o milho: uma baseada no Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e outra nos valores recomendados pela FAO. O coeficiente de

determinação ($R^2 = 0,69$) mostra que cerca de 69% da variação do Kc (FAO) pode ser explicada pelo Kc (NDVI), indicando uma boa relação entre os métodos. A correlação ($r = 0,83$) mostra uma forte associação entre as duas abordagens.

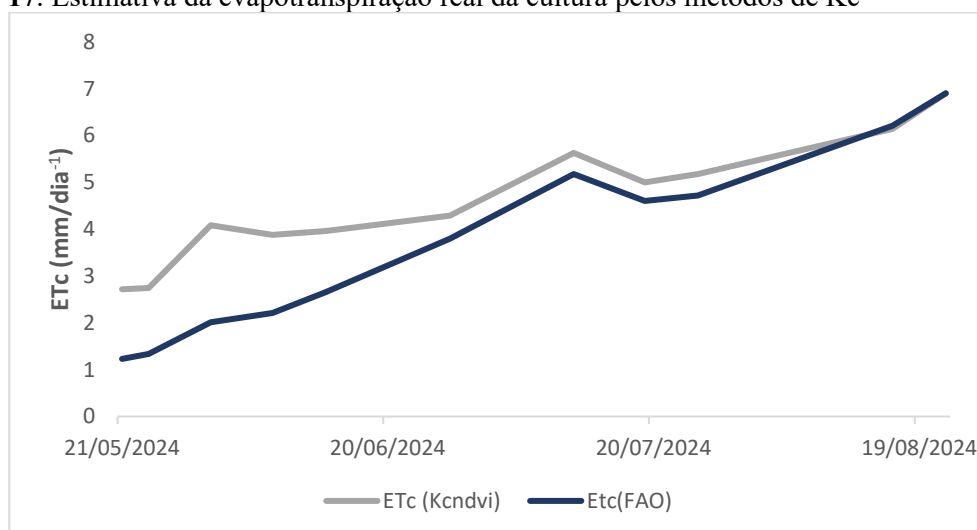
Segundo Allen et al. (1998), o Kc do milho varia ao longo do ciclo, indo de 0,3-0,5 na fase inicial, aumentando para 1,2-1,3 no período de máxima demanda hídrica, e reduzindo para 0,35-0,6 na fase de maturação, quando a planta entra em senescência e a necessidade hídrica diminui.

Com os valores de coeficiente de cultura (Kc) e evapotranspiração real (ETr) estabelecidos, a evapotranspiração real da cultura (ETcreal) foi estimada para ambos os valores de Kc, aplicando a Equação 3, conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 9. Evapotranspiração Real da Cultura (ETcreal).

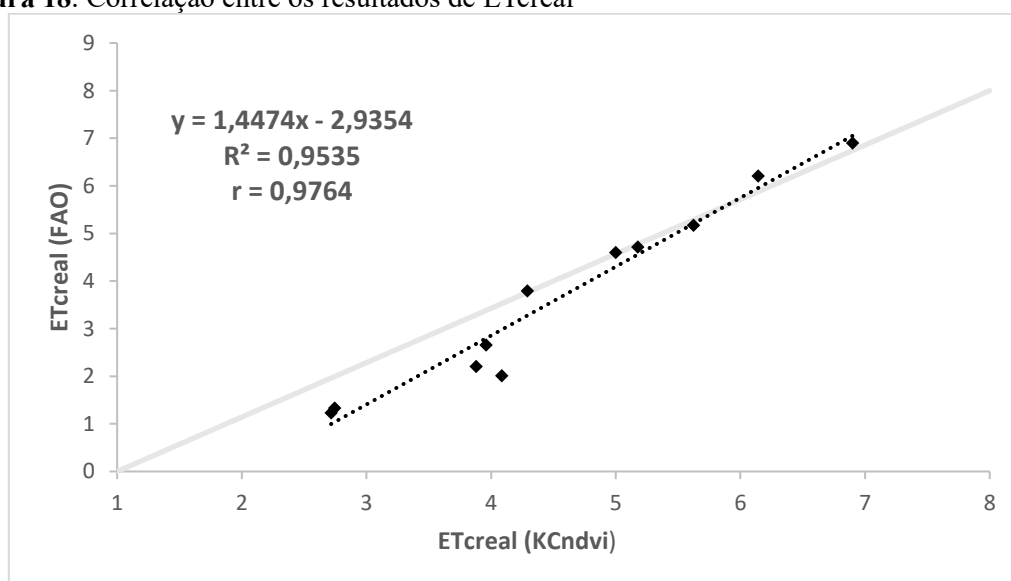
DATA DO VOO	ETcreal (FAO)	ETcreal Kcndvi
21/05/2024	1,23	2,72
24/05/2024	1,33	2,75
31/05/2024	2,01	4,09
07/06/2024	2,21	3,88
13/06/2024	2,66	3,96
27/06/2024	3,80	4,29
11/07/2024	5,18	5,63
19/07/2024	4,60	5,00
25/07/2024	4,72	5,18
16/08/2024	6,21	6,14
22/08/2024	6,90	6,90

Figura 17. Estimativa da evapotranspiração real da cultura pelos métodos de Kc



A Figura 17 mostra que no período inicial de estabelecimento da cultura, os valores médios da ET_{creal} foram de 3,11 ($\text{mm}/\text{dia}^{-1}$) pelo método Kcndvi e 1,86 ($\text{mm}/\text{dia}^{-1}$) pelo método FAO, duante a fase de crescimento vegetativo, houve um aumento da ET_{creal} para 4,48 ($\text{mm}/\text{dia}^{-1}$) (Kcndvi) e 3,94 ($\text{mm}/\text{dia}^{-1}$) (FAO), já na fase de floração e enchimento de grãos, onde ocorre o pico de demanda hídrica os valores médios atingiram 5,62 ($\text{mm}/\text{dia}^{-1}$) e 4,79 ($\text{mm}/\text{dia}^{-1}$) pelos respectivos métodos. Na fase de maturação a ET_{creal} manteve-se elevada e estabilizada, com médias de 6,52 ($\text{mm}/\text{dia}^{-1}$) (Kcndvi) e 6,56 (mm/dia) (FAO).

Figura 18. Correlação entre os resultados de ET_{creal}



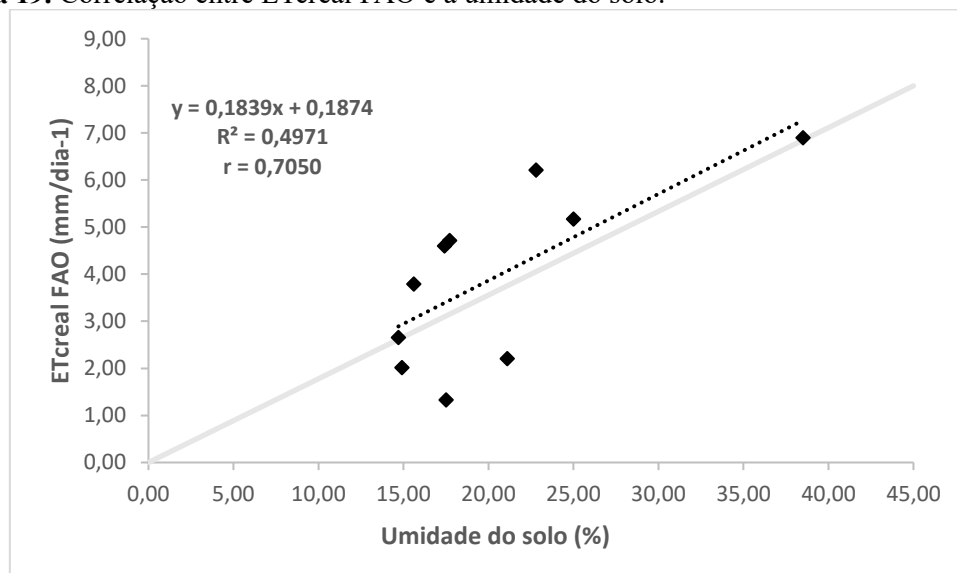
O coeficiente de correlação ($r = 0,9764$) como indica a Figura 18, mostra que a correlação entre os métodos ET_{creal} (Kcndvi) e ET_{creal} (FAO) é alta.

BEZERRA et al. (2010) estimaram a evapotranspiração da cultura do algodão com base na relação entre o coeficiente de cultura dual, conforme proposto na FAO-56, e o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) derivado de imagens de satélite, utilizando o método KcNDVI. Os resultados demonstraram uma elevada relação entre os valores obtidos por ambas as metodologias. Os coeficientes de cultura estimados foram compatíveis com os valores esperados para o estágio fenológico médio da cultura, padrão também observado em estudos com o milho.

