

**MARYJANE DINIZ DE ARAÚJO GOMES**

**COEFICIENTE DE CULTIVO PARA A VIDEIRA COM BASE NO ÍNDICE DE  
VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA OBTIDO COM USO DE VANT**

**Botucatu**

**2019**



**MARYJANE DINIZ DE ARAÚJO GOMES**

**COEFICIENTE DE CULTIVO PARA A VIDEIRA COM BASE NO ÍNDICE DE  
VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA OBTIDO COM USO DE VANT**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências  
Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu,  
para obtenção do título de Doutor em  
Agronomia (Irrigação e Drenagem) .

Orientador(a): Rodrigo Máximo Sánchez  
Román

Coorientador(a): Mac McKee

**Botucatu**

**2019**

G633c

Gomes, Maryjane Diniz de Araújo

Coeficiente de cultivo para a videira com base no índice de vegetação por diferença normalizada obtido com uso de VANT / Maryjane Diniz de Araújo Gomes. -- Botucatu, 2019  
100 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),  
Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu

Orientador: Rodrigo Máximo Sánchez Román

Coorientador: Mac McKee

1. Imagens de sensoriamento remoto. 2. Irrigação. 3.  
Evapotranspiração. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da  
Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte”

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO


Título: “COEFICIENTE DE CULTIVO PARA A VIDEIRA COM BASE NO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA OBTIDO COM USO DE VANT”

AUTORA: MARYJANE DINIZ DE ARAÚJO GOMES

ORIENTADOR: RODRIGO MÁXIMO SÁNCHEZ ROMÁN

COORIENTADOR: MAC MCKEE

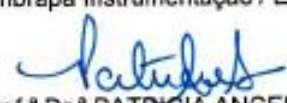
Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em AGRONOMIA (IRRIGAÇÃO E DRENAGEM), pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. RODRIGO MÁXIMO SÁNCHEZ ROMÁN  
Engenharia Rural / UNESP - Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu

  
Prof. Dr. EDSON LUÍS PIROLI  
Coordenadoria Executiva / Unidade de Ourinhos / Universidade Estadual Paulista

  
Prof. Dr. ENZO DAL PAI  
Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu

  
Prof. Dr. LUÍS HENRIQUE BASSO  
Embrapa Instrumentação / EMBRAPA

  
Prof.ª Dr.ª PATRÍCIA ANGÉLICA ALVES MARQUES  
Engenharia de Biosistemas / Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ)

Botucatu, 29 de julho de 2019.



Aos meus pais, João Bosco e Mariana.

Quantas vezes vocês deixaram de realizar seus próprios sonhos para que os meus fossem realizados? Quantas vezes renunciaram suas vidas para dedicá-las à minha?

Quantas vezes sofreram por mim, sorriram pelas minhas alegrias, torceram pela minha felicidade e se orgulharam das minhas conquistas como se fossem suas próprias?

Por estas infinitas vezes de dedicação incondicional.

Dedico!





## AGRADECIMENTOS

A Deus, por estar sempre nos momentos mais difíceis da minha vida pessoal e profissional provando que só carregamos a cruz a qual podemos suportar, dando-me forças para que minha fé não seja abalada diante dos obstáculos da vida.

Aos meus queridos pais, João Bosco Gomes e Mariana Diniz de Araújo Gomes, pelo apoio incondicional.

Aos meus filhos, Jéssica Letícia e Ricken, pela paciência nos momentos de ausência dedicados à minha vida acadêmica, por compreenderem os momentos de dificuldades e por serem motivadores das lutas e batalhas que travei ao longo da vida.

Aos meus familiares, em nome da minha irmã Meyrienne D. de A. Gomes, que sempre estiverem presentes apoiando à trajetória destes quatro anos de doutorado.

À minha avó Rita Amália (*in memoriam*) por sempre acreditar na minha trajetória acadêmica dando-me forças com suas orações e palavras de conforto, quando nem eu mesma acreditava na caminhada.

Ao meu avô José Ozério por ter contribuído com a minha educação de base, encorajando-me fazer uma longa caminhada à escola, no ensino fundamental, época muito difícil da minha família. Sem essa parte dos meus estudos não teria chegado ao Doutorado.

Ao meu orientador, Dr. Rodrigo Máximo Sánchez Román, pela orientação durante todo curso de doutorado e por oportunizar-me ir além dos meus limites, fazendo com que eu superasse dificuldades inimagináveis.

Aos meus coorientadores do estágio de doutoramento nos EUA, Dr. Mac MacKee e Dr. Alfonso Torres Rua, pelo apoio e confiança na realização deste trabalho, por ter me recebido na equipe do Laboratório de Pesquisa de Água de Utah, na Universidade do Estado de Utah - EUA. Sem esta contribuição e parceria não teria sido possível a realização e o êxito desta pesquisa.

A toda equipe de pesquisa do Laboratório de Pesquisa de Água de Utah, em especial ao Mahyar Aboutalebi, pela paciência incansável nos momentos de ensinamento no meu Doutorado Sanduíche.

A toda equipe pesquisadora do Projeto GRAPEX (*Grape Remote sensing Atmospheric Profile and Evapotranspiration eXperiment*) do Departamento de Agricultura do Estados Unidos (United States Department of Agriculture).

À Joseph G. Alfieri, William P. Kustas, John H. Prueger, Lawrence E. Hipps e Lynn McKee, cientistas responsáveis por calibrar e fazer a manutenção dos instrumentos de medições de dados climáticos.

Aos Professores Dr. Zacarias Xavier de Barros e Dr. Fernando Braz Tangerino Hernandez pelos ensinamentos profissionais e pessoais durante meu curso de doutorado.

À Yéssica e a Dona Geni, pelos momentos compartilhados, pelas aulas de inglês nos finais de semana e por ter me acolhido em suas famílias. Vocês foram a família que construí nos EUA, sempre levarei em meu coração.

Ao meu amigo Élvis da Silva Alves, pela dedicação e paciência em ajudar no desenvolvimento desta pesquisa, contribuindo para efetivação da minha qualificação e defesa da Tese.

Aos meus estimados amigos e colegas de trabalho do IFPA Campus Castanhal pelo apoio durante a fase de finalização da minha Tese: Félix Lellis, Shirley Nascimento, Roberto Dias Lima, Iris Brasil, Célia Guimarães, Marcos Serafim.

Aos meus amigos pelo companheirismo ao longo do doutorado tornando a minha caminhada mais leve: Christiane Araújo, David Vitor, Jannaylton Santos, Kadson Frutuoso, Kevim Muniz, Maurício Padro, Marcos Liodorio, Regiane Carvalho, Thaís Zarili, Thalyson Medeiros e Victor Araújo.

À minha amiga e irmã Hilbaty Rodrigues, por estar sempre ao meu lado em toda a trajetória da minha vida acadêmica, desde 2009, segurando-me nos momentos de queda e comemorando nos momentos de felicidade.

Agradeço ao Giovane dos Anjos Aires, pela paciência, dedicação e companheirismo nos dias do deserto atravessado durante a finalização desta pesquisa. Os momentos de força e as palavras duras serviram de pilares para suportar a carga da finalização da caminhada. Obrigada por não soltar a minha mão.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro concedido por meio da bolsa do doutorado e pela bolsa de estudos concedida para estágio de doutoramento nos Estados Unidos.

Ao Programa de Irrigação e Drenagem da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP) – Faculdade de Ciências Agronômica (FCA), por conceder a oportunidade de aprimoramento profissional.

À banca examinadora, pelas contribuições para o aprimoramento desta pesquisa.

Ao Instituto Federal do Pará (IFPA), pela concessão do afastamento das minhas atividades efetivas de professora para finalização do meu doutorado.



“O mundo é grande e o destino me espera  
Não é você quem vai me dar na primavera  
As flores lindas que eu sonhei no meu verão

Cartas na mesa  
O jogador conhece o jogo pela regra  
Não sabes tu que eu já tirei leite de pedra

Eu me criei  
Matando a fome com tareco e mariola  
Fazendo versos dedilhados na viola  
Por entre os becos do meu velho vassoural”.

Flávio José



## RESUMO

As diversas interações do meio biofísico de uma área cultivada dificultam a compreensão e estudos do comportamento da vegetação por meio de medições de campo. Essas dificuldades fizeram do sensoriamento remoto, por meio de imagens de satélites, uma ferramenta robusta para investigações desses ecossistemas em diferentes regiões. As imagens de satélites vêm sendo uma ferramenta bastante utilizada para cálculos de demandas hídricas das culturas irrigadas com grande eficiência. Porém, existe a limitação da periodicidade uma vez que os satélites utilizados, como Landsat 8, levam 16 dias para retornar à uma mesma região. Como alternativa para imagens aéreas de alta resolução e diárias nos dias atuais estão sendo utilizados os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT), como os Drones. O trabalho teve como objetivo determinar a demanda hídrica da videira *Pinot Noir* por meio de índice de vegetação, utilizando imagens diárias obtidas com o uso de VANT. Os resultados obtidos foram comparados com dados medidos de campo. A demanda hídrica foi calculada por meio da estimativa dos coeficientes de cultivo utilizando o NDVI (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada) e a evapotranspiração de referência. O resultado deste trabalho mostrou que a resolução influencia nos valores dos índices vegetativos e, conseqüentemente, nos parâmetros que podem ser estimados por eles. Logo, as imagens capturadas por VANT expressam valores mais próximo do real em uma escala temporal diária, obtendo-se resultados mais satisfatória para o uso no manejo da irrigação.

**Palavras-chave:** Sensoriamento remoto. Demanda hídrica. NDVI.





## ABSTRACT

The diverse interactions of the biophysical environment of an acreage make it difficult to study vegetation behavior through field measurements. These difficulties made remote sensing, through satellite images, a robust tool for investigating these ecosystems in different regions. Satellite images have been a widely used tool for calculating the water demands of irrigated crops with great efficiency. However, there is a limitation of periodicity since the satellites used, such as Landsat 8, take 16 days to return to the same region. As an alternative to high resolution and daily aerial imagery today unmanned aerial vehicles (VANT), such as Drones, are being used. The objective of this work was to determine the water demand of vine Pinot Noir by vegetation index using daily images obtained with the use of VANT. The results obtained were compared with data measured of field. The water demand was calculated by estimating the crop coefficients using the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and the reference evapotranspiration. The result of this work showed that the resolution influences the values of the vegetative indexes and, consequently, the parameters that can be estimated by them. Therefore, the VANT catches express values closer to the real on a daily time scale, obtaining more satisfactory results for use in irrigation management.

**Keywords:** Remoto sensing. Water demand. Crop evapotranspiration. NDVI



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Aquisição de informação por meio da técnica de sensoriamento remoto .....	34
Figura 2 -	Espectro eletromagnético.....	35
Figura 3 -	Assinatura espectral da vegetação, do solo e da água na superfície da terra.....	36
Figura 4 -	Faixa de absorção da vegetação fotossinteticamente ativa e fatores que controlam a reflectância.....	37
Figura 5 -	Drone de asa fixa (eBee Plus – SenseFly).....	41
Figura 6 -	Drone multirrotor (SOLO – 3DR).....	41
Figura 7 -	Evolução dos veículos aéreos não tripulados da AggieAir.....	42
Figura 8 -	Localização do vinhedo em estudo nos EUA (A), no Estado da Califórnia (B) e no Borden Ranch (C) Localizado no Condado de Sacramento.....	51
Figura 9 -	Imagem aérea da área de estudo capturada pelo VANT AggieAir (esquerda) e uma imagem do satélite Landsat-8 (direita) para o mesmo local, ambas obtidas no dia 11 de julho de 2015.....	52
Figura 10 -	Precipitação mensal (P), médias mensais de temperatura do ar máxima (T min), média (T med) e mínima (T max) e umidade relativa do ar (UR) mensal, observados entre os meses de abril de 2013 a novembro de 2014 (A) e fevereiro de 2015 a novembro de 2016....	53
Figura 11 -	Carga útil (a), conexão da carga útil à Aeronave AggieAir (b) e Aeronave AggieAir (c).....	54
Figura 12 -	Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) para a cultura da videira determinado por meio de imagens obtidas com VANT (Veículos Aéreos Não Tripulados).....	66
Figura 13 -	Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) para a cultura da videira determinado por meio de imagens com Landsat 8.....	67
Figura 14 -	Coeficiente de cultivo determinado por meio do NDVI para a cultura da videira obtido por meio de imagens de VANT.....	72
Figura 15 -	Coeficiente de cultivo determinado por meio do NDVI para a cultura da videira obtido por meio de imagens do satélite Landsat.....	73

Figura 16 -	Correlação entre os Kc medidos em campo e o NDVI calculado por meio de imagens de VANT.....	80
Figura 17 -	Comparação da evapotranspiração da cultura estimada pelos modelos de sensoriamento remoto por meio de VANT (ETc_ER(D) e ETc_SR(D)) com a ETc calculada pela Covariância de Vórtices Turbulentos (ETc_RB) nas subáreas Norte (A) e Sul (B) na fase de floração.....	82
Figura 18 -	Comparação da evapotranspiração da cultura estimada pelos modelos de sensoriamento remoto por meio de satélite (ETc_ER(L8) e ETc_SR(L8)) com a ETc calculada pela Coravariância de Vórtices Turbulentos (ETc_RB) nas subáreas Norte (A) e Sul (B) na fase de floração.....	83
Figura 19 -	Comparação da evapotranspiração da cultura estimada pelos modelos de sensoriamento remoto (ETc_ER(D), ETc_SR(D), ETc_ER(L8) e ETc_SR(L8)) com a ETc calculada pela Coravariância de Vórtices Turbulentos (ETc_RB) nas subáreas Norte (A) e Sul (B) na 1° fase de desenvolvimento da baga.....	84
Figura 20 -	Comparação da evapotranspiração da cultura estimada pelos modelos de sensoriamento remoto (ETc_ER(D), ETc_SR(D), ETc_ER(L8) e ETc_SR(L8)) com a ETc calculada pela Coravariância de Vórtices Turbulentos (ETc_RB) nas subáreas Norte (A) e Sul (B) na 2° fase de desenvolvimento da baga.....	85
Figura 21 -	Comparação da evapotranspiração da cultura estimada pelos modelos de sensoriamento remoto (ETc_ER(D), ETc_SR(D), ETc_ER(L8) e ETc_SR(L8)) com a ETc calculada pela Coravariância de Vórtices Turbulentos (ETc_RB) nas subáreas Norte (A) e Sul (B) na fase de maturação.....	86

## LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 -	Coeficiente de cultivo (Kc) em função do seu estágio de desenvolvimento .....	32
Tabela 2 -	Características técnicas da série de satélites Landsat .....	38
Tabela 3 -	Características espectrais dos sensores OLI e TRIS .....	39
Tabela 4 -	Características das resoluções do modelo digital da superfície e fases fenológicas em cada data de voo .....	55
Tabela 5 -	Características dos sensores utilizados para captura das imagens com o VANT .....	56
Tabela 6 -	Valores de NDVI das subáreas Norte e Sul calculados por meio de imagens do VANT <i>AggieAir Minion</i> e do satélite Landsat 8.....	68
Tabela 7 -	Valores de Kc_NDVI das subáreas Norte e Sul calculados por meio de imagens do VANT <i>AggieAir Minion</i> e do satélite Landsat 8 .....	74
Tabela 8 -	Informações de parâmetros para o manejo da irrigação determinada por diferentes métodos para a subárea A (NORTE) e da subárea B (SUL).....	77
Tabela 9 -	Quadrados médios e testes de média para ETc, determinada por diferentes métodos para subárea A (NORTE) e subárea B (SUL).....	78
Tabela 10 -	Indicadores de desempenho para subárea Norte.....	88
Tabela 11 -	Indicadores de desempenho para subárea Sul .....	88



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AES	Satélite Terrestre Artificial
ANA	Agência Nacional de Águas
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
CTA	Centro Técnico Aeroespacial
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
DN	Números Digitais
DOS	<i>Dark Object Subtraction</i>
DPA	Decolagem e Pousos Automáticos
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ERTS	<i>Earth Resources Technology Satellite</i>
ET	Evapotranspiração
ET <sub>c</sub>	Evapotranspiração da Cultura
ET <sub>o</sub>	Evapotranspiração de Referência
ETP	Evapotranspiração Potencial
ET <sub>r</sub>	Evapotranspiração Real
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
GPS	Sistema de Posicionamento Global
GRAPEX	<i>Grape Remote sensing Atmospheric Profile and Evapotranspiration eXperiment</i>
GSD	<i>Ground Sample Distance</i>
IAE	Instituto de Aeronáutica e Espaço
IMU	<i>Inertial Measuremnet Unit</i>
IV	Índices de Vegetação
K <sub>c</sub>	Coeficiente de Cultivo
MSE	Erro Quadrado Médio

NDVI	Índice de Vegetação da Diferença Normalizada - <i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
NIR	Infravermelho Próximo
OLI	<i>Operational Land Images</i>
RBAC-E	Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Especial
REM	Radiação Eletromagnética
RMSE	Raiz Média Quadrada dos Erros
SAVI	<i>Soil-Adjusted Vegetation Index</i>
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SISANT	Sistema de Aeronaves não Tripuladas
SNC	Sistema de Navegação e Controle
USGS	Serviço Geológico dos Estados Unidos
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
VANT	Veículos Aéreos Não Tripulados



## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	25
2	<b>HIPÓTESE</b> .....	28
3	<b>OBJETIVOS</b> .....	29
3.1	<b>Objetivos gerais</b> .....	29
3.2	<b>Objetivos específicos</b> .....	29
4	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	30
4.1	<b>Evapotranspiração</b> .....	30
4.2	<b>Geoprocessamento</b> .....	33
4.2.1	Sensoriamento Remoto .....	34
4.2.2	Plataformas orbitais e aéreas.....	37
4.2.2.1	<i>Breve histórico dos VANT e sua regulamentação do Brasil</i> .....	39
4.2.3	Índices de Vegetação (IV) .....	44
4.3	<b>Agricultura Irrigada</b> .....	46
4.4	<b>Vitivinicultura</b> .....	48
5	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	51
5.1	<b>Área de estudo</b> .....	51
5.2	<b>Processamento e especificações das imagens de VANT</b> .....	54
5.3	<b>Processamento das imagens de satélite</b> .....	57
5.4	<b>Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)</b> .....	58
5.5	<b>Coeficiente de cultivo (Kc)</b> .....	58
5.6	<b>Evapotranspiração de Referência (ET<sub>o</sub>)</b> .....	59
5.7	<b>Evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>)</b> .....	60
5.8	<b>Equação para cálculo do coeficiente de cultivo por meio de sensoriamento remoto (Kc<sub>sr</sub>)</b> .....	61
5.9	<b>Avaliação do desempenho dos modelos</b> .....	60
6	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	64
6.1	<b>Comparação do NDVI encontrado por plataforma terrestre e plataforma orbital</b> .....	64
6.2	<b>Comparação do Kc_NDVI encontrados por plataforma terrestre e plataforma orbital</b> .....	70
6.3	<b>Correlação do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) com o coeficiente de cultura (Kc)</b> .....	79

6.4	Avaliação do desempenho dos modelos ETc_SR e ETc_ER.....	87
7	CONCLUSÕES.....	91
	REFERÊNCIAS.....	93

## 1 INTRODUÇÃO

O aumento da demanda hídrica causado, principalmente, pelo crescimento populacional e pelo desenvolvimento econômico, vem ocasionando uma maior escassez dos recursos hídricos em um menor espaço de tempo, pois apesar de a água ser um recurso renovável, a sua disponibilidade depende de vários fatores tais como: condições climáticas, distribuições desiguais de chuvas ao longo do ano, poluição do ar, crescimento demográfico, etc (OLIVEIRA, 2016).

O manejo sustentável dos recursos naturais é um dos maiores desafios do século XXI e o contínuo crescimento da população mundial exige que a agricultura seja, cada vez mais, competitiva e tecnificada, ao ponto de possibilitar a produção de alimentos de melhor qualidade e em maior quantidade, com a utilização racional dos recursos hídricos.

A maior parte dos sistemas de irrigação em grande escala no mundo estão localizados nas regiões áridas e semiáridas. Sabe-se que nestas regiões a escassez hídrica é um dos principais fatores limitantes da agricultura e conseqüentemente da expansão da produção agrícola. A expectativa de serem encontradas novas fontes hídricas nessas áreas é muito pequena porque a maioria dos recursos superficiais e subterrâneos já é explorada. Portanto, a expansão das áreas irrigadas, nessas regiões, é muitas vezes limitada pela disponibilidade hídrica.

Com a realidade de déficit hídrico de grande proporção e o aumento da população, o desenvolvimento da agricultura irrigada nos leva à competição crescente pelo recurso hídrico, tanto para o abastecimento da população como a geração de bens, serviços e alimentos. Assim sendo, a utilização de novas metodologias capazes de avaliar e incrementar, em diversos aspectos, a eficiência da irrigação e conseqüente produtividade agrícola, se tornam indispensáveis ao manejo dos recursos hídricos.

De acordo com o relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil - Informe 2018, da Agência Nacional de Águas (ANA), retiram-se em média uma vazão de  $2.083 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  dos rios, córregos, lagoas, lagos e reservatórios; sendo que 52% vão para irrigação. Já a vazão média de consumo é de  $1.158 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  e a irrigação é a atividade responsável por 68,4% do uso desta vazão (BRASIL, 2018). Sendo a irrigação uma atividade que ainda possui um potencial de crescimento de 76 milhões de hectares.

A irrigação é uma prática agrícola que visa, principalmente, atender as necessidades hídricas das culturas no momento adequado para garantir a produção agrícola. Normalmente, a irrigação permite uma suplementação do regime de chuvas, viabilizando o cultivo em regiões com escassez mais acentuada de água, como o Semiárido, ou em locais com períodos específicos de seca, como a região central do Brasil (BRASIL, 2018).

O manejo adequado da irrigação depende do conhecimento de diversos fatores tais como: necessidade hídrica da cultura, método de irrigação adotado e fatores climáticos, os quais interferem na evapotranspiração da planta e na sua demanda hídrica. O desempenho dos projetos de irrigação depende do dimensionamento hidráulico e operacionalização do sistema para que funcionem com uma eficiência do uso da água aceitável para produtividade dos sistemas agrícolas irrigados (NASCIMENTO; FEITOSA; SOARES, 2017).

Uma das formas de determinar a necessidade hídrica das culturas irrigadas consiste na proposta de Doorenbos e Pruitt (1977), que calcula a evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ) por meio do produto entre a evapotranspiração de uma cultura de referência ( $ET_o$ ) e um coeficiente de cultura ( $K_c$ ) tem sido o mais utilizado. Neste contexto, para um melhor manejo da irrigação, se faz necessária a obtenção da  $ET_c$  com frequência temporal por meio de modelagens hídricas e agrícolas.

A porcentagem da evapotranspiração em relação ao total de água precipitada varia consideravelmente entre os diferentes biomas existentes. Sendo assim, o sensoriamento remoto é uma ferramenta poderosa que possui a capacidade de obtenção da evapotranspiração em ecossistemas, podendo ser utilizado diferentes resoluções espaciais e em diferentes regiões climáticas (TEIXEIRA et al., 2014).

Não obstante, mesmo que as imagens de satélites sejam uma ferramenta bastante utilizada para cálculos de demandas hídricas das espécies vegetais irrigadas com grande eficiência utilizando diversos modelos de algoritmos que estimam a evapotranspiração por meio de parâmetros biofísicos. Porém, existe a limitação da quantidade de imagens em um ciclo de uma determinada cultura, pois os satélites utilizados, tais como o *Landsat 8* que leva 16 dias para retornar à uma mesma região ou localidade dificultando os cálculos de coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) para cada estágio fenológico da cultura.

Como alternativa para imagens aéreas de alta resolução e diárias nos dias atuais está sendo utilizados os veículos aéreos não tripulados (VANT), mas conhecido como

Drones. Os sensores que estão embarcados nos VANT têm a capacidade de extrair informações, com altas resoluções, da superfície da terrestre, sendo vastamente utilizados nestes últimos anos, seja para monitoramento de pragas e doenças, identificação de falhas de plantio, dentre outras atividades. Estas imagens são de alta precisão e possuem resolução superior àquelas que as imagens de satélites normalmente fornecem, podendo ser processadas em software aplicando algoritmos para detectar índices de vegetação que serão correlacionados, posteriormente, com informações de interesses específicos, como os cálculos de demanda hídricas de culturas irrigadas.

Neste contexto, torna-se necessário estudos que venham priorizar o uso de VANT para coletas de imagens diárias que possam ser processadas e posteriormente utilizadas para cálculos e interpretação de demanda hídrica das culturas irrigadas nas suas fases fenológicas, determinando a demanda hídrica real, levando em consideração as características ambientais da área.

## 2 HIPÓTESE

O estudo tem como hipótese central comprovar que o uso de imagens de VANT para estimativa do coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) da videira, encontrados por meio do NDVI, é mais eficiente do que o uso de imagens de satélites. Os resultados expressos de  $K_c$  das imagens de VANT viabiliza o cálculo da evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ) possibilitando uma maior precisão da necessidade hídrica da videira.