Além disso, Bezerra et al. (2010) observaram que os valores de evapotranspiração diária da cultura (ET_c) estimados com base no coeficiente Kc(NDVI) apresentaram grande concordância com os valores de ET_{creal} obtidos em campo por meio do método

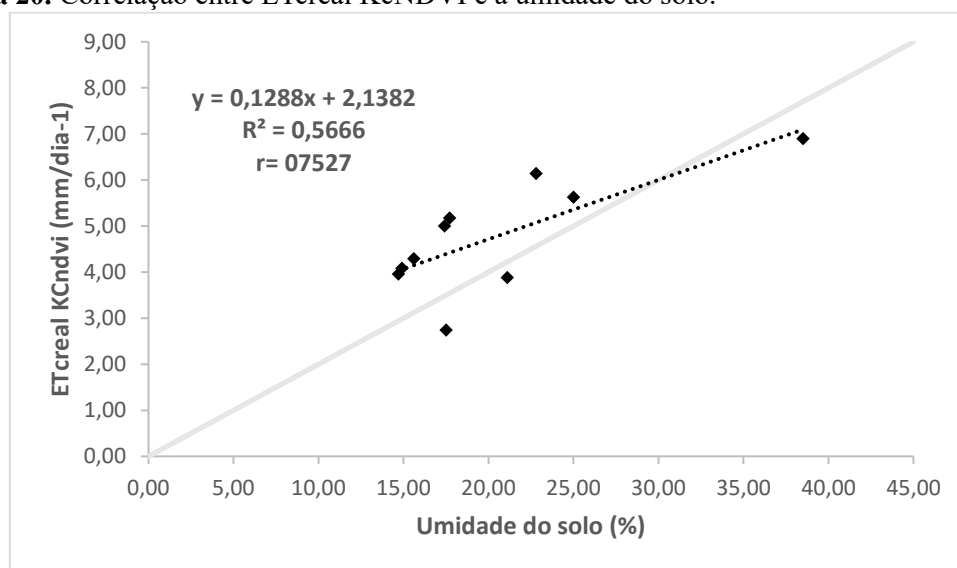
da razão de Bowen e que a estimativa da ET_c utilizando a equação $K_c(NDVI) \times ET_0$ demonstraram precisões comparadas a metodologias baseadas em sensoriamento remoto.

Figura 19. Correlação entre ET_{creal} FAO e a umidade do solo.



A Figura 19 apresenta a correlação entre a evapotranspiração real da cultura (ET_{creal}) obtida pelo método padrão da FAO e os valores médios da umidade do solo medido com sensores na área do pivô nas datas consideradas do experimento. É possível observar uma relação positiva entre as variáveis, indicando que o aumento da umidade do solo está associado ao aumento da ET_{creal} . O coeficiente de determinação ($r = 0,70$) indica uma relação significativa entre os dados.

Figura 20. Correlação entre ET_{creal} K_cNDVI e a umidade do solo.

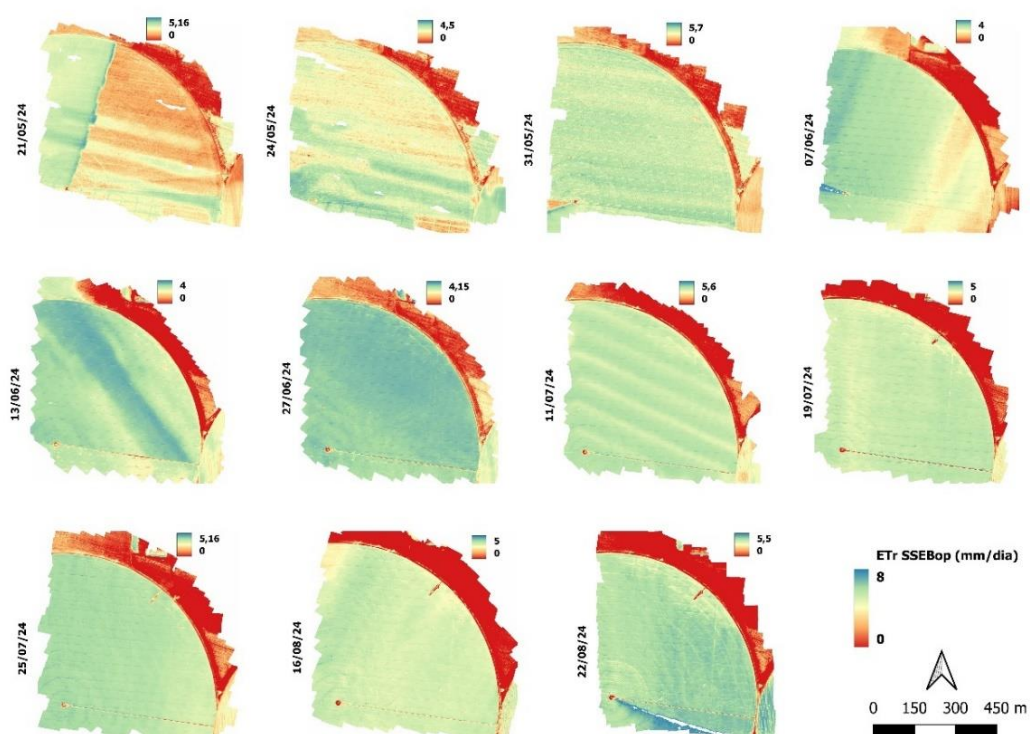


Já na Figura 20, é possível observar que a relação entre a evapotranspiração real estimada pelo KcNDVI ($ET_{creal} KcNDVI$) e a umidade do solo foi ligeiramente melhor em comparação a $ET_{creal} FAO$. O coeficiente de determinação ($R^2 = 0,5666$) indica que aproximadamente 56,66% da variação da evapotranspiração pode ser explicada pela umidade do solo, sugerindo uma correlação moderada. O coeficiente de correlação ($r = 0,7527$) reforça indicando uma relação positiva entre as variáveis.

5.5 Resultados do modelo SSEBop

A variação espacial e temporal da $ET_{rSSEBop}$ estimada para área do pivô de milho verde é ilustrada na Figura 21, a Figura 22 apresenta o gráfico com valor mínimo, médio e máximo da $ET_{rSSEBop}$ para a área do experimento nas datas dos voos.

Figura 21. Variação espacial e temporal da $ET_{rSSEBop}$ ao longo do ciclo da cultura do milho verde.



Na Figura 21, é possível observar a variação temporal e espacial da evapotranspiração real (ET_r) da cultura do milho ao longo do ciclo, utilizando o modelo SSEBop. A variação temporal pode ser observada através das diferentes datas de aquisição das imagens, que mostram mudanças na demanda hídrica da cultura ao longo dos ciclos. Nos primeiros estádios, os valores de ET_r são menores, aumentando conforme a planta se desenvolve.

Nas datas de 07/06 (voo 4), 13/06 (voo 5), 27/06 (voo 6) e 22/08 (voo 11), é possível observar a presença de manchas mais expressivas de maior evapotranspiração. Esse padrão pode ser explicado pelo fato de que, nessas datas, foi realizada irrigação pelo pivô central, aumentando a disponibilidade de água no solo. Essa relação é evidenciada na Figura 15.

Figura 22. Gráficos com valores obtidos pela $ET_{rSSEBop}$

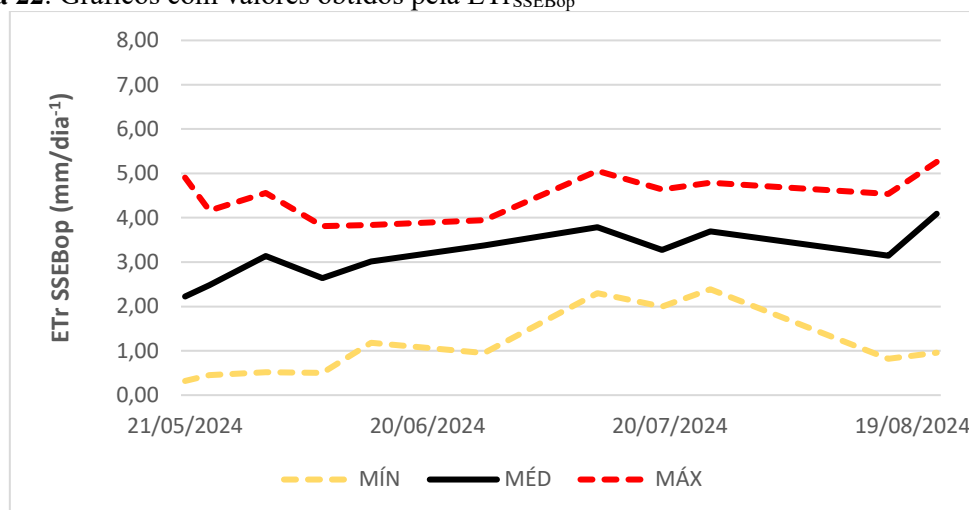


Tabela 10. Valores obtidos pela $ET_{rSSEBop}$

DATA DO VOO	MÍN	MÉD	MÁX
21/05/2024	0,32	2,22	4,91
24/05/2024	0,45	2,48	4,16
31/05/2024	0,52	3,13	4,56
07/06/2024	0,50	2,64	3,81
13/06/2024	1,18	3,02	3,84
27/06/2024	0,95	3,38	3,95
11/07/2024	2,30	3,79	5,06
19/07/2024	2,00	3,27	4,64
25/07/2024	2,39	3,69	4,79
16/08/2024	0,82	3,15	4,54
22/08/2024	0,95	4,09	5,26

A Figura 22 e a Tabela 10 apresentam as variações dos valores da $ET_{rSSEBop}$ obtidos ao longo do ciclo analisado. Os menores valores registrados foram no início do ciclo onde a planta está em estágio de emergência e desenvolvimento da primeira folha, os valores médios para essa fase foram de $0,4 \text{ mm/dia}^{-1}$, enquanto o maior atingiu $5,26 \text{ mm/dia}^{-1}$ em 22/08, o que evidencia o aumento da ET_r ao longo do desenvolvimento da cultura. A evapotranspiração média pelo modelo variou entre $2,5 \text{ mm/dia}^{-1}$ e $4,09 \text{ mm/dia}^{-1}$.