### 3 OBJETIVOS

#### 3.1 Objetivos gerais

Determinar a demanda hídrica da videira por meio de índice de vegetação utilizando imagens diárias obtidas com o uso de VANT.

#### 3.2 Objetivos específicos

- Comparar os resultados dos NDVI obtidos por meio de imagens de VANT e de satélite.
- Avaliar o uso de imagens de VANT na estimativa dos coeficientes de cultivo ( $K_c$ ) da videira, calculados por meio do *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI).
- Comparar os  $K_c$  obtidos das imagens de VANT com os recomendados pelo Boletim FAO 56 (ALLEN, 1998) e com os valores obtidos de campo para estimativa da demanda hídrica da videira.
- Determinar por meio de regressão linear simples uma equação que correlacione informações de NDVI com valores de  $K_c$  medido em campo para obtenção do coeficiente de cultivo da videira por meio de sensoriamento remoto.

## 4 REVISÃO DE LITERATURA

### 4.1 Evapotranspiração

A transferência de água da superfície terrestre para atmosfera mediante o processo chamado evapotranspiração (ET), é a passagem do estado líquido para o estado de vapor d'água, por meio da transpiração da superfície das plantas e da evaporação da água presente no solo e nos corpos d'água (RUHOFF et al., 2011).

As terminologias da evapotranspiração podem ser: evapotranspiração de referência; evapotranspiração real; evapotranspiração de oásis e evapotranspiração da cultura, sendo a evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) e evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>) as mais utilizadas, ambas geralmente expressas em mm dia<sup>-1</sup> (MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2009).

O termo evapotranspiração potencial (ETP) é caracterizado pela perda de água de uma extensa superfície vegetada, de porte rasteiro, em fase de desenvolvimento ativo e sem limitações hídricas. Após 29 anos, em substituição à ETP, foi introduzido o termo evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), definindo-o como a perda de água de uma extensa superfície coberta com grama, com porte de 8 a 15 cm, em crescimento ativo e sem restrição hídrica. A ET<sub>o</sub> é um processo que sofre influência de elementos climáticos, dentro os quais constam a radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e pressão atmosférica (ALLEN et al., 1998; DOORENBOS; PRUITT, 1977; THORNTHWAITE, 1948).

O conhecimento da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) é de grande relevância na estimativa da necessidade de irrigação das culturas, pois representa a demanda hídrica de uma área vegetada que varia de região para região, já que depende das condições climáticas do local (BACK, 2007; MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2009).

Há vários métodos para determinar a evapotranspiração, os quais em sua maioria estimam a evapotranspiração de referência. A escolha de um método vai depender da disponibilidade de dados climáticos, escala de tempo e das condições climáticas do local. Os métodos de estimativa da evapotranspiração são divididos em dois grandes grupos, diretos e indiretos. No primeiro, a evapotranspiração de referência pode ser determinada a partir de medidas diretas, como os lisímetros, o



balanço hídrico e o controle de umidade no solo; e no segundo, é determinada por meio de dados climáticos, nos quais a evapotranspiração é estimada por equações empíricas (BURMAN; NIXON; WRIGHT, 1983).

Os métodos que vêm sendo mais empregados no Brasil para a determinação da evapotranspiração de referência são os de Thornthwaite, Thornthwaite-Camargo, Camargo, Hargreaves e Samani, Tanque Classe A, Priestley-Taylor e Penman-Monteith, sendo este último o método padrão internacional, de acordo com o Boletim FAO 56 - *Irrigation and Drainage Crop Evapotranspiration* (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2007).

A maioria dos métodos tradicionais elaborados para a estimativa da ET é aplicada, principalmente, para áreas agrícolas com culturas de interesse comercial. Porém, para estimativa da evapotranspiração em escala regional, estes métodos tornam-se limitados devido à difícil aplicação em grandes áreas de produção. Como alternativa para os métodos tradicionais, as técnicas de sensoriamento remoto são capazes de estimar a evapotranspiração em regiões bastantes heterogêneas proporcionando o uso racional dos recursos hídricos. Neste contexto, o uso dessa ferramenta leva ao desenvolvimento de diversos trabalhos de pesquisa tais como estimativa do albedo da superfície, balanço de radiação e energia, temperatura da superfície, dentre outros, os quais contribuem para o gerenciamento das atividades agrícolas (SOUZA e SILVA, 2005; SILVA et al., 2005a; SILVA et al., 2005b; SILVA e BEZERRA, 2006; BEZERRA, 2006).

Doorenbos e Pruitt (1977), na publicação conhecida como Boletim 24 da FAO, propuseram uma metodologia para determinar a evapotranspiração das culturas, estimando-se primeiramente a evapotranspiração da cultura de referência (ET<sub>o</sub>) e, em segundo, a determinação de um coeficiente de cultura (K<sub>c</sub>), tabelado e distinto para cada cultura e para cada estágio de desenvolvimento. O produto de ET<sub>o</sub> pelo K<sub>c</sub> selecionado, estima a evapotranspiração da cultura de interesse.

Segundo Pereira et al. (1997), o coeficiente de cultura (K<sub>c</sub>) é a integração dos efeitos entre altura da planta, área foliar, fração de cobertura do solo pela vegetação, idade e condições das folhas, umidade na superfície do solo e albedo da superfície. De acordo com Allen et al. (1998), os coeficientes das culturas variam para quatro diferentes estágios de desenvolvimento das culturas (Tabela 1).

Tabela 1 - Coeficiente de cultivo (Kc) em função do seu estágio de desenvolvimento

<b>Estádio de desenvolvimento</b>	<b>Caracterização do estágio</b>	<b>Kc</b>
Inicial	Da germinação até que, aproximadamente, 10% da superfície do solo estejam cobertos por vegetação verde.	0,2 a 1,0
Desenvolvimento vegetativo	10% de cobertura do solo à cobertura total efetiva.	Varia linearmente entre os valores do primeiro e terceiro estádios
Intermediário	Da cobertura total efetiva até o início da maturação. Etapa mais longa para plantas perenes e anuais.	0,9 a 1,25
Final ou de maturação	Do início da maturação até a colheita ou senescência completa.	Varia linearmente entre os valores do primeiro e terceiro estádios

**Fonte:** Adaptado de Allen et al. (1998).

Uma das dificuldades no manejo da irrigação por meio do conhecimento da ETC é a obtenção de valores de Kc que sejam condizentes com as condições da localidade do cultivo, pois o Kc está diretamente ligado às fases fenológicas e fisiológicas das culturas e suas respectivas demandas hídricas, correlacionando-as com a ETO (ALVES et al., 2017).

Os valores de Kc representa a razão entre o consumo hídrico da superfície de referência e a cultura, sendo assim, é influenciado pelo aspecto fenológico, morfológico e fisiológico da cultura. Com isto, para facilitar o manejo da irrigação a FAO estabelece valores tabelados de Kc para regiões áridas e semiáridas, porém, além das características inerentes à cultura, as condições ambientais influenciam nestes valores (PEREIRA; SEDIYAMA; VILA NOVA, 2013).

A grande variabilidade dos valores de Kc, em função das condições locais e da cultura em estudo, torna evidente que o uso desses coeficientes de maneira generalizada ocasionará erros nas estimativas de ETC. Os valores de Kc medido mostra-se bastante variável quando comparados aos propostos pela FAO (PEREIRA, 2018).

Laaboudi et al., (2015) avaliando Kc para o trigo em regiões distintas, com tipos diferentes de clima, encontraram grande variabilidade de Kc tanto entre os locais quanto em relação aos valores por estágio fenológico. Nas regiões mais úmidas, as

amplitudes entre os valores mínimos e máximo de Kc foram menores do que as regiões mais áridas.

A grande variabilidade dos fatores climáticos tais como a temperatura do ar, velocidade do vento, umidade relativa do ar, radiação solar em conjunto com as características inerentes às culturas, faz o uso do sensoriamento remoto uma ferramenta bastante eficiente para o manejo da irrigação. Além do uso de imagens de satélites na estimativa de parâmetros referenciados anteriormente, existem novas linhas de pesquisas utilizando os VANT na tentativa de modelagem de metodologias para estimar parâmetros que auxiliem o manejo da irrigação. A grande vantagem do uso de VANT é a exatidão com que pode se detectar e monitorar grandes áreas com alta definição e alta frequência de capturas das imagens.

## 4.2 Geoprocessamento

“O geoprocessamento e o sensoriamento remoto são ferramentas que têm possibilitado a tomada de decisão no âmbito do planejamento territorial, podendo ser utilizadas para obtenção de informações que auxiliam o manejo e a gestão ambiental” (GUIMARÃES JÚNIOR, 2016, p. 14).

O conjunto de técnicas computacionais envolvendo fenômenos do mundo real, mediante linguagem de algoritmos e estruturas de dados matemáticos representa o geoprocessamento (CÂMERA; MONTEIRO, 2001). De acordo com Bucene (2002), esta técnica permite analisar dados georreferenciados, independentemente de serem estatísticos, ou analisar dados isolados utilizando modelagens e tratamento de informações espaciais.

Segundo Tagliarini (2017), o geoprocessamento é uma tecnologia interdisciplinar, pois pode ser considerado um conjunto de geotecnologias que abrange as técnicas de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), Sistema de Posicionamento Global (GPS), Sensoriamento Remoto, dentre outras.

Pereira, Silva e Pamboukian (2016) afirmam que o geoprocessamento possibilita analisar informações de um determinado conjunto de dados gerando mapas para auxiliar nas decisões sobre os problemas ambientais, rurais e urbanos. Esta técnica utiliza como ferramenta computacional o SIG, o qual permite a análise complexa da superfície estudada por meio de softwares tais como QGIS, ArcGIS, Agisoft

PhotoScan, Spring, TerraView, dentre outros. Estes softwares executam as atividades de processamentos dos dados e fenômenos observados da superfície da terra.

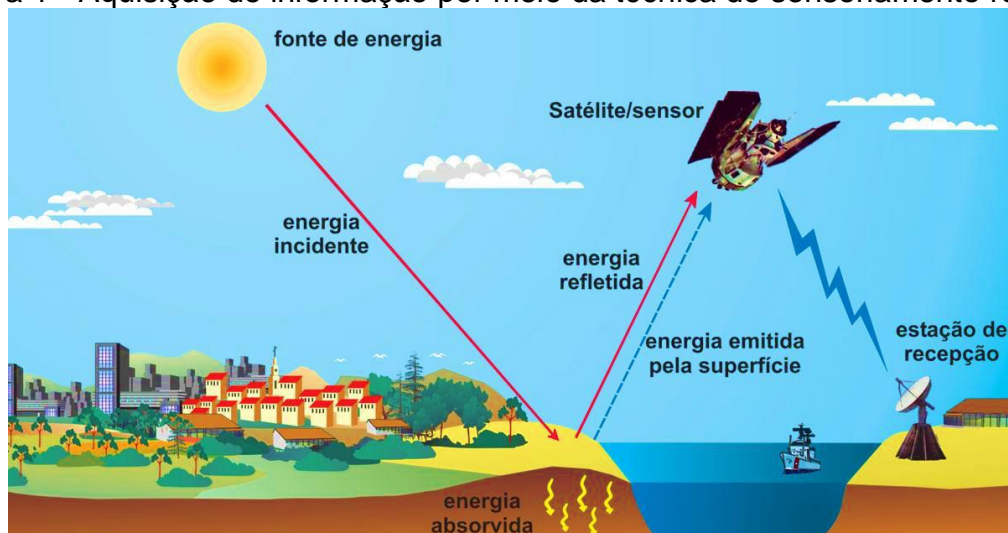
#### 4.2.1 Sensoriamento Remoto

O sensoriamento remoto é a utilização simultânea de sensores, equipamentos e transmissão de dados instalados a bordo de uma plataforma orbital ou terrestre, com objetivo de estudar fenômenos e/ou processos da superfície da Terra pelas manifestações e interações da radiação eletromagnética e substâncias que estão nas superfícies analisadas (NOVO, 2010).

De acordo com Chuvieco (2002) as técnicas de sensoriamento remoto, permitem o tratamento das imagens da superfície terrestre por meio da modelagem de parâmetros biofísicos da vegetação, os quais podem ser medidos por meio dos índices de vegetação tais como índice de área foliar, índice de vegetação ajustado ao solo, índice de vegetação por diferença normalizada, dentre outros.

O Sensoriamento Remoto é uma ferramenta presente em um ambiente SIG que registra uma imagem e por meio da energia refletida ou absorvida pela superfície, sem contato físico entre o sensor e alvo estudado, analisa a partir do comportamento espectral o que a imagem do objeto em estudo apresenta em cada comprimento de onda (PEREIRA; SILVA; PAMBOUKIAN, 2016), como detalhado na Figura 1.

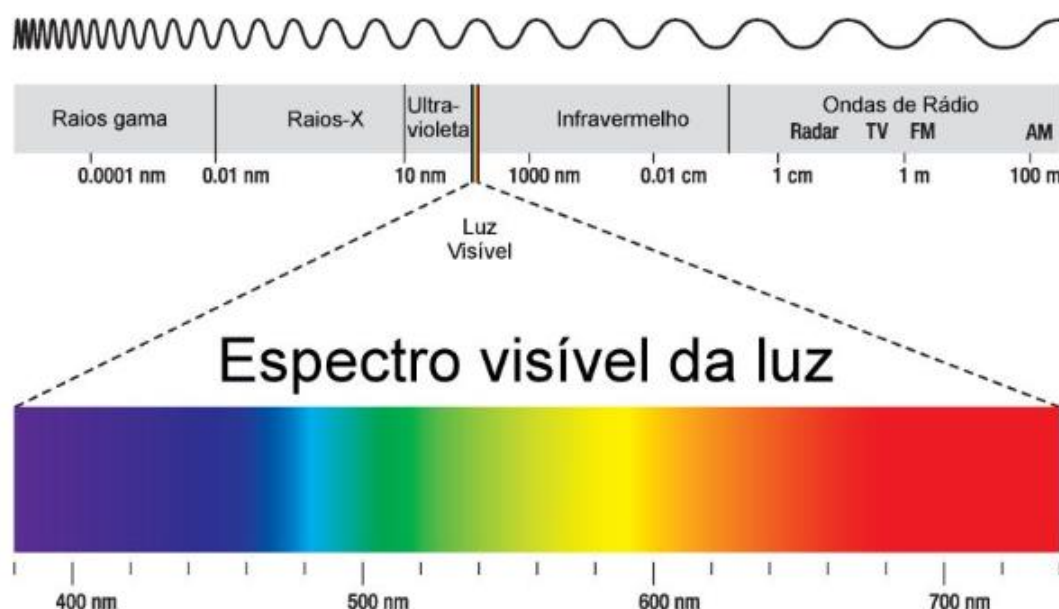
Figura 1 - Aquisição de informação por meio da técnica de sensoriamento remoto



Fonte: FLORENZANO (2002).

O espectro solar, por sua vez, é a distribuição da radiação eletromagnética (REM) emitida pelo Sol em função do comprimento de onda, podendo variar desde o raio gama até ondas de rádio, sendo esta energia dividida em faixas espectrais em termos de frequência ou comprimento de ondas (LORENZZETTI, 2015) (Figura 2).

Figura 2 - Espectro eletromagnético



Fonte: FLORENZANO (2015).

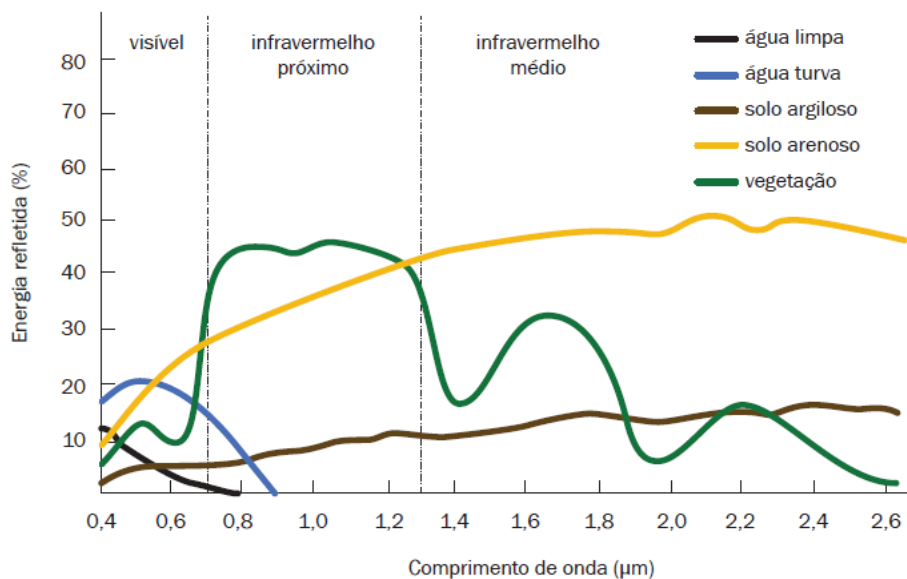
De acordo com Liu (2007), cada alvo estudado possui sua assinatura espectral. Florenzano (2011) relata que esta assinatura espectral está associada ao comportamento dos objetos da superfície terrestre em relação a radiação eletromagnética, ou seja, a vegetação, a água e o solo, por exemplo, absorvem ou refletem a radiação solar, de acordo com suas características biofísica e química, assim como também, conforme as características do comprimento de onda.

Devido as variações de absorção ou reflectância da radiação eletromagnética dos alvos analisados é possível distingui-los nas imagens dos sensores remotos (Figura 3).

Na região da luz visível, a vegetação (verde e sadia) reflete mais energia na faixa correspondente ao verde (500 - 550 nm). Esse fato explica porque o olho humano enxerga a vegetação na cor verde. Entretanto, é na faixa do infravermelho próximo que a vegetação reflete mais energia e se diferenciam dos demais objetos. A curva do solo indica um comportamento mais uniforme, ou seja, uma variação

menor de energia refletida em relação à vegetação, ao longo do espectro. A água pura (no estado líquido) reflete pouca energia na região do visível e nenhuma na região do infravermelho, absorvendo praticamente toda a energia. Os diferentes tipos e concentrações de material na água, no entanto, alteram o seu comportamento espectral, particularmente na região do visível. Os constituintes desse material podem ser formados por organismos vivos (fitoplâncton, zooplâncton e bacterioplâncton), partículas em suspensão (orgânicas e inorgânicas) e substâncias orgânicas dissolvidas. (FLORENZANO, 2011, p.7).

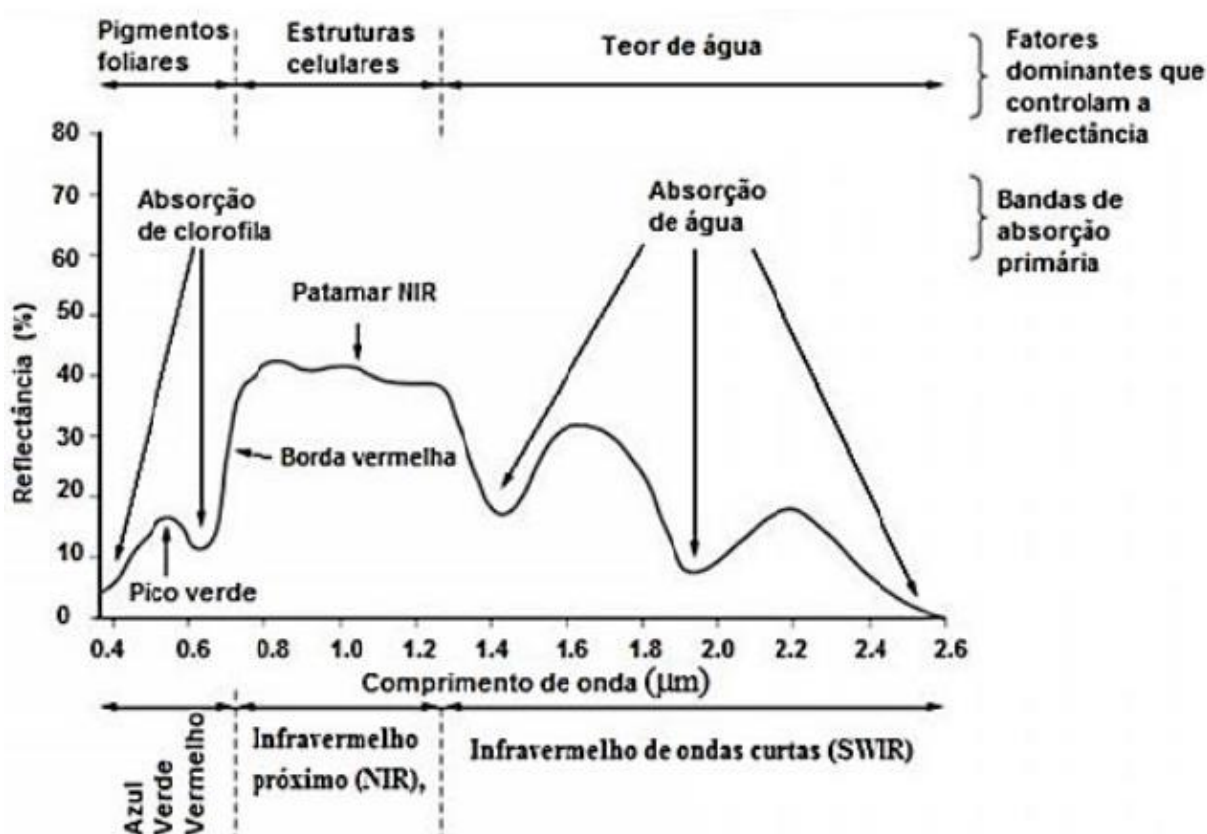
Figura 3 - Assinatura espectral da vegetação, do solo e da água na superfície da terra



Fonte: FLORENZANO (2011).

As faixas de absorção da vegetação (Figura 4) é dividida em três principais regiões. A primeira região compreende a faixa do visível (0,4 μm – 0,72 μm) onde estão concentrados os pigmentos foliares, os quais a maioria absorve na região do azul (próximo 0,445 μm) e somente a clorofila absorve na região do vermelho (próximo 0,645 μm). Na segunda região, faixa do infravermelho próximo (0,720 μm - 1,1 μm) onde compreende as estruturas celulares, ocorre a absorção de pequena quantidade de radiação. A terceira região compreende a faixa de teor de água na planta, que expressa aumento dos valores do fator de reflectância à medida que a folha vai perdendo o teor de água (PONZONE; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2012).

Figura 4 - Faixa de absorção da vegetação fotossinteticamente ativa e fatores que controlam a reflectância



Fonte: LEDA (2016).

#### 4.2.2 Plataformas orbitais e aéreas

As plataformas são veículos que transportam sensores que estão em operação para aquisição de dados. Estes veículos podem ser orbitais e aéreos como, por exemplo, os satélites e os VANT, respectivamente.

No dia 04 de outubro de 1957, foi lançado o primeiro satélite terrestre artificial (AES) – Spuntnik-1 com um transmissor de rádio independente operando a 20 e 40 MHz. A União Soviética foi a pioneira no lançamento de satélites com o lançamento deste satélite sob a direção do Prof. Yakov L. Alpert (KUZNETSOV; SINELNIKOV; ALPERT, 2015).

O primeiro satélite não tripulado usado em estudo de recursos naturais da série Landsat foi lançado pelos Estados Unidos em 1972, sendo gerenciado pela NASA e pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), compondo um sistema de satélites projetado para observar a superfície terrestre, com objetivo de estudar os

recursos naturais por meio do espaço com resolução moderada e repetidamente, ou seja, um alvo terrestre sendo observado no tempo e no espaço (NASA, 2013).

O Landsat foi chamado primeiramente de Satélite de Tecnologia de Recursos Terrestres (*Earth Resources Technology Satellite - ERTS*) e após três anos foi renomeado como Landsat 1. Desde então, outras versões do Landast foram colocadas em órbita para aquisição de dados dos recursos naturais terrestre e desde 2008 as imagens armazenadas da superfície terrestre são disponibilizadas gratuitamente (UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY, 2016).

Cada satélite do Programa Landsat possui características operacionais e técnicas diferentes, sendo otimizado a cada nova versão (Tabela 2). De acordo com Zanetti et al. (2015), os dois novos sensores a bordo do Landsat 8 coletam dados em conjunto da superfície da Terra, incluindo regiões costeiras, gelo polar, ilhas e zonas continentais, possuindo um novo controle de qualidade que garante informações mais detalhadas do alvo sobre a presença de nuvens, água e neve.

Tabela 2 - Características técnicas da série de satélites Landsat

Plataforma	Data de lançamento	Altitude	Sensores a bordo	Periodicidade	Término Operação
Landsat 1	23/07/1972	900 Km	RBV e MSS	18	06/01/1978
Landsat 2	22/01/1975	900 Km	RBV e MSS	18	05/02/1982
Landsat 3	05/03/1978	900 Km	RBV e MSS	18	31/03/1983
Landsat 4	16/07/1982	705 km	TM e MSS	16	15/06/2001
Landsat 5	01/03/1984	705 km	TM e MSS	16	05/06/2013
Landsat 6	05/10/1993	--	ETM	--	Fracassou
Landsat 7	15/04/1999	705 km	ETM+	16	31/05/2003
Landsat 8	11/02/2013	705 km	OLI e TIRS	16	Ativo

Fonte: NASA (2013).