¹, acompanhando essa tendência de aumento. Os valores mínimos oscilaram entre 0,32 mm/dia⁻¹ e 2,39 mm/dia⁻¹, enquanto os máximos variaram de 3,81 mm/dia⁻¹ a 5,26 mm/dia⁻¹.

Na Tabela 10, é possível observar que os valores máximos da evapotranspiração real (ET_r) nos voos 4 e 5 foram baixos comparado as outras datas. Essa redução pode ser explicada por uma queda incomum de temperatura no período das datas dos voos, o que influenciou diretamente a demanda evaporativa.

5.6 Análise de desempenho do modelo SSEBop

A análise de desempenho do modelo SSEBop na estimativa da Evapotranspiração Real (ET_r) para a cultura do milho verde foi realizada por meio da comparação com dados obtidos em campo. Para isso, foram utilizadas estimativas da Evapotranspiração real da Cultura (ET_{creal}) calculadas pelo método padrão da FAO, além do método que emprega o coeficiente K_c obtido a partir do NDVI (K_cNDVI) como mostra a figura 23 e Figura 24.

Figura 23. Correlação entre a ET_r_{SSEBop} e a ET_{creal} (K_cNDVI)

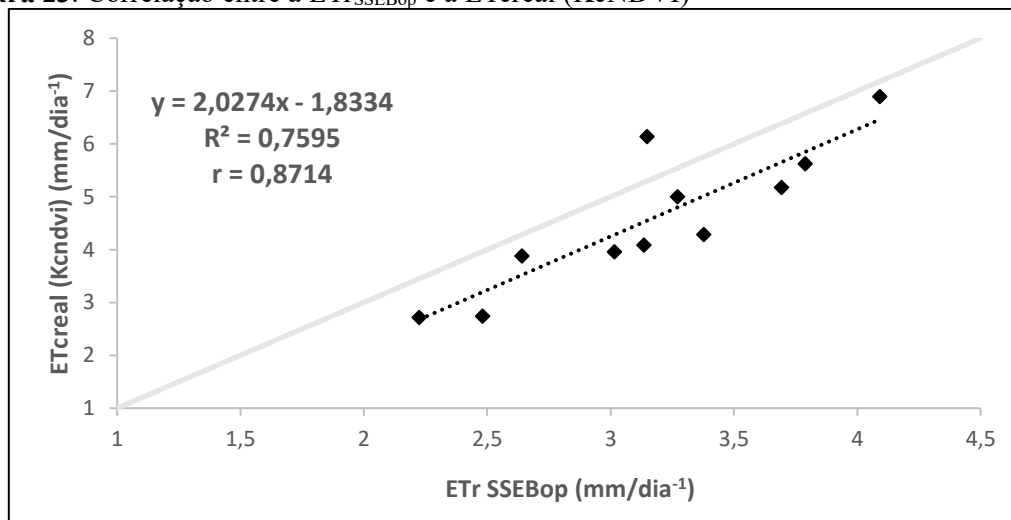
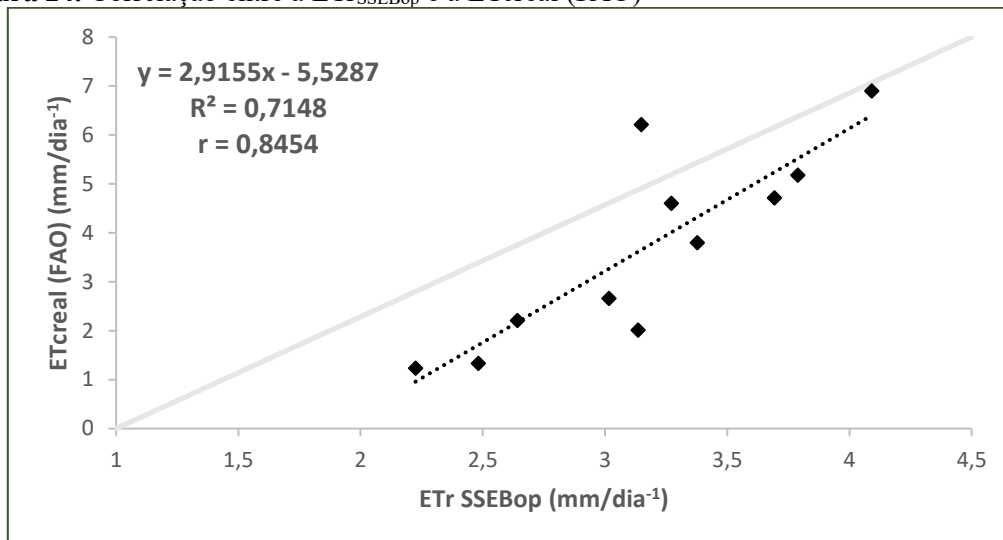


Figura 24. Correlação entre a $ET_{rSSEBop}$ e a ET_{creal} (FAO)

No primeiro caso, como mostra a Figura 23, o valor de $R^2 = 0,75$ e $r = 0,87$ indica uma boa correlação entre os valores de ET_r estimados pelo modelo SSEBop e os obtidos pelo método ET_{creal} (KcNDVI). Da mesma forma, o segundo gráfico, apresentado na Figura 24, também aponta uma correlação significativa, com valores de $R^2 = 0,71$ e $r = 0,82$ entre o modelo SSEBop e o método padrão da FAO. Além disso, a regressão linear para ambos os casos demonstrou um bom desempenho, evidenciando a adequação do modelo na estimativa da evapotranspiração.

A correlação entre os valores de evapotranspiração real (ET_r) estimados pelo modelo SSEBop e os obtidos pelo método ET_{creal} (KcNDVI) foi mais significativa. Esse resultado pode estar relacionado ao fato de que o modelo SSEBop utiliza o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) como dado de entrada para a estimativa da ET_r , o que favorece a compatibilidade entre os métodos, uma vez que ambos consideram a variabilidade da cobertura vegetal na determinação da evapotranspiração.

VALE (2021) avaliou o desempenho dos modelos SSEBop e SEBAL na estimativa da evapotranspiração real (ET_r) na cultura do trigo, utilizando dados de sensoriamento remoto. Os resultados foram comparados com o método da razão de Bowen, que emprega medições obtidas por estação meteorológica em campo. O modelo SSEBop apresentou um desempenho bastante satisfatório, explicando 95% da variabilidade da ET_r , com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,82, o que indica uma simulação adequada da evapotranspiração real.

ALMEIDA (2023) analisou a eficiência do algoritmo Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving (SAFER) na estimativa da evapotranspiração atual (ET_a)

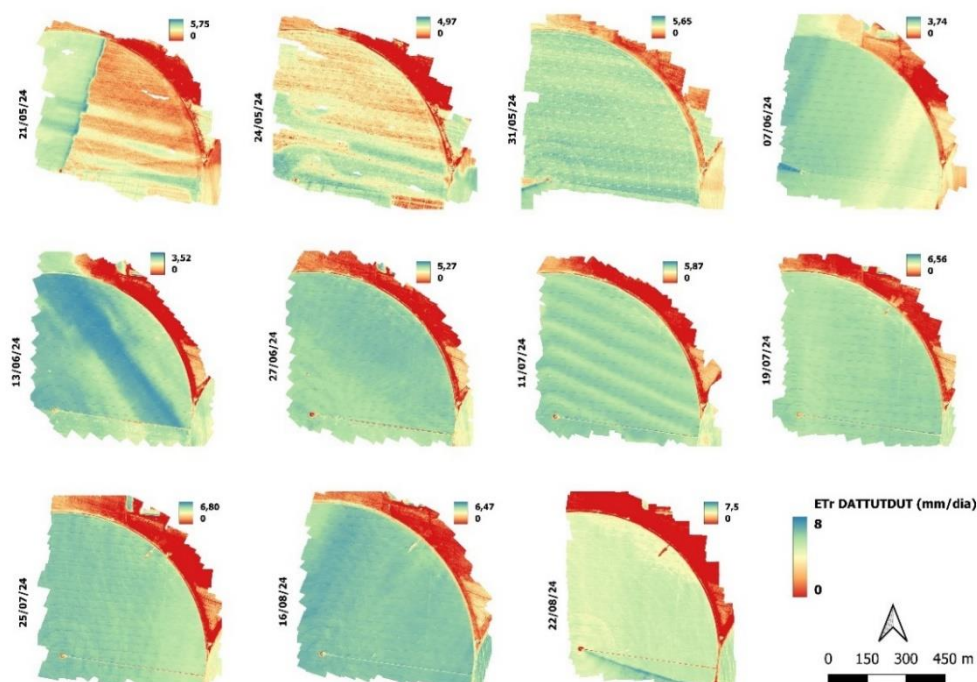
da cultura do milho em áreas irrigadas por pivô central no noroeste de Goiás. Para isso, foram utilizadas imagens de satélite e de drone equipado com a câmera multiespectral e termal MicaSense Altum. Os valores estimados foram comparados com a evapotranspiração obtida pelo método padrão FAO. Os resultados indicaram que mesmo que o sensoriamento remoto apresente alta precisão na estimativa da ETa, com índices de confiança variando entre 0,91 e 0,97, sua aplicação não é recomendada para a fase reprodutiva da cultura do milho.

5.7 Resultados do modelo DATTUTDUT

A variação espacial e temporal da $ET_{rDATTUTDUT}$ estimada para a área do pivô de milho verde é ilustrada na Figura 25. Já a Figura 26 apresenta um gráfico com os valores mínimo, médio e máximo da $ET_{rDATTUTDUT}$ para a área do experimento nas datas dos voos.

A Figura 25 apresenta a variação da evapotranspiração real (ETr) do milho ao longo do ciclo, estimada pelo modelo DATTUTDUT. A evolução temporal da ETr pode ser analisada por meio das diferentes datas de aquisição das imagens, evidenciando mudanças na demanda hídrica da cultura ao longo do crescimento. Nos estádios iniciais, os valores de ETr são menores, aumentando à medida que a planta se desenvolve.

Figura 25. Variação espacial e temporal da $ET_{rDATTUTDUT}$ ao longo do ciclo da cultura do milho verde.



Assim como observado na ETR_{SSEBop} , os valores máximos de evapotranspiração real (ET_r) foram mais baixos do que o esperado nos voos 5 e 6 como mostra a Tabela 11, possivelmente devido às temperaturas mais baixas registradas no período. A redução na temperatura pode ter influenciado a demanda evaporativa. As manchas de evapotranspiração são mais evidentes nas datas 13/06 e 16/08 quando houve irrigação da área, como indica a Figura 15.

Figura 26. Gráficos com valores obtidos pela $ET_{rDATTUTDUT}$

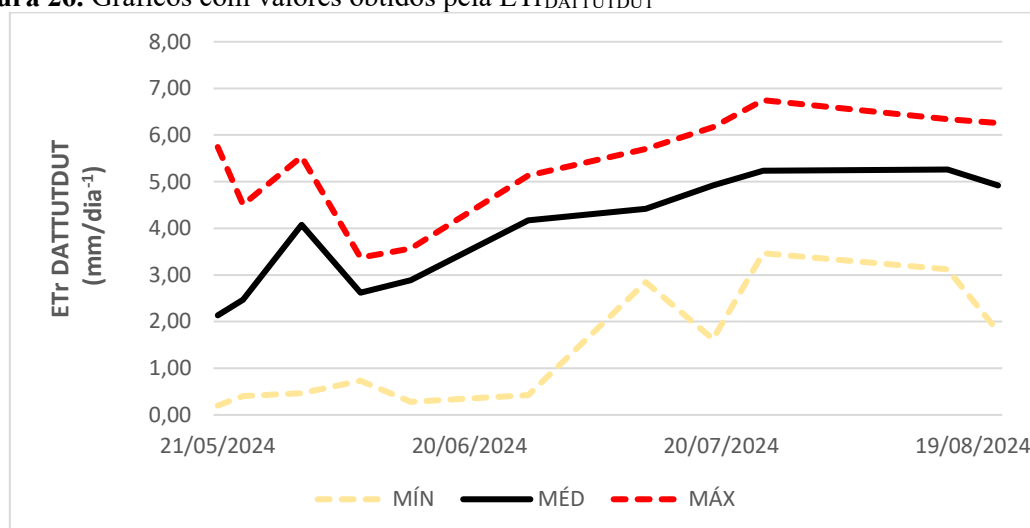


Tabela 11. Valores obtidos pela $ET_{rDATTUTDUT}$

DATA DO VOO	MÍN	MÉD	MÁX
21/05/2024	0,20	2,13	5,74
24/05/2024	0,40	2,47	4,51
31/05/2024	0,47	4,08	5,54
07/06/2024	0,73	2,62	3,37
13/06/2024	0,28	2,89	3,57
27/06/2024	0,42	4,17	5,13
11/07/2024	2,85	4,42	5,70
19/07/2024	1,62	4,92	6,17
25/07/2024	3,46	5,23	6,75
16/08/2024	3,12	5,26	6,34
22/08/2024	1,79	4,92	6,26

A Figura 26 mostra os valores da variação da estimativa da $ET_{rDATTUTDUT}$ ao longo do ciclo do milho verde, na fase inicial foi observado valores abaixo de $1,0 \text{ mm/dia}^{-1}$ mínimas entre $0,20$ e $0,50 \text{ mm/dia}^{-1}$, para datas posteriores com o desenvolvimento da cultura, esses valores de mínima atingiram $3,46 \text{ mm/dia}^{-1}$. Os valores de médias da $ET_{rDATTUTDUT}$ foram de $2,13 \text{ mm/dia}^{-1}$ na fase inicial da cultura e com um aumento

progressivo atingiu $5,26 \text{ mm/dia}^{-1}$ próximo ao final do ciclo. Os valores máximos da $ET_{\text{DATTUTDUT}}$ chegaram a $6,75 \text{ mm/dia}^{-1}$ na fase de enchimento do grão, comportamento que evidencia que medida que a cultura cresce, há um aumento significativo na necessidade de água, especialmente nos períodos de maior desenvolvimento vegetativo.

5.8 Análise de desempenho do modelo DATTUTDUT

A análise de desempenho do modelo DATTUTDUT na estimativa da Evapotranspiração Real (ET_r) para a cultura do milho verde foi realizada por meio da comparação com dados obtidos em campo. Para isso, foram utilizadas estimativas da Evapotranspiração real da Cultura (ET_{creal}) calculadas pelo método padrão da FAO, além do método que emprega o coeficiente K_c obtido a partir do NDVI (K_{cNDVI}), como mostrado nas Figuras 27 e 28.

Na Figura 27, observa-se que o coeficiente de determinação $R^2=0,75$ e a correlação $r = 0,86$ indicam uma forte relação entre os valores de ET_r estimados pelo modelo DATTUTDUT e os obtidos pelo método ET_{creal} (K_{cNDVI}). Já na Figura 28, a correlação também se mostra significativa, com $R^2=0,76$ e $r = 0,87$, demonstrando uma boa concordância entre o modelo DATTUTDUT e o método da FAO. A análise das equações de regressão linear reforça o bom desempenho do modelo na estimativa da evapotranspiração, mostrando sua eficiência para estimar a demanda hídrica da cultura do milho.