O Landsat 8 está orbitando a 705 Km acima da superfície da Terra e tem sido utilizado para documentar diversos processos naturais, tais como: inundações, derretimento de geleiras e incêndios florestais que nem aplicações públicas induzidas pelo homem, como a expansão de áreas urbanas, desmatamento, agricultura irrigada (HEIN, 2014). A Tabela 3 apresenta as características espectrais dos sensores que estão a bordo do Landsat 8.



Tabela 3 - Características espectrais dos sensores OLI e TRIS

OLI ( <i>Operational Land Images</i> )		
Banda	Comprimento de onda ( $\mu\text{m}$ )	Resolução (m)
1	0,435 – 0,451	30
2	0,452 – 0,511	30
3	0,533 – 0,590	30
4	0,636 – 0,673	30
5	0,851 – 0,879	30
6	1,566 – 1,651	30
7	2,107 – 2,294	30
8	0,503 – 0,676	15
9	1,363 – 1,384	30
TRIS ( <i>Thermal Infrared Sensor</i> )		
10	10,60 – 11,19	100
11	11,50 – 12,51	100

Fonte: Adaptada NASA (2013).

Além das plataformas orbitais existem as plataformas aéreas, chamadas também de plataformas terrestres, que carregam sensores para captura de dados de alguma superfície. Dentre as diversas plataformas aéreas, os veículos aéreos não tripulados (VANT) estão sendo utilizados para o monitoramento da superfície da Terra. De acordo com Rodrigues (2016), o desenvolvimento do VANT foi possível devido a junção entre um aeromodelo, uma câmera, um GPS e um sistema inercial, sendo capaz de realizar uma delimitação prévia autônoma de uma determinada área para a realização de uma cobertura aerofotogramétrica, no qual o usuário define o tamanho representado por um pixel no terreno (*Ground Sample Distance – GSD*).

O VANT é uma plataforma aérea que pode ser operada de forma manual, semiautônoma ou totalmente autônoma, possuindo além da câmera fotográfica digital e do sistema GNSS, um IMU (*Inertial Measurement Unit*) composto de giroscópio, acelerômetro, altímetro, bússula e uma pequena CPU, sendo o controle humano realizado por um sistema remoto com o link de rádio (SILVA et al. 2014).

#### 4.2.2.1 Breve histórico dos VANT e sua regulamentação do Brasil

Os VANT são comumente chamados de drones, Kakha e Gorodetsky (2018) afirmam que surgiram em 1849, durante a primeira guerra da Independência Italiana, quando o império austríaco criou um sistema de balões de ar quente, não tripulados,

para lançar bombas em Veneza. Depois disso, os VANT tornam-se importantes quando os EUA, após a Guerra Fria, percebem que deveriam lançar um programa de pesquisas voltadas para esta tecnologia, auxiliando as necessidades militares.

Em 2006, na Universidade de Ciência e Tecnologia de Hong Kong, Frank Wang fundou a *DJI Technology*, atualmente considerada uma empresa líder de VANT comerciais acessíveis ao público em geral. Apesar de já existir empresas comerciais desde 2002 nos EUA, somente em 2015, quando ocorreu a exigência do Congresso dos EUA sob a *Aviation Administration (FAA)*, foram inseridos os VANT no espaço aéreo. A partir deste momento o termo “drone” tornou-se um tema comum (KAKHA; GORODETSKY, 2018).

Considerando a forma estrutural, um drone pode ser classificado em dois tipos: asa fixa (Figura 5) e multirotores (Figura 6). Os drones de asa fixa possuem os mesmos princípios de aviões tradicionais, possuindo asas estáticas e podendo fazer cobertura de grandes áreas, pois sua bateria é econômica e isso lhe dá uma maior estabilidade de voo com velocidade considerada alta. Já os drones multirotores possuem um subconjunto de hélices com asas rotativas (*rotorcraft*) operando em baixa velocidade, podendo ficar estáticos no ar, porém, possuem uma menor autonomia de voo, pois sua bateria trabalha em torno de 24 a 27 minutos (KNEIPP, 2018).

Os VANT são utilizados para diversas funções e a escolha de qual modelo utilizar depende de que sensor irá ser acoplado e para qual objetivo. Segundo Kneipp (2018), os drones de asas fixas estão sendo utilizados, principalmente, para monitoramento da agricultura, operações militares e nas atividades de mineração. Já os drones de multirotores são mais utilizados para inspeções estruturais na construção civil, vigilância e também são utilizados na agricultura, por exemplo, para pulverizações.

Figura 5 - Drone de asa fixa (eBee Plus – SenseFly)



Figura 6 - Drone multirotor (SOLO – 3DR)



Nos dias atuais existem diversas empresas que desenvolvem drones para o mercado, mas também existem instituições de pesquisas que trabalham desenvolvendo estes veículos para uso na agricultura. Em Logan, Estado de Utah nos EUA, imagens de aeronaves tripuladas e de satélite eram utilizadas para aplicações

na agricultura. No entanto, essas imagens se tornam caras e não eram flexíveis o suficiente para as demandas diárias das atividades da agricultura. Com estes entraves o Dr. Mac McKee, diretor do Utah Water Research Laboratory, concebeu pela primeira vez em 2006 a AggieAir, com o objetivo de construir drones com carga útil aprimorada (sensores) para fornecer imagens de alta qualidade no monitoramento da agricultura. A partir de 2008 foram desenvolvidas várias versões da AggieAir, como o AggieAir Flying Wing, AggieAir Minion e AggieAir VTOL (AGGIEAIR, 2019).

A evolução dos VANT da AggieAir (Figura 7) foi realizada para que possibilitar o aprimoramento das cargas úteis sem o prejuízo da autonomia de voo, pois a carga útil aprimorada levava uma maior quantidade de sensores (RGB, infravermelho e térmico).

Figura 7 - Evolução dos veículos aéreos não tripulados da AggieAir



Fonte: AggieAir (2019)

No Brasil, os primeiros relatos de VANT ocorreram quando o Centro Técnico Aeroespacial (CTA) desenvolveu o projeto Acauã para fins militares. O Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), desde de 2004, tem usado o VANT experimental "Acauã"

para fazer demonstrações de tecnologias autônomas por meio de projetos como o VANT-SNC (Sistema de Navegação e Controle), financiado pela FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos) e DPA-VANT (Decolagem e Pousos Automáticos) (IAE, 2018).

Em junho de 2006, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) anunciou uma parceria com a Qualcomm, uma companhia americana de tecnologia móvel, e o Instituto de Socioeconomia Solidária (ISES) com o objetivo de desenvolver de drones de baixo custo no intuito de provocar impactos sociais e econômicos, principalmente, na agricultura familiar por meio do Programa de Desenvolvimento de Tecnologias para Uso de Drones (GLOBO RURAL, 2018).

No Brasil, a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) é responsável pela regulamentação das operações de drones. Em 3 de maio de 2017, entrou em vigor o Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Especial nº 94/2017 (RBAC-E nº94/2017) expedido pela ANAC, o qual estabelece os requisitos gerais para aeronaves não tripuladas de uso civil. Após um ano da regulamentação já haviam sido cadastrados 41.338 drones no Sistema de Aeronaves não Tripuladas (SISANT), os quais são gerenciados pela ANAC (ANAC, 2018).

De acordo com a ANAC (2018), todo drone com peso máximo de decolagem superior a 250g deve ser registrado na SISANT, sendo o cadastro feito de forma simples e gratuita. O cadastro deve ser realizado tanto para aeronaves remotamente pilotadas com fins experimentais, comerciais ou institucionais, como também para aeromodelos, que são consideradas pela ANAC, aeronaves não tripuladas remotamente pilotadas para fins de recreação e lazer.

Este Regulamento Especial estabelece as condições para a operação de aeronaves não tripuladas no Brasil, considerando o atual estágio do desenvolvimento desta tecnologia. Tem por objetivo promover um desenvolvimento sustentável e seguro para o setor e, assim, algumas restrições operacionais – notadamente sobre as áreas não distantes de terceiros – foram julgadas como necessárias neste momento. É esperado que a experiência obtida na prática nos próximos anos resulte em um maior conhecimento e superação dos desafios para uma ampla integração desta classe de aeronaves no sistema de aviação civil. Adicionalmente, devem ser observadas as regulamentações de outros entes da administração pública direta e indireta, tais como a Agência Nacional de Telecomunicações –

ANATEL, o Departamento de Controle do Espaço Aéreo – DECEA e o Ministério da Defesa, assim como as legislações referentes às responsabilizações nas esferas civil, administrativa e penal que podem incidir sobre o uso de aeronave não tripulada, com destaque àquelas disposições referentes à inviolabilidade da intimidade, da vida privada, da honra e da imagem das pessoas. (ANAC, 2017, p.3).

#### 4.2.3 Índices de Vegetação (IV)

O desenvolvimento dos Índices de Vegetação (IV) nas aplicações de sensoriamento remoto possui objetivo de monitorar e quantificar as condições reais da vegetação, utilizando dados digitais de reflectâncias espectrais da radiação eletromagnética, sendo obtidos por meio de combinações matemáticas, possibilitando a avaliação de crescimentos das culturas, monitoramento de pragas e doenças, eventos catastróficos meteorológicos, discriminação do uso do solo, dentre outras avaliações da superfície da Terra (LIU, 2007).

Os pigmentos fotossintetizantes absorvem a radiação solar causando a baixa reflectância das folhas na região do visível, enquanto as estruturas celulares provocam alta reflectância na região do infravermelho. Este comportamento espectral da vegetação é explorado pelos IV, os quais são relacionados aos parâmetros biofísicos da cobertura vegetal, como biomassa e índices de área foliar (PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2012).

De acordo com Uno et al. (2005), existem diversos IV que foram desenvolvidos pela combinação de duas ou mais bandas de onda utilizadas em modelos matemáticos para analisar diversas características das culturas agrícolas. Estes IV proporcionam uma sensibilidade na interpretação das informações espectrais adquiridas por meio de sensores, facilitando o uso das tecnologias de sensoriamento remoto para a agricultura de precisão.

Apesar de existir diversos IV na literatura, o índice de vegetação por diferença normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* – NDVI) é um dos índices mais antigos e utilizado para análises ambientais. Segundo Glenn et al. (2011) a reflexão da luz nas folhas verdes entre os comprimentos de onda vermelha e infravermelho próximo (*Near-Infrared Spectroscopy* - NIR) é expresso pelo NDVI, sendo a luz

vermelha fortemente absorvida pela clorofila “a” e “b” das folhas, ocorrendo uma interação nas camadas superiores do dossel e a luz NIR transmitida ou espalhada pelo mesofilo das folhas. Assim, são fortemente correlacionados com processos fisiológicos, tais como: ET, rendimento e produtividade das culturas.

O NDVI é um indicador numérico no intervalo de -1 (vegetação sem folha, submetida a condição de estresse hídrico por déficit de água no solo) a 1 (vegetação com folhas, sem restrições hídricas e na plenitude de suas funções metabólicas e fisiológicas), baseado em quanto mais verde, nutrida, sadia e bem suprida, do ponto de vista hídrico for a planta, maior será a absorção do vermelho e maior será a refletância do infravermelho. (PEREIRA; SILVA; PAMBOUKIAN, 2016. p. 13).

O NDVI é um índice utilizado até os dias atuais como ferramenta para o monitoramento de perfis sazonais e temporais das atividades agrícolas e florestais. Estes perfis temporais têm sido utilizados para analisar em diferentes cultivos a duração do período de crescimento, mudanças fisiológicas e períodos de senescência (PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2012).

Em razão da grande utilização do NDVI para o monitoramento e análise de diversos fatores ambientais, explica-se a existência de diversos estudos para estimativa de produção e mapeamento das culturas agrícolas (JUNGES et al., 2017; MAHMOUD; GAN, 2019; PETER et al., 2017).

As técnicas de sensoriamento remoto estão sendo aplicadas ao monitoramento de cultivos agrícolas relacionados à estimativa da evapotranspiração, discriminação de áreas agrícolas, entre outros. Castro et al. (2018) avaliaram o desempenho das técnicas de sensoriamento remoto por meio de cálculo de NDVI para monitorar as fases fenológicas das culturas de arroz, milho, girassol, noz, uva. Constaram que a viabilidade do uso desta tecnologia para análises de áreas complexas podem auxiliar no gerenciamento de terras agrícolas, programação de irrigação e modelagem de ecossistemas.