Figura 27. Correlação entre a $ET_{\text{DATTUTDUT}}$ e a ET_{creal} (K_{cNDVI})

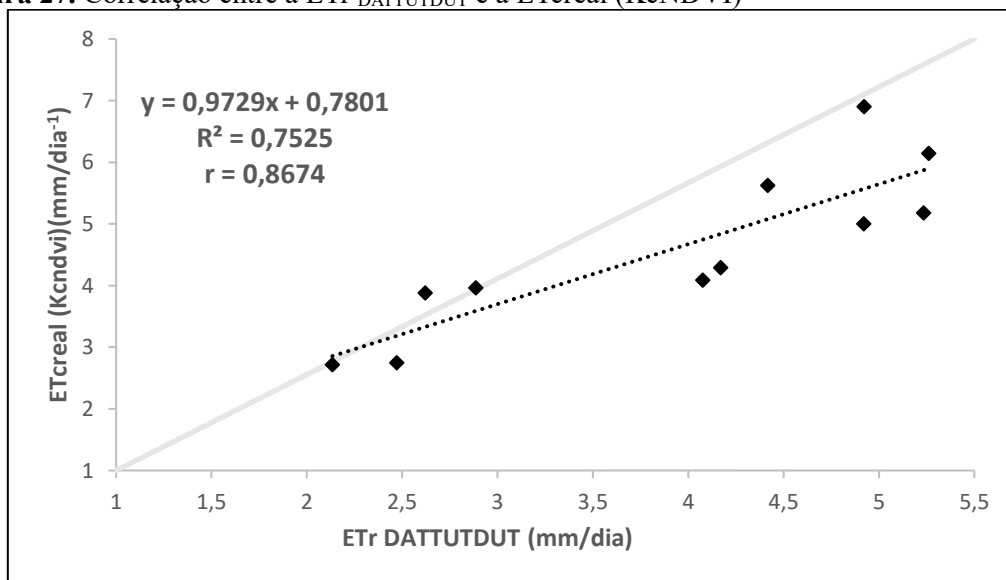
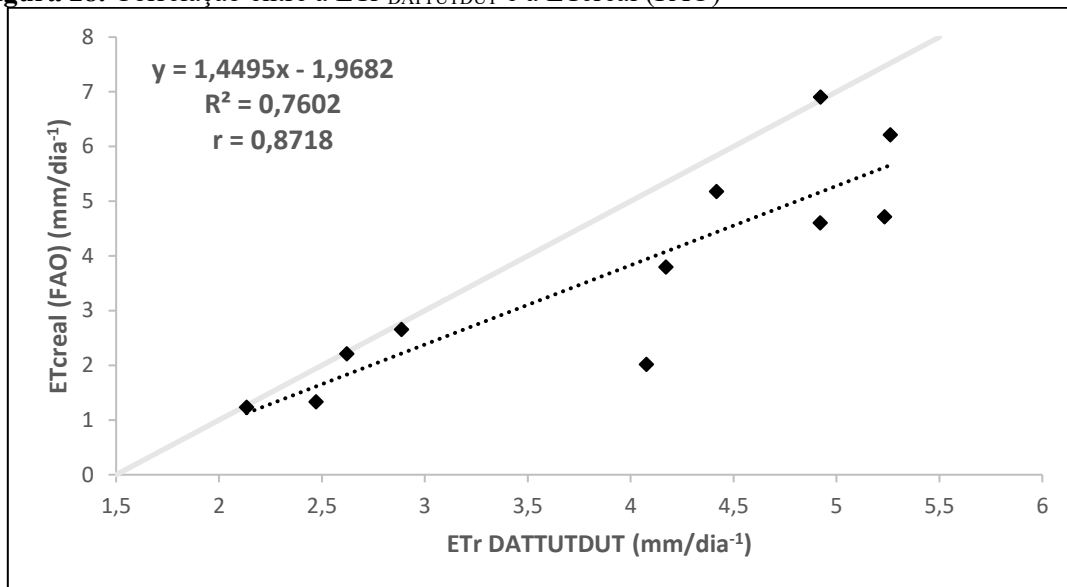
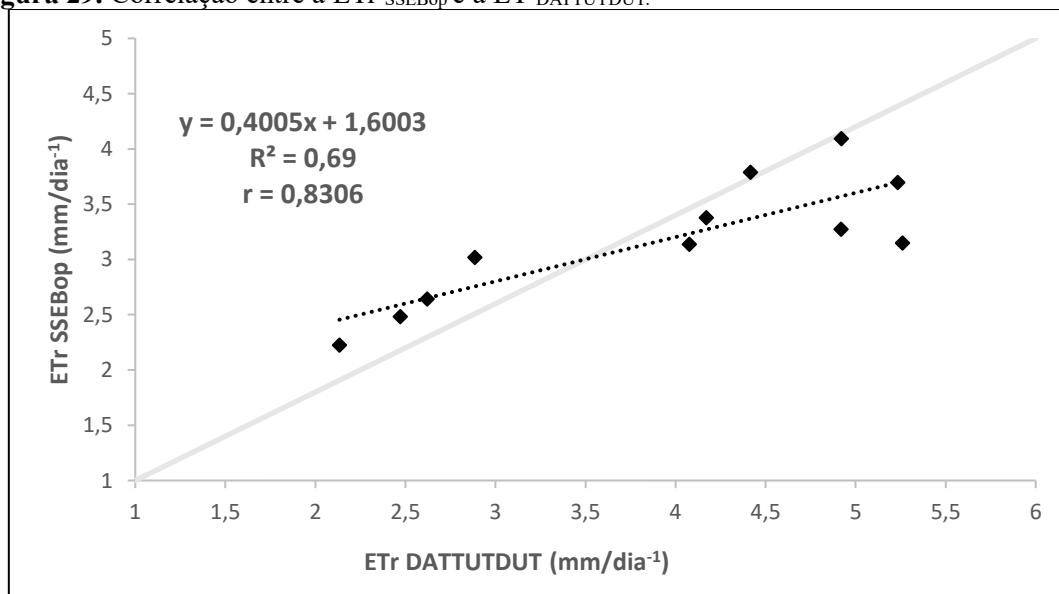


Figura 28. Correlação entre a $ETr_{DATTUTDUT}$ e a ET_{creal} (FAO)



Ao comparar os modelos SSEBop e DATTUTDUT na estimativa da evapotranspiração real (ETr) para a cultura do milho verde, observa-se que ambos apresentam uma correlação significativa com os métodos de referência (ET_{creal} KcNDVI e FAO). Porém, ao serem comparados, o modelo DATTUTDUT demonstrou um desempenho um pouco superior, com coeficientes de determinação $R^2 = 0,76$ e $0,75$ e coeficientes de correlação $r = 0,87$ e $0,86$, enquanto o SSEBop apresentou $R^2 = 0,75$ e $0,71$, com $r = 0,87$ e $0,82$.

Figura 29. Correlação entre a ETr_{SSEBop} e a $ET_{DATTUTDUT}$.



A correlação entre os modelos SSEBop e DATTUTDUT, conforme ilustrado na Figura 29, apresenta um coeficiente de determinação $R^2 = 0,69$ e um coeficiente de

correlação $r = 0,83$, o que indica uma boa correlação entre as estimativas de ETr fornecidas pelos dois modelos que utilizam sensoriamento remoto.

6. CONCLUSÕES

- Os modelos SSEBop e DATTUTDUT demonstraram um bom desempenho na estimativa da evapotranspiração real (ET_r) quando comparados ao método padrão da FAO, evidenciando-se como ferramentas eficazes para essa estimativa.
- O modelo DATTUTDUT apresentou melhores resultados de R^2 e r ao serem correlacionados a Evapotranspiração real da cultura (ET_{creal}).
- A determinação de K_c baseada em sensoriamento remoto é uma alternativa viável na cultura do milho.
- O K_c derivado do NDVI_(K_cNDVI) apresentou valores mais elevados nas fases vegetativa e reprodutiva, proporcionando um ajuste mais preciso às condições reais de campo.
- A estimativa de evapotranspiração utilizando ET_{creal}(K_cNDVI) demonstrou uma correlação maior, conforme indicado pelos valores de R^2 e r em comparação com os modelos SSEBop e DATTUTDUT.
- De modo geral, imagens de alta resolução obtidas por sensores multiespectrais e termais acoplados a VANTs se mostraram ferramentas tecnológicas de excelente precisão, capazes de realizar estimativas locais e diárias com alta acurácia.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDULLAH, S. S.; MALEK, M. A.; ABDULLAH, S. N.; KISI, O.; YAP, K. S. Extreme learning machines: A new approach for prediction of reference evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, v. 527, p. 184-195, 2015.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Estimativas de evapotranspiração real por sensoriamento remoto no Brasil. Brasília: ANA, 2020. Acessível em www.snirh.gov.br > Usos da Água.
- ALBLEWI, B.; GHARABAGHI, B.; ALAZBA, A. A.; MAHBOUBI, A. A. Evapotranspiration models assessment under hyper-arid environment. *Arabian Journal of Geosciences*, v. 8, p. 9905-9912, 2015.
- 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.
- 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.; PEREIRA, L. S.; RAES, D. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 300p. Irrigation and Drainage Paper 56.
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-based energy balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC) - Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 133, n. 4, p. 380-394, 2007.
- ALMEIDA, F. P. Evapotranspiração das culturas do milho e feijão no bioma Cerrado utilizando sensoriamento remoto por drones e satélites, 2023. 89 f. Tese (Doutorado em Agronomia: Solo e Água) – Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2023.
- ALVARENGA, M. A. R. Tomate: produção em campo, casa de vegetação e hidroponia. Lavras: Editora Universitária de Lavras, 2. ed. Ver. e ampl. 2013. 455 p.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL). Levantamento da Agricultura Irrigada por Pivôs Centrais no Brasil – 2014: relatório síntese / Agência Nacional de Águas. Brasília: ANA, 2016. 33p.
- ANDERSEN, H.-E.; REUTEBUCH, S. E.; MCGAUGHEY, R. J. A rigorous assessment of tree height measurements obtained using airborne LiDAR and conventional field methods. *Canadian Journal of Remote Sensing*, v. 32, n. 5, p. 355-366, 2006.
- ANTUNES, Felipe Moragas; JUNIOR, Joari Roberto; CARVALHO, José Henrique; PEDROSO, Elias José. Diagnóstico do uso de drones na agricultura moderna, 2023.
- ARAGÃO, R.; CRUZ, M. A. S.; AMORIM, J. R. A.; MENDONÇA, L. C.; FIGUEIREDO, E. E.; SRINIVASAN, V. S. 2013. Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo swat e simulação dos processos hidrossedimentológicos em uma bacia no agreste nordestino. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, v. 37, n. 4, p. 1091- 1102.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE AEROMODELISMO. Definição de veículo aéreo não tripulado. In: MOLIN, J. P. (Ed.). *Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) em aplicações agrícolas*. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2015. p. 123-135. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1003485/1/CAP8.pdf>. Acesso em: 13 jan. 2025.

- ASSUNÇÃO, André Luiz Couto; DOURADO NETO, Durval. Avaliação da disponibilidade de energia elétrica para expansão da área irrigada no Brasil. 2018. Universidade de São Paulo, Piracicaba. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11136/tde-03052018-103142/en.php>. Acesso 07 de julho de 2022.
- BASTIAANSSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, v. 212-213, p. 198-212, 1998.
- BEZERRA, B. G., SILVA, B. B. D., BEZERRA, J. R. C., & BRANDÃO, Z. N. (2010). Evapotranspiração real obtida através da relação entre o coeficiente dual de cultura da FAO-56 e o NDVI. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 25, 404-414.
- BEZERRA, R. S. Épocas de cultivo, densidades de plantio e soma térmica de híbridos de tomate para processamento industrial. 2019. 55 f.
- BRAGA, Marcos Brandão; CALGARO, Marcelo. Sistema de Produção de Melancia. Petrolina –PE, EMBRAPA SEMIÁRIDO. 2010. Disponível em: <https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Melancia/SistemaProducaoMelancia/irrigacao.htm>. Acesso 07 de julho de 2022.
- BRESSIANI, D. A.; GASSMAN, P. W.; FERNANDES, J. G.; GARBOSSA, L. H. P.; SRINIVASAN, R.; BONUMÁ, N. B.; MENDIONDO, E. M. 2015. Review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects. *Int. J. Agric. & Biol. Eng.*, v. 8, n. 3, p. 9-35.
- BURRIDGE, D. M. AND GADD, A. J.: The Meteorological Office operational 10-level numerical weather prediction model (December 1975), British Meteorological Office, Bracknell, England, available at: <https://trove.nla.gov.au/version/9853886> (last access: 15 March 2020), 1977.
- CALDARELI, C. E.; BACCHI, M.R.P. Fatores de influência no preço do milho no Brasil. *Nova economia*, Belo Horizonte, v. 22, n. 1, p. 141-162, 2012.
- CAMARGO, ÂNGELO PAES DE; CAMARGO, MARCELO BENTO PAES DE. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. *Bragantia*, v. 59, p. 125-137, 2000.
- CARMO, R. L., OJIMA, A. L. R O., OJIMA, R., NASCIMENTO, T. T. Água virtual, escassez e gestão: O Brasil como grande “exportador” de água. *Ambiente e Sociedade*. Campinas, SP, Brasil. V.X, n 1. P. 83-96. Jan-jun, 2007.
- CARVALHO, L. G. D., Rios, G. F. A., Miranda, W. L., & Castro Neto, P. (2011). Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 41, 456-465.
- CAVALCANTE JUNIOR, E. G.; OLIVEIRA, A. D.; DE ALMEIDA, B. M.; ESPÍNOLA SOBRINHO, J. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para as condições do semiárido Nordeste. *Semina: Ciências Agrárias*, Londrina, v.32, n.1, p.1699-1708. 2011.
- CENTENO, J. A. S.; MITISHITA, E. A. Laser scanner aerotransportado no estudo de áreas urbanas: A experiência da UFPR. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. Anais... São José dos Campos: INPE, 2007. p. 3645-3652.
- CHAVES, S. W. P.; AZEVEDO, B. M.; MEDEIROS, J. F.; BEZERRA, F. M. L.; MORAIS, N. B. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo da pimenteira em lisímetro de drenagem. *Revista Ciência Agronômica*, v.36, n.3, p. 262-267, 2005.

- CHENG, T.; YANG, Z.; INOUE, Y.; ZHU, Y.; CAO, W. Recent advances in remote sensing for crop growth monitoring. *Remote Sens.* 2016, 8, 116.
- CINTRA, F. L. D.; LIBARDI, P. L.; SAAD, A. M. Balanço hídrico no solo para porta enxerto de citros em ecossistema de Tabuleiro Costeiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.4, n.1, p.23-28, 2000.
- CLEMENTE, F.M.T.; BOITEUX, Leonardo S. Produção de tomate para processamento industrial. *CEP*, v. 70, p. 970, 2012.
- CODEPLAN, DISTRITO FEDERAL. Atlas Do Distrito Federal 2017.
- COMPANHIA BRASILEIRA DE ABASTECIMENTO (CONAB). Acompanhamento da safra brasileira de grãos 2023/2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>, Acesso em: 05 de setembro de 2024
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Tomate: Análise dos Indicadores da Produção e Comercialização no Mercado Mundial, Brasileiro e Catarinense. 2019.
- CRUZ, J. C.; KARAM, D.; MONTEIRO, M. A. R.; MAGALHÃES, P. C. A cultura do milho. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2008. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/491689/a-cultura-do-milho>.
- CRUZ, J. C.; PINTO FILHO, I. A.; PIMENTEL, M. A. G.; COELHO, A. M.; KARAM, D.; CRUZ, I.; GARCIA, J. C.; MOREIRA, J. A. A.; OLIVEIRA, M. F.; GONTIJO NETO, M. M.; DE ALBUQUERQUE, P. E. P.; VIANA, P. A.; MENDES, S. N.; DA COSTA, R. V.; ALVARENGA, R. C.; MATRANGOLO, W. J. R. Produção de milho na agricultura familiar. Embrapa: Circular técnica 159, Sete Lagoas, 2011.
- CUNHA, A. R.; ESCOBEDO, J.F.; KLOSOWSKI, E.S. Estimativa do fluxo de calor latente pelo balanço de energia em cultivo protegido de pimentão. *Pesquisa Agropécuaria Brasileira*, Brasília, v. 37, n. 6, p. 735-743, 2002.
- CUNHA, F. F., MAGALHÃES, F. F., & Castro, M. A. (2013). Métodos para estimativa da evapotranspiração de referência para Chapadão do Sul-MS. *Engenharia na Agricultura*, 21(2), 159-172, 2013. <https://doi.org/10.13083/reveng.v21i2.346>.
- DE CASTRO JORGE, Lúcio André; INAMASU, Ricardo Y. Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) em agricultura de precisão. *Ferramentas para agricultura de precisão*, v. 8, p. 109, 2013.
- DE FANÇA, M. V., DE MEDEIROS, R. M., DE HOLANDA, R. M., SABOYA, L. M. F., NETO, F. C. R., & DE ARAÚJO, W. R. (2021). Análise da estimativa da evapotranspiração por diferentes modelos para Amparo de São Francisco–Sergipe. *Research, Society and Development*, 10(13), e514101321505-e514101321505.
- DING, G. K. C.; GHOSH, S. Sustainable water management – A strategy for maintaining future water resources. *Encyclopedia of Sustainable Technologies*, p.91-103, 2017. Disponível em: <https://opus.lib.uts.edu.au/handle/10453/114985>. Acesso em 05 de junho de 2024.
- DJI BRASIL. Principais tipos de drones profissionais. 2024. Disponível em: <https://blog.lojadji.com.br/principais-tipos-de-drones-profissionais/>. Acesso em: 03 jan. 2025.
- EMBRAPA Instrumentação. (2018). Sensores embarcados em drones: uma visão geral. Documentos Embrapa. Acesso em 02 de julho de 2024.