A produtividade agrícola das culturas está ligada diretamente às condições ótimas de produção no que se refere, principalmente, ao fator nutricional e a demanda hídrica. De acordo com Glenn et al. (2011), a ET no campo depende da estimativa do  $K_c$  e, este por sua vez, quando estimado ou calculado de forma tradicional,

desenvolvido para condições agronômicas ideais, foge da realidade de campo e pode reduzir ou aumentar a demanda real de água, podendo os métodos de IV substituírem ou complementar os métodos de estimativa tradicional de  $K_c$  por refletir o estágio real da cultura no momento da mensuração.

São encontrados diversos estudos que relatam que a regressão linear simples se mostra um método prático e eficaz na relação entre valores de índices de vegetação e demanda hídrica da cultura. Kamble, Irmak e Hubbard (2013) encontram uma forte semelhança entre as curvas de NDVI e  $K_c$ , estabelecendo uma regressão linear simples entre elas, para diferentes usos agrícolas.

Mateos et al. (2013) monitorando a evapotranspiração de culturas irrigadas e usando coeficientes de colheita derivados de séries temporais de imagens de satélite, verificaram a relação do  $K_c$  com os IV e concluíram que o método IV-ET, utilizando o *Soil-adjusted Vegetation Index* (SAVI), é válido e robusto para estimar a evapotranspiração espacialmente distribuída em grandes áreas irrigadas.

Castañeda-Ibáñez et al. (2015) encontraram um coeficiente de correlação entre o  $K_c$  e o NDVI de 0,92, supondo que os índices de vegetação possibilitam determinar as mudanças e desenvolvimento do cultivo através do tempo. Campos et al. (2010) avaliando os coeficientes de culturas basais de uva irrigada na Província de Albacete, sudeste da Espanha, por meio de imagens de satélites, constataram que os coeficientes de cultura derivados de índices de vegetação com base na refletância é um instrumento válido para a avaliação das necessidades de água da cultura.

Os dados encontrados na literatura mostram que é possível obter valores de  $K_c$  por meio de regressão linear simples com os índices de vegetação, expressando assim a demanda hídrica das culturas, levando em consideração as características climáticas da área com a utilização de sensoriamento remoto.

### **4.3 Agricultura irrigada**

A irrigação é uma tecnologia indispensável nas regiões áridas e semiáridas para o desenvolvimento da agricultura. Em regiões onde a precipitação é superior a 600 mm anuais, esta técnica também é necessária em alguns períodos do ano, pois estas regiões apresentam épocas bem definidas onde a precipitação pluviométrica não



atende às necessidades hídricas das culturas, fazendo a irrigação um complemento desta demanda (TESTEZLAF, 2017).

É importante conhecer a demanda hídrica das culturas em cada fase fenológica para selecionar cultivares com rendimentos satisfatório e adaptadas às condições edafoclimáticas locais, para monitorar o desenvolvimento das culturas e para o gerenciamento econômico da agricultura. O estresse hídrico afeta o crescimento e desenvolvimento das plantas, e quando em excesso é onerosa para o produtor, podendo comprometer a produtividade e causar danos ambientais (CORDÃO et al., 2018; ZONTA et al., 2015).

A demanda hídrica das plantas está relacionada à sazonalidade dos fatores meteorológicos e, neste sentido, o consumo de água varia de acordo com a época do ano. Sendo assim, tornar-se indispensável o conhecimento das relações solo-água-planta-atmosfera, a fim de determinar a quantidade ideal necessária para o desenvolvimento das culturas. Nas áreas não irrigadas, a disponibilidade de água está relacionada à frequência e quantidade de chuva; já nas áreas irrigadas, o êxito está relacionado com o manejo da irrigação (SILVA, 2008).

O Brasil está entre os dez países com a maior área irrigada do mundo, possuindo 6,9 Mha (milhões de hectares) e utilizando diferentes sistemas de irrigação. Essa área irrigada representa apenas 23,16% da área potencial para irrigação, pois o país possui um potencial para esta atividade estimado em 30 Mha. Os líderes mundiais são a China e a Índia, com cerca de 70 Mha cada, seguidos dos EUA (26,7 Mha), do Paquistão (20,0 Mha) e do Irã (8,7 Mha) (ANA, 2017).

De acordo com a Agência Nacional de Água (2017), o Brasil possui um grande potencial de crescimento para agricultura irrigada, pois seu território tem uma boa disponibilidade hídrica, fatores físico-climáticos favoráveis e uma extensa área territorial que ainda pode ser explorada. Esse panorama é o oposto do verificado nos demais países líderes em irrigação, visto que, de forma geral, estão mais próximos do aproveitamento total do seu potencial estimado, sendo ainda mais crucial a eficiência nos sistemas de irrigação. Por outro lado, as séries históricas demonstram que os incrementos anuais de área irrigada no Brasil têm sido fortes e persistentes nas últimas décadas, intensificando-se nos últimos anos e indicando que o potencial tem sido cada vez mais aproveitado.

O Brasil vem cada vez mais desenvolvendo a agricultura irrigada e este panorama deve-se a expansão da agricultura em regiões com baixas precipitações

anuais e aos estímulos governamentais, assim como à expansão deste setor nas regiões que possuem as precipitações pluviométricas concentradas em uma determinada época do ano. São retirados dos corpos hídricos, anualmente no Brasil,  $2.083 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  de água, sendo a irrigação responsável por 52% desta retirada. Dos  $1.083 \text{ m}^3/\text{s}$  de água retirados dos corpos hídricos pela agricultura irrigada,  $792,1 \text{ m}^3/\text{s}$  são utilizados pela atividade, correspondendo a 73% do total retirado, e  $291,5 \text{ m}^3/\text{s}$  retornam aos corpos hídricos (ANA, 2018).

Vale salientar que os benefícios da agricultura irrigada não se resumem apenas no aumento da produtividade, mas também no impacto social, no que diz respeito a maior geração de mão de obra no setor e o aumento da oferta de alimento. As grandes extensões territoriais do Brasil favorecem o agronegócio e isso contribui para que o Brasil seja o terceiro maior produtor de frutas do mundo, possuindo um total de 43,5 milhões de toneladas produzidas. A fruticultura é um setor de alto potencial de crescimento, destacando-se para produção de laranja, banana, abacaxi, uva, maçã e mamão, sendo a produção de uva de 1.680.020 toneladas (KIST et al. 2018).

A irrigação tem um importante papel na qualidade da uva para vinificação e é essencial para manter a longevidade da planta. O manejo da irrigação na videira é de fundamental importância para seu desenvolvimento, pois tanto o excesso quanto o déficit de água prejudicam a qualidade dos frutos. O excesso de água retarda o crescimento das raízes, lixivia nitrogênio, enxofre e boro para fora da zona radicular, levando a deficiência nutricional, além de causar podridão radicular, particularmente em solos pesados. O déficit hídrico durante o desenvolvimento dos frutos diminui o rendimento agrícola e provoca má qualidade dos frutos (MAUGHAN et al., 2017).

#### **4.4 Vitivinicultura**

A videira é uma planta pertencente à família Vitaceae, do gênero *Vitis*, a qual pode ser de origem europeia, americana e asiática. As espécies de uvas comercialmente cultivadas são as espécies *Vitis labrusca* L. e *Vitis vinífera* L., sendo a primeira utilizada para uva de mesa, sucos e vinhos comuns, e a segunda para produção de vinhos finos e uvas de mesa (GIOVANNINI, 2014).

As plantas da família *Vitaceae* são lianas (tipo cipós ou trepadeiras) ou, raramente, ervas não escandentes ou arvoretas, em geral com gavinhas opostas às folhas (apresentando inflorescência modificada). Possuem folhas alternadas, simples ou compostas, frequentemente palminérveas e com estípulas, e inflorescência cimosa ou paniculada, terminal, axilar ou oposta às folhas. As flores geralmente são pouco vistosas, bissexuadas ou unissexuadas, actinomorfas, diclamídeas. As flores se encontram agrupadas em inflorescência do tipo racimo. A infrutescência da videira é denominada cacho, sendo constituído pelo pedúnculo e suas ramificações, a ráquis, a qual termina em pedicelos onde se fixam os frutos denominados bagas. (GIOVANNINI, 2014, p. 3 e 13).

Existem diversas variedades de uvas cultivadas, tais como: Cabernet Franc, Cabernet Sauvignon, Merlot, Pinotage, Pinot Noir, Tannat, Chardonnay, Riesling Itálico, dentre outras. A produtividade de cada variedade é influenciada pelas condições edafoclimáticas da região e da forma de condução das plantas. Por ser uma planta com hábito de crescimento trepadeira, precisa de um sistema de condução para o manejo do dossel, a fim de proporcionar luz às folhagens, interferindo, posteriormente, na qualidade dos frutos (FERRER; ECHEVERRIAL; GONZALEZ-NEVES, 2015).

Existe uma grande variedade de sistemas de condução, tais como: espaldeira, latada, treliça, lira, Colina dupla de Geneva, dentre outras. O crescimento vegetativo da videira pode ser afetado pelo sistema de condução devido, principalmente, ao efeito sob a fisiologia da parte aérea (QUEIROZ-VOLTAN et al., 2011).

Existem várias informações sobre os sistemas de condução que comprovam que o tipo de condução do parreral não influencia apenas na qualidade da videira e na sua produtividade, possuem benefícios relevantes na redução de ataques de doenças fúngicas e no incremento da composição fenólica do fruto (BEM et al., 2015; LIU et al., 2015; RAHMANI; BAKHSHI; QOLOV, 2015; XU et al., 2015).

Entre as diversas variedades de videira, a *Pinot Noir* é uma das mais exigentes nas condições de manejo da colheita. É uma variedade cultivada em quase todos os países vitivinícolas do mundo, utilizada para fabricação de espumantes, sendo caracterizada por alta intensidade aromática. Além de ser utilizada para elaboração de espumantes, principalmente, na região de Champagne, os famosos vinhos destas

variedades são os vinhos brancos de uvas tintas, produzidos no seu berço, Borgonha, na França (MENEGUZZO, 2010; TOGORES, 2011).

Mundialmente a uva é uma fruta amplamente consumida, seja em sua forma in natura (mesa) ou sob processamento (sucos e vinhos). O Brasil possui uma área cultivada com videiras de 79.483 ha e uma produção de 1.439.535 toneladas, ocupando no ranking mundial o 19° e 13° em área plantada e produção de uvas, respectivamente. Em 2013, o Brasil estava no 14° lugar na produção mundial de vinho (MELLO, 2016).

A videira (*Vitis vinífera*) é um fruteira de grande importância econômica, social e cultural, com 7,8 milhões de hectares cultivadas em todo mundo e uma produtividade média anual de 8,65 milhões de toneladas por hectare. As mudanças nas condições ambientais podem influenciar negativamente a produção da videira. Condições climáticas extremas, tanto em regiões de chuvas prolongadas e ventos fortes, assim como extensos períodos secos e altas temperaturas, influenciam severamente a fisiologia da videira e a qualidade da uva (GRIESSER et al., 2015).

Tradicionalmente, a videira é cultivada sem irrigação, porém, diante das influências severas das altas temperaturas e dos períodos secos do ano, é importante conhecer a necessidade hídrica da videira para poder conduzir o seu plantio a uma maior produtividade e melhor qualidade das uvas. Sendo assim, a técnica de irrigação pode ser indispensável para produção da videira em locais com condições climáticas severas. Ressalva-se que é necessário conhecer a demanda hídrica da cultura para conduzir melhor o manejo da irrigação.

A produção de uva para vinho na Califórnia (USA) é estimada em 6 bilhões de dólares por ano. Mesmo possuindo uma boa produção, o Estado enfrenta desafios crescentes pela demanda dos recursos hídricos, os quais estão cada vez mais limitados devido, principalmente, ao aumento da variabilidade temporal das precipitações pluviométricas. Sendo assim, com a implementação dos sistemas de irrigação, as decisões do gerenciamento e manejo da irrigação para a maiorias das culturas cultivadas são baseadas em uma combinação de observações *in situ* da umidade do solo e estimativas da demanda hídrica baseadas em sensoriamento remoto por meio do NDVI (KUSTA et al., 2018).