- EMBRAPA Milho e Sorgo. 2012. Disponível em: <
<https://www.embrapa.br/milhoesorgo/cultivos>>. Acesso em: 13 janeiro 2025.
- EMBRAPA Territorial. (2018). Satélites de monitoramento. Campinas. Acesso em 02 de julho de 2024.
- EMBRAPA. Milho Verde: Produção e Sistemas Diferenciais de Cultivo. Disponível em:
<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/milho/producao/sistemas-diferenciais-de-cultivo/milho-verde>.
 Acesso em: 10 Jan. 2025.
- EMBRAPA. Tomate industrial: sistema de produção. Versão eletrônica. Jan, 2003. Disponível em:
 <<https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Tomate/TomateIndustrial/index.htm> >. Acesso em: 07 dez. 2024
- FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A. B.; PAZ, R. L. Da.; AMORIM, A. de. O. Evapotranspiração: uma revisão sobre os métodos empíricos. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2010. 44 p. (Documentos 263).
- FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A.; BERGAMASCHI, H. Balanço de energia em soja irrigada e não-irrigada. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 26, n. 03, p. 403- 410, 1991.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. Water for Sustainable Food and Agriculture: A report produced for the G20 Presidency of Germany. Rome, 2017.
- GIONGO, Marcos et al. LiDAR: princípios e aplicações florestais. Pesquisa Florestal Brasileira, v. 30, n. 63, p. 231-231, 2010.
- GIRALDELI, Ana Ligia. Drones na agricultura: Como eles te ajudam a lucrar mais. 2015. Disponível em: < <https://blog.aegro.com.br/drones-na-agricultura/>>. Acesso em 20 de setembro 2024.
- GOCIC, M.; TRAJKOVIC, S. Software for estimating reference evapotranspiration using limited weather data. Computers and Electronics in Agriculture, v. 71, p. 158-162, 2010.
- GÓMEZ-BARBERO, M., & GUTIÉRREZ-MARTÍN, C. (2019). Agricultura 4.0: Una revolución tecnológica para un sector más sostenible y conectado. Estudios de la Economía Agraria y Pesquera, 236, 15-40.
- HOLLER, W., de VASCONCELLOS, B. N., GEMIGNANI, B., CORTE, A., MALLMANN, A., DE VASCONCELLOS, B. N., ... & MALLMANN, A. A. (2022). Câmeras modificadas e multiespectrais embarcadas em drones: enfoque para estudos da vegetação.
- HUSSAIN, A.; PU, H.; SUN, D-W. Innovative nondestructive imaging techniques for ripening and maturity of fruits -A review of recent applications. Trends in Food Science & Technology, v.72: 144-152, 2018.
- JAVADIAN, M.; BEHRANGI, A.; GHOLIZADEH, M.; TAJRISHY, M. METRIC and WaPOR estimates of evapotranspiration over the Lake Urmia Basin: Comparative Analysis and Composite Assessment. Water, Basel, v. 11, n. 8, p. 1647, 2019.
- 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. W.; BURMAN, R. D.; ALLEN, R. G. Evapotranspiration and irrigation water requirements. New York: American Society of Civil Engineers. (ASCE. Manual and Reports on Engineering Practices, 70), p.329, 1990.

- JESUS, J. B. Estimativa do balanço hídrico climatológico e classificação climática pelo método de Thornthwaite e Mather para o município de Aracaju-SE. *Scientia Plena*, v.11, n. 5, Aracaju, 2015.
- 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.
- KHANAL, S.; FULTON, J.; SHEARER, S. An overview of current and potential applications of thermal remote sensing in precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, v.139: 22-32, 2017.
- KRISHNAN, P.; MEYERS, T.P.; SCOTT, R.L.; KENNEDY, L.; HEUER, M. Energy exchange and evapotranspiration over two temperate semi-arid grasslands in North America. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.152, p.31-44, 2012. DOI: 10.1016/j.agrformet.2011.09.017.
- LAURIN, G. V.; BELLI, C.; BIANCONI, R.; LARANCI, P.; PAPALE, D. Early mapping of industrial tomato in Central and Southern Italy with Sentinel 2, aerial and RapidEye additional data. *The Journal of Agricultural Science, Cambridge*, v. 156, n. 3, p. 396-407, 2018.
- LEMOES FILHO, L.C. de A.; CARVALHO, L.G.; EVANGELISTA, A.W.P.; CARVALHO, L.M.T.; DANTAS, A.A.A. Análise espaço-temporal da evapotranspiração de referência para Minas Gerais. *Ciência e Agrotecnologia*, v.31, p.1462-1469, 2007.
- LI, Z. L.; TANG, R.; WAN, Z.; BI, Y.; ZHOU, C.; TANG, B.; YAN, G.; ZHANG, X. A review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation from remotely sensed data. *Sensors*, v.9, n.5, p. 3801-3853, 2009.
- LIBARDI, P.L. Dinâmica da água no solo. Piracicaba, 1995. 497p.
- LIMA, J. E. F. W., FREITAS, G. K., PINTO, M. A. T., & SALLES, P. S. B. A. (2018). Gestão da crise hídrica 2016–2018-Experiências do Distrito Federal. *ADASA: Brasília, Brazil*.
- LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D.; LIRA, C. A. B. O.; SOUZA, E. S.; SILVA, I. F. Balanço de energia e evapotranspiração de feijão caupi sob condições de sequeiro. *Revista Ciência Agronômica*, v. 42, n. 1, p. 65-74, 2011
- MALTA, Édio Albertin. Avaliação do modelo SSEBop na estimativa de evapotranspiração real da cultura do trigo. 2020.
- MARQUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C. Tomateiro para processamento industrial: irrigação e fertirrigação por gotejamento. 2002.
- MARTÍ, P.; ZARZO, M.; VANDERLINDEN, K.; GIRONA, J. Parametric expressions for the adjusted Hargreaves coefficient in Eastern Spain. *Journal of Hydrology*, v. 529, p. 1713-1724, 2015.
- MAULE, Rodrigo Fernando. Método multidisciplinar de análise territorial para o fortalecimento da agricultura irrigada: aplicação em políticas públicas. 2020. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2020. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11136/tde-10032020-160127/en.php>>. Acessado em 08 de julho de 2022.
- McSHANE, R. R.; DRISCOLL, K. P.; e 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*, n. 5087, 2017.

- MOHAN, S.; ARUMUGAM, N. Relative importance of meteorological variables in evapotranspiration: factor analysis approach. *Water Resources Management*, [s.l.], Springer Science and Business Media, v. 10, n. 1, p. 1-20, fev. 1996. <http://dx.doi.org/10.1007/bf00698808>.
- MOREIRA, M. A. (2011). *Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação*. Editora UFV.
- NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; WILLIAMS, J. R. 2005. Soil and Water Assessment Tool. Input/output file documentation: Version. Temple: Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, EUA, 530p
- 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.
- PÁDUA, L., VANKO, J., HRUŠKA, J., ADÃO, T., SOUSA, J. J., PERES, E., MORAIS, R. UAS, sensors, and data processing in agroforestry: A review towards practical applications. *International journal of remote sensing*, 38(8-10), 2349-2391, 2017
- PAIVA JUNIOR, M. C. Desempenho de cultivares para produção de milho verde em diferentes épocas e densidades de semeadura. 1999. 66 f. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1999.
- PAYERO, J. O.; IRMAK, S. Daily energy fluxes, evapotranspiration and crop coefficient of soybean. *Agricultural Water Management*, v. 129, p. 31-43, 2013.
- PAYERO, J. O.; NEALE, C. M. U.; WRIGHT, J. L.; ALLEN, R. G. Guidelines for validating Bowen ratio data. *Transactions of the ASAE*, v. 46, n. 4, p. 1051-1060, 2003.
- PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society*, v.193, n.1, p.454-465, 1948.
- PEREIRA, A. R., VILLA NOVA, N. A., SEDIYAMA, G.C. Evapotranspiração. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.
- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. Agrometeorologia: Fundamentos e aplicações práticas. Guaíba: Livraria e Editora Agropecuária. 2002. 478 p.
- PIERDONÁ, H. L., DE PAULA, A. C. P., SILVA, C. L. D., WARREN, M. S., & RODRIGUES, L. N. (2019). Comparação entre dois modelos usados na estimativa da evapotranspiração real da cultura da soja. *Engenharia na Agricultura*, 27(5).
- PEREIRA FILHO, I. A. O cultivo do milho-verde. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2002. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/485177/o-cultivo-do-milho-verde>.
- PORTMANN, F. T.; SIEBERT, S.; DÖLL, P. MIRCA2000 - Global monthly irrigated and rainfed crop areas around the year 2000: A new high-resolution data set for agricultural and hydrological modeling. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 24, p. 1-24, 2010.
- PROFETA, A. L. (2015). *Estimativa da evapotranspiração real em área de relevo acidentado utilizando o SEBAL*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/IGCM-AV4MJT/1/dissertacao_andreluizprofeta.pdf

- QUANTUM SYSTEMS. *Trinity Pro*. Disponível em: <https://quantum-systems.com/trinity-pro/>. Acesso em: julho de 2024.
- RAGAB, R. Integrated management tool for water, crop, soil and N-fertilizers: The SALTMED model. *Irrigation and Drainage*, v. 64, p. 1-12, 2015.
- RANA, G.; KATERJI, N. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. *European Journal of Agronomy*, v. 13, p. 125-153, 2000.
- REICHARDT, K. Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera. 4 ed. São Paulo: Fundação Cargill, 1985, 445p.
- 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.; SÓE 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.
- REZENDE, FABIO DOS ANJOS. Utilização de drones de pequeno porte como alternativa de baixo custo para realização de levantamentos topográficos. 2019. Disponível em: Acesso em 20 de dezembro 2024.
- RIBEIRO, SILVIO CÉSAR LIMA. O uso do Lidar aerotransportado para obtenção de métricas de ocupação em assentamentos precários. 2019. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- ROCHA, J.; SIMÕES, M.; MARQUES DA SILVA, J. R.; SOARES, R.; NETO, M.; GRANJA-MARTINS, F. M. Remote sensing based crop coefficients for water management in agriculture. In: *Sustainable Development in Agriculture*. IntechOpen, 2010. p. 167-192. <https://doi.org/10.5772/9922>.
- RODRIGUES, L. N.; ZACCARIA, D. Agricultura Irrigada: um breve olhar. Embrapa Cerrados-Livro técnico (INFOTECA-E), 2020.
- 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.
- ROUSE, J. W., HAAS, R. H., SCHELL, J. A., & DEERING, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite (ERTS) Symposium*, NASA SP-351, 1, 309-317
- SALES, D. L. A.; ALVES JÚNIOR, J.; CASAROLI, D.; EVANGELISTA, A. W. P.; SOUZA, J.M.F. Estimativa de evapotranspiração e coeficiente de cultura do tomateiro industrial utilizando o algoritmo SAFER. *Irriga, Botucatu*, v. 22, n. 3, 2017.
- SALES, D. L. A.; ALVES JÚNIOR, J.; CASAROLI, D.; EVANGELISTA, A. W. P.; SOUZA, J.M.F. Estimativa de evapotranspiração e coeficiente de cultura do tomateiro industrial utilizando o algoritmo SAFER. *Irriga, Botucatu*, v. 22, n. 3, 2017.
- SANTOS, F. L., & ALMEIDA, D. A. (2020). Uso de drones e sensores para agricultura de precisão. *Revista Brasileira de Agricultura*, 45(3), 245-260.
- SANTOS, M. R.; SEDIYAMA M. A. N.; SANTOS I. C.; SALGADO L. T.; VIDIGA S. M. Produção de milho-verde em resposta ao efeito residual da adubação orgânica do quiabeiro em cultivo subsequente. *Rev. Ceres, Viçosa*, vol.58, n.1, pp. 77-83, 2011.

- SAWAMBO, HERMENEGILDO AURÉLIO RODRIGUES. Monitorização e avaliação da produção de milho utilizando tecnologias de agricultura de precisão: estudo de caso Huíla-Angola. 2023. Dissertação de Mestrado. Universidade de Évora.
- SCHOTT, J. R. (2007). Remote Sensing: The Image Chain Approach. Editora Oxford University Press, 2ª Edição. ISBN: 978-0-19-517817-3
- 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
- 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.
- SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM RURAL. *Agricultura de precisão: operação de drones*. Brasília: SENAR, 2018. Disponível em: <https://www.cnabrazil.org.br/assets/arquivos/249-DRONES.pdf>. Acesso em: 13 dezembro. 2024.
- SILVA, C. J.; FRIZZONE, J. A.; SILVA, C. A.; GOLYNSKI, A.; SILVA, L. F. M.; MEGGUER, C. A. Tomato yield as a function of water depths and irrigation suspension periods. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 23, n. 8, p. 591-597, 2019.
- SILVA, J. F.; OLIVEIRA, C.; LIMA, T. Uso de drones para aplicação de defensivos e fertilizantes. Jornal de Pesquisa Agrícola, v. 8, n. 2, p. 45-50, 2019.
- SILVA, JOÃO PEDRO; GARCIA, MARIA ROSA. Aplicação do modelo SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) para estimativa de evapotranspiração no Paraguai utilizando imagens de satélite. Assunção: Editora Científica, 2023. Disponível em: <https://exemplo.com>. Acesso em: 12 jan. 2025
- SIMÕES, R. S., DE OLIVEIRA, U. R., DE ALMEIDA ESPINOZA, J. M., DA GUIA ALBUQUERQUE, M., & ALVES, D. C. L. (2019). Uso de drone de pequeno porte para análise costeira: enfoque metodológico (Use of small drone for coastal analysis: methodological approach). *Revista brasileira de geografia física*, 12(2), 622-640.
- SMITH, M. Reporto n the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements: Rome: FAO, p. 54, 1991.
- STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Determinação da evapotranspiração para fins de irrigação. EMBRAPA-CNPAP, Goiânia. 49p. 1995.
- TACONI, GUILHERME BRUSTOLIN. A IMPORTÂNCIA DO DRONE NA AGRICULTURA DE PRECISÃO.
- TEIXEIRA, LÉA MORAES NUNES. Evapotranspiração em vegetação natural do bioma Caatinga obtida por balanço hídrico no solo e por sensoriamento remoto / Léa Moraes Nunes Teixeira. – 2018. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2018.
- THORNTHWAITE, C. W. & MATHER, J. R. The water balance. Publications in Climatology, New Jersey, Drexel Inst. of Technology, 1955.104p.
- THORNTHWAITE, C. W.; WILM, H. G. Report of the committe on evapotranspiration and transpiration. Transactions of the American Geophysical Union, v. 25, p. 686-693, 1944.

- TIMMERMANS, W. J., KUSTAS, W. P., AND ANDREU, A.: Utility of an Automated Thermal-Based Approach for Monitoring Evapotranspiration, *Acta Geophys.*, 63, 1571–1608, <https://doi.org/10.1515/acgeo-2015-0016>, 2015.
- TORRES-SÁNCHEZ, J.; PEÑA, J.M.; DE CASTRO, A.I.; LÓPEZ-GRANADOS, F. Multi-temporal mapping of the vegetation fraction in early-season wheat fields using images from UAV. *Comput. Electron. Agric.* 2014, 103, 104–113
- TREICHEL . Anuário Brasileiro do Tomate 2016. Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz, 2016. 64 p. Disponível em: <http://www.editoragazeta.com.br/flip/anuario-tomate2016/files/assets/common/downloads/publication.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2024.
- TUCCI, C.E.M. Hidrologia: Ciência e Aplicação. UFRGS/ABRH, Porto Alegre – RS, 1998, 943 p.
- USDA. Commodity Forecasts. World Agricultural Supply and Demand Estimates. USDA, 2021. Disponível em: . Acesso em: 08 de setembro de 2024.
- VALE, B. S. D., ROIG, H. L., NEUMANN, M. R. B., FERNANDES, E. D. S., SALLES, L. D. A., CASARI, R. A. D. C. N., ... & MALTA, É. A. (2022). Desempenho dos Modelos SEBAL e SSEBop na Estimativa da Evapotranspiração do Trigo no Cerrado. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 37, 329-345.
- VERDE AGRÍCOLA. O ciclo do milho e sua importância na nutrição de plantas. 2023. Disponível em: <https://blog.verde.ag/pt/nutricao-de-plantas/ciclo-do-milho>. Acesso em: 10 Jan. 2025.
- Vian, A. L., Bredemeier, C., Silva, P. R. F. D., Santi, A. L., Silva, C. P. G. D., & Santos, F. L. D. (2018). Limites críticos de NDVI para estimativa do potencial produtivo do milho. *Revista brasileira de milho e sorgo. Sete Lagoas. Vol. 17, n. 1 (2018), p. 91-100.*
- VIANA, L. A., ZAMBOLIM, L., SOUSA, T. V., & TOMAZ, D. C. (2018). Potencial uso de câmera termal acoplada a VANT para monitoramento de culturas. *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas*, 12(3), 286-298.
- WAGNER, W.; ULLRICH, A.; MELZER, T.; BRIESE, C.; KRAUS, K. From single-pulse to fullwaveform airborne laser scanners: potential and practical challenges. In: ISPRS Congress, 20., 2004, Istanbul, Turkey. *Geo-Imagery Bridging Continents: proceedings...Istanbul, 2004.* p. 201-206. (International archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, v. 35, pt. B3).
- 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.
- XIE, Y., SHA, Z., & YU, M. Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review. *Journal of plant ecology*, 1(1), 9-23, 2008.
- YANG, C.; HOFFMANN, W.C. Low-cost single-camera imaging system for aerial applicators. *J. Appl. Remote Sens.* 2015, 9, 096064.
- YOSHIMOTO, M.; OUE, H.; KOBAYASHI, K. Energy balance and water use efficiency of rice canopies under free-air CO₂ enrichment. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 133, p. 226-246, 2005.
- ZHANG, C., & KOVACS, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. *Precision Agriculture*, 13(6), 693-712.