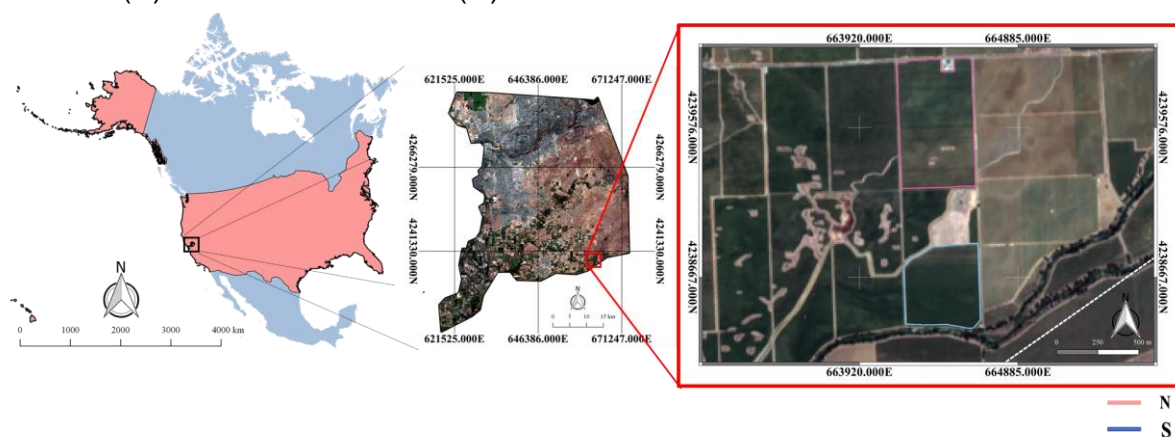
## 5 MATERIAL E MÉTODOS

### 5.1 Área de estudo

As imagens utilizadas para esta pesquisa foram financiadas pelo Projeto GRAPEX (*Grape Remote sensing Atmospheric Profile and Evapotranspiration eXperiment*) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (*United States Department of Agriculture - USDA*), sendo coletadas pelo grupo de pesquisa do Laboratório de Pesquisa de Água da Universidade de Utah (*Utah State University - USU*).

As imagens a seguir foram registradas em uma propriedade perto de Lodi, Califórnia, USA, sobre o vinhedo do Borden Ranch, no Condado de Sacramento (Figura 8), com a variedade Pinot Noir, nas coordenadas geográficas 38,29° N e 121,12° O, e altitude de 37 m. O Datum utilizado foi o WGS 84 / UTM ZONA 10N.

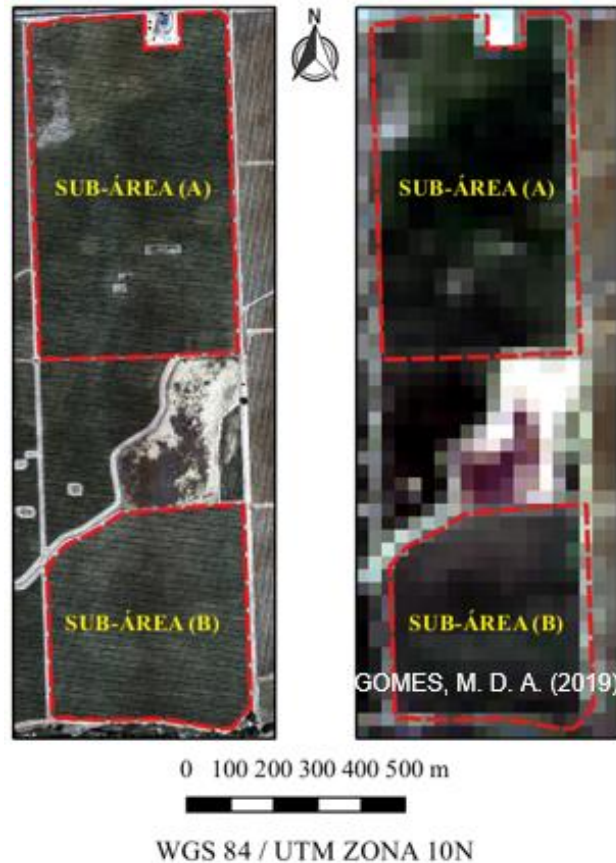
Figura 8 - Localização do vinhedo em estudo nos EUA (A), no estado da Califórnia (B) e no Borden Ranch (C) localizado no Condado de Sacramento



**Fonte:** Elaborado pela autora.

Utilizou-se imagens capturadas pelo VANT *AggieAir Minion* e do satélite Landsat-8. A área de estudo possui 55,4 ha sendo dividida em duas subáreas. A subárea A, referente ao norte da área total e a subárea B, referente ao sul, possuindo 34,4 e 21 ha, respectivamente (Figura 9).

Figura 9 - Imagem aérea da área de estudo capturada pelo VANT AggieAir (esquerda) e uma imagem do satélite Landsat-8 (direita) para o mesmo local, ambas obtidas no dia 11 de julho de 2015



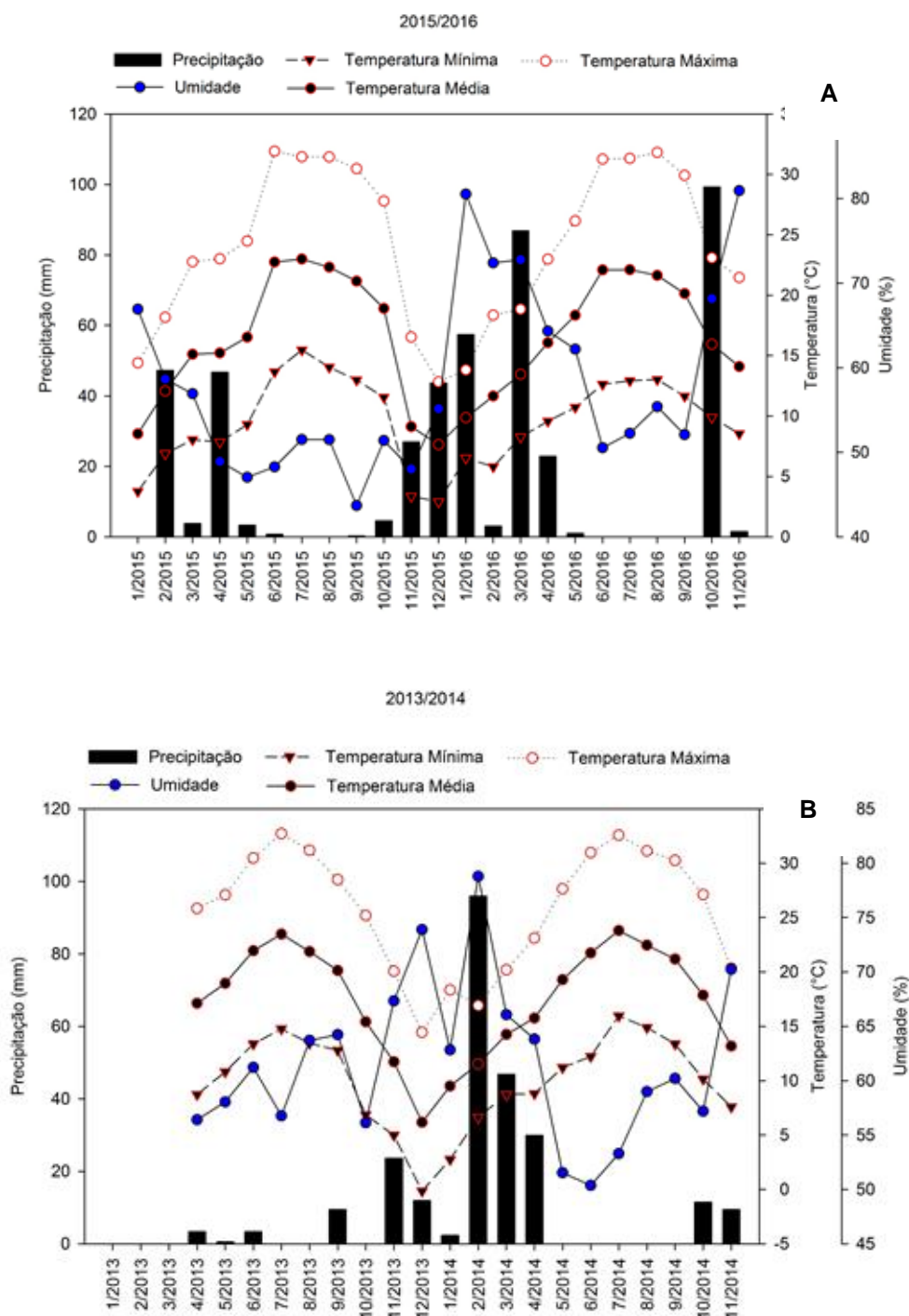
**Fonte:** Elaborado pela autora.

De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima da região é do tipo Csa, caracterizado como clima mediterrâneo de verão quente, com temperaturas médias anuais de 15°C e o mês mais seco do verão recebe menos de 30 mm. A Figura 10 (A e B) apresenta os valores de precipitação mensal (P, mm), médias mensais de temperatura do ar mínima, média e máxima (T min, T med e T max, respectivamente, °C) e umidade relativa do ar (UR, %), observados entre os meses de abril de 2013 a novembro de 2016, por meio de medições de dados micrometeorológicos da Estação de Fluxo GREPEX, instalada na área em estudo.

A área possui videiras irrigadas por meio do sistema de gotejamento, dotado de linhas de irrigação ao longo da base da treliça com emissor a 30 cm do solo (dois emissores por planta), com vazão média aferida de 4 L h<sup>-1</sup>. As treliças da videira estão a uma distância de 3,35 m, possuindo dois cordões, localizando-se o primeiro a uma distância de 1,45 m do solo e o segundo a 1,9 m. Geralmente, a videira Pinot Noir

crece de 2,0 a 2,5 m do solo, possuindo a maior parte da sua biomassa concentrada na metade superior da altura do dossel (KUSTA et al., 2018).

Figura 10 - Precipitação mensal (P), médias mensais de temperatura do ar máxima (T min), média (T med) e mínima (T max) e umidade relativa do ar (UR) mensal, observados entre os meses de abril de 2013 a novembro de 2014 (A) e fevereiro de 2015 a novembro de 2016



Fonte: Elaborado pela autora.

## 5.2 Processamento e especificações das imagens de VANT

O VANT utilizado para coleta de imagens foi operado pelo AggieAir (Figura 11), Grupo de Pesquisa do Laboratório de Pesquisa de Água da Universidade Estadual de Utah (Utah State University - USU), localizada na cidade de Logan. Quatro conjuntos de imagens de alta resolução foram capturados sobre o vinhedo nos anos de 2014, 2015 e 2016. Os vôos foram sincronizados com as datas e horários da passagem do satélite Landsat.

Figura 11 – Carga útil (a), conexão da carga útil à Aeronave AggieAir (b) e Aeronave AggieAir (c)



Conforme descrito na Tabela 4 e Tabela 5, diferentes câmeras ópticas foram usadas a cada ano (2014, 2015 e 2016). As câmeras variavam de câmeras Canon S95 de nível comercial a câmeras monocromáticas Lumenera tipo industrial, equipadas com filtros de banda estreita equivalentes às especificações Landsat 8. A resolução térmica para todos os quatro vôos foram de 60 cm e para as bandas do visível (RGB) foram de 10 cm, exceto o vôo da fase de maturação dos frutos (15 cm). Uma nuvem de pontos foi produzida a partir das imagens multiespectrais com uma densidade de 60 pontos/m<sup>2</sup> para a resolução de 15 cm (imagens de 2014) e 120



pontos/m<sup>2</sup> para a resolução de 10 cm (imagens de 2015 e 2016). As imagens da fase de floração foram obtidas no ano de 2016, as imagens de 2015 foram das fases de crescimento de baga e 2014 da fase de maturação próximo da colheita.

**Tabela 4** - Características das resoluções do modelo digital da superfície e fases fenológicas em cada data de voo

Datas	Resolução óptica e modelo digital da superfície	Resolução termal	Densidade de nuvens de pontos (pontos/m <sup>2</sup> )	Estádio fenológico
02/05/2016	10 cm	60 cm	123	Floração
02/06/2015	10 cm	60 cm	118	1° fase de crescimento de baga
11/07/2015	10 cm	60 cm	120	2° fase de crescimento de baga
09/08/2014	15 cm	60 cm	60	Maturação dos frutos

**Fonte:** Elaborado pela autora.

**Tabela 5** - Características dos sensores utilizados para captura das imagens com o Vant.

Data	Hora do voô do VANT (PDT)		Elevação do VANT Metros	Bandas		Câmeras e filtros óticos		Resposta espectral
	Início	Final		RGB	NIR	Respostas Radiométrica	Mega Pixels	
09/08/2014	11:30	11:50	450	Cannon S95	Cannon S95 modificada	8 bit	10	RGB: típica CMOS NIR: Kodak Wratten 750 nm
02/06/2015	11:21	12:06	450	Lumenera Lt65R Color	Lumenera Lt65R Monochromo	14 bit	9	RGB: típica CMOS NIR: Schneider 820 nm
11/07/2015	11:26	12:00	450	Lumenera Lt65R Color	Lumenera Lt65R Monochromo	14 bit	12	RGB: típica CMOS NIR: Schneider 820 nm
02/05/2016	12:53	13:17	450	Lumenera Lt65R Mono	Lumenera Lt65R Mono	14 bit	12	RED: equivalente ao filtro vermelho do Landsat 8 (640 a 880 nm) NIR: equivalente ao filtro infravermelho próximo do Landsat 8 (845 a 885 nm)

Onde: RGB é a reflectância vermelha (Red – R), verde (Green – G) e azul (Blue – B); NIR representa a reflectância do infravermelho próximo; RED reflectância do vermelho e CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) que é a área de memória de uma placa mãe de uma câmera.

**Fonte:** Elaborado pela autora.

### 5.3 Processamento das imagens de satélite

As imagens de satélite foram do Landsat 8 e adquiridas na interface de usuário do *EarthExplore*, ferramenta desenvolvida pelo *United States Geological Survey* (USGS), disponíveis no endereço eletrônico <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Para utilização das imagens de satélite para estimativa do NDVI e Kc-NDVI, foi necessário a conversão radiométrica das bandas 4 e 5 do satélite Landsat-8, que referem-se à conversão dos números digitais (DN) em valores físicos e a correção atmosférica, a qual foi realizada por meio do método DOS (*Dark Object Subtraction*), apresentado por Chavez (1988).

Na conversão radiométrica, os DN são transformados em valores de irradiância (Equação 1) e posteriormente, para reflectância (Equação 2), de acordo com a metodologia de Teixeira et al. (2015).

$$L_{\lambda} = M_L Q_{cal} + A_L \quad (1)$$

Em que:  $L_{\lambda}$  = irradiância no topo da atmosfera,  $W.m^{-2}sr^{-1}.\mu m^{-1}$ ;  $M_L$  = Fator de redimensionamento multiplicativo específico da banda a partir do arquivo metadados;  $A_L$  = Fator de redimensionamento aditivo específico da banda a partir dos metadados (deslocamento);  $Q_{cal}$  = valores do pixel da banda espectral (DN). Os valores de compensação de ganhos são fornecidos no arquivo de metadados da imagem.

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi \times L_{\lambda} \times d^2}{ESUN_{\lambda} \times \cos Z} \quad (2)$$

Em que:  $\rho_{\lambda}$  = reflectância no topo da atmosfera, adimensional;  $ESUN_{\lambda}$  = irradiância média solar no topo da atmosfera para cada banda,  $W.m^{-2}.\mu m^{-1}$ ;  $Z$  = ângulo zenital solar (radianos);  $d$  = distância Terra-Sol em unidades astronômicas.

Todos os processos de correção e processamento das imagens foram realizados por meio do recurso computacional *Quantum GIS* (QGIS), versão 2.14.9. O QGIS é software de Sistema de Informação Geográfica (SIG) de código aberto, licenciado segundo a Licença Pública Geral GNU, sendo um projeto oficial da *Open Source Geospatial Foundation* (OSGeo).

#### 5.4 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

O NDVI é a razão entre a diferença das reflectâncias das bandas no infravermelho próximo e no vermelho pela soma dessas mesmas refletividades (ROUSE et al., 1973). É um indicador sensível da quantidade e condição da vegetação, cujos valores variam no intervalo de -1 a 1.

O NDVI foi calculado pela equação 3 descrita abaixo:

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_4 - \rho_3}{\rho_4 + \rho_3} \quad (3)$$

Em que:  $\rho_4$  e  $\rho_3$  são os valores de refletâncias das bandas do infravermelho próximo e do vermelho, respectivamente.

Foi calculado o NDVI com as imagens de drone e de satélite para posteriormente ser utilizado na estimativa do  $K_c$ \_NDVI.

#### 5.5 Coeficiente de cultivo (Kc)

O coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) da cultura foi calculado por meio da relação entre a evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ) e evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) (Equação 4), de acordo com a metodologia descrita pelo Boletim 56 da FAO (ALLEN et al., 1998).

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o} \quad (4)$$

Em que:  $K_c$  é o coeficiente de cultivo, adimensional;  $ET_c$  é a evapotranspiração da cultura,  $\text{mm dia}^{-1}$ ;  $ET_o$  é a evapotranspiração de referência,  $\text{mm dia}^{-1}$ .

O  $K_c$  também foi obtido por meio de sensoriamento remoto ( $K_c$ \_NDVI). Foi primeiramente calculado pela equação de regressão exponencial ( $R^2 = 0,63$ ) encontrada por Er-Raki et al., (2013) para o vinhedo por meio da correlação entre NDVI para imagens obtidas por meio de um radiômetro portátil (MSR16 MultiSpectral

Radiometer, Cropscan Inc., EUA) e valores de Kc medido em campo em datas diferentes, como demonstrado pela equação 5.

$$Kc_{NDVI} = 0,1808e^{1,3138*NDVI} \quad (5)$$

Em que:  $Kc_{NDVI}$  é o coeficiente de cultivo obtido por meio do sensoriamento remoto, adimensional; NDVI é o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada, adimensional.

Apesar da equação de Er-Raki et al., (2013) possuir uma  $R^2$  considerado baixo, optou-se o uso dela por ser uma equação validade em uma região de clima semelhante a região de estudo desta pesquisa.

Cada pixel da imagem possui um Kc específico, neste sentido, é necessário a obtenção de um Kc médio para que seja utilizado no manejo da irrigação. Para obtenção deste Kc médio na imagem, foi realizado uma coleta de 40 pontos aleatoriamente e calculado uma média aritmética, utilizando uma ferramenta de escolha aleatória do Software QGIS 2.14.9 (*development team*).

## 5.6 Evapotranspiração de Referência (ET<sub>o</sub>)

A evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) foi calculada pela equação de Penman-Monteith conforme a Equação 6, pelo Software Ref-ET (ALLEN, 2016).

$$ET_o = \frac{0,408*S*(RN-G) + \frac{\gamma*900*U_2*(es-ea)}{T+273}}{S + \gamma*(1+0,34*U_2)} \quad (6)$$

Em que: ET<sub>o</sub> é a evapotranspiração de referência (mm hora<sup>-1</sup>); S é a declividade da curva de pressão de vapor do ar (kPa °C<sup>-1</sup>);  $\gamma$  é a constante psicrométrica (kPa °C<sup>-1</sup>); R<sub>n</sub> é o saldo de radiação (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>); G é o fluxo de calor no solo (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>); T é a temperatura média diária do ar (°C); U<sub>2</sub> é a velocidade do vento a 2 m de altura (m s<sup>-1</sup>); es é a pressão de saturação de vapor (kPa); ea é a pressão parcial de vapor (kPa) (ALLEN et al., 1998).

O programa Ref\_ET possui algoritmo que fornece cálculo padronizado das equações de estimativa da ET<sub>o</sub>. Estes cálculos são realizados a partir de dados meteorológicos disponibilizados pelo usuário.

Os dados meteorológicos de entrada utilizados no Ref-ET foram fornecidos pelo *Water Research Laboratory* da Universidade Estadual de Utah. Estes dados foram medidos em campo, no intervalo temporal de 1 hora, por meio de estação micrometeorológica. Os dados de entrada foram: a temperatura do ar pressão atmosférica do ar, pressão de vapor atual fluxo de calor no solo, saldo de radiação solar e velocidade do vento.

O Software Ref-ET permite a entrada dos dados meteorológicos em diversas unidades, gerando o resultado da evapotranspiração em mm/hora. Posteriormente, foi realizado a integração dos valores em planilha eletrônica do Excel para a transformação em mm/dia.

### 5.7 Evapotranspiração da cultura (ETc)

A evapotranspiração real (ETr) foi calculada por meio do método da Covariância de Vórtice Turbulento (*Eddy Covariance*), em mm, para cada intervalo de medição por meio da Equação 7:

$$ETr = \frac{t LE}{\lambda} \quad (7)$$

Em que: t é o tempo, em segundos, correspondente ao intervalo de medição. Neste caso, para um intervalo de 60 min, t = 3600 s. LE é fluxo de calor latente ( $W m^{-2}$ ), e  $\lambda$  é o calor latente de vaporização da água,  $J kg^{-1}$ .

Para determinação do calor latente de vaporização da água foi utilizada a equação 8:

$$\lambda = [2,501 - (0,00236 T1)] 10^6 \quad (8)$$

Em que: T1 é a temperatura do ar, em °C.

A ETc também foi calculada por meio de dados de sensoriamento remoto utilizando o produto do  $Kc_{NDVI}$  e da  $ETo$  (Equação 8).

$$ETc_{NDVI} = Kc_{NDVI} * ETo \quad (9)$$

Em que:  $ET_{C\_NDVI}$  é a evapotranspiração da cultura calculada por meio do sensoriamento remoto,  $\text{mm dia}^{-1}$ ;  $Kc\_NDVI$  é o  $Kc$  calculado por meio da correlação entre o NDVI e o  $Kc$  medido em campo, adimensional;  $ET_o$  é a evapotranspiração de referências,  $\text{mm dia}^{-1}$ .

Após a obtenção dos valores encontrados da  $ET_c$ , calculada pelo método tradicional e pelo sensoriamento remoto, foi realizada a comparação destes resultados.

### 5.8 Equação para cálculo do coeficiente de cultivo por meio de sensoriamento remoto ( $Kc\_sr$ ).

Foi realizado uma relação entre o NDVI, obtidos pelas imagens de VANT, e os valores de  $Kc$  real da cultura, obtidos por meio de uma regressão linear simples, a qual gerou uma equação (Equação 10) que, posteriormente, foi utilizada para calcular os  $Kc$  estimados por meio de imagens de VANT.

O  $Kc$  real da cultura foi calculado por meio da relação entre  $ET_c$  medida pela Covariância de Vórtice Turbulento e  $ET_o$ , calculada pelo Ref-ET.

$$Kc\_sr = - 0,7954 * NDVI + 1,2692 \quad (10)$$

Em que:  $Kc\_sr$  é o coeficiente de cultura encontrado por sensoriamento remoto, adimensional; NDVI é o índice de vegetação da diferença normalizada, adimensional.

### 5.9 Avaliação do desempenho dos modelos

Na avaliação do desempenho dos modelos foi comparada a evapotranspiração real diária, estimada pelos modelos do sensoriamento remoto, com a evapotranspiração real, calculada pela Covariância de Vórtice Turbulento utilizando os indicadores estatísticos *Mean Bias Error (MBE)*, *Relative Mean Bias Error (rMBE)*, *Root Mean Square Error (RMSE)*, *Relative Root Mean Square Error (rRMSE)*, *Relative*

*Root Mean Square Error (rRMSE)* e o Índice de Concordância de Willmont (*d*), desenvolvido por esse autor em 1981.

Os cinco índices foram calculados utilizando as Equações 11, 12, 13, 14 e 15, respectivamente, (STONE et al., 1978; WILMOTT, 1981; IQBAL,1983):

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (Si-Oi)}{n} \quad (11)$$

$$rMBE(\%) = 100 * \frac{\frac{\sum_{i=1}^n (Si-Oi)}{n}}{\bar{O}} \quad (12)$$

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Si-Oi)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

$$rRMSE(\%) = 100 * \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Si-Oi)^2}{\bar{O}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Si-Oi)^2}{\sum_{i=1}^n (|Si-\bar{O}| + |Oi-\bar{O}|)} \quad (15)$$

Em que: Si representa os valores estimados; Oi são os valores medidos;  $\bar{O}$  são os valores médios medidos e n é o número de observações. Sendo a unidade de saída a mesma da variável de entrada testada ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) ou porcentagem (%).

Os índices estatísticos citados permitem fazer avaliações sobre os valores encontrados pelos modelos e os valores medidos em campo. O MBE indica a tendência dos modelos subestimar ( $MBE < 1$ ) e superestimar ( $MBE > 1$ ) os valores previstos. O RMSE informa sobre o espalhamento dos dados avaliados. O d de Willmott pode variar de 0 a 1, e serve como indicador da exatidão do modelo avaliado, onde valores próximos de 1 indicam maior exatidão.

O rRMSE é utilizado por alguns autores com uma escala classificatória para diferentes intervalos a fim de avaliar a acurácia dos modelos (JAMIESON et al., 1991; HEINEMANN et al., 2012; LI et al., 2013):

Excelente se  $rRMSE < 10\%$ ;



Bom se  $10\% \leq rRMSE < 20\%$ ;

Aceitável se  $20\% \leq rRMSE < 30\%$ ;

Pobre se  $rRMSE \geq 30$ .

Os índices estatísticos obtidos para o presente trabalho foram realizados com o desenvolvimento de um script processado no software Microcal<sup>TM</sup>Origin 6.0<sup>®</sup>.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Comparação do NDVI encontrado por plataforma terrestre e plataforma orbital

As Figuras 12 e 13 representam o NDVI obtido por meio de imagens de VANT e de satélite, respectivamente. As datas sequenciadas nestas figuras representam as fases de final de maturação, 1° e 2° fase de desenvolvimento de baga e floração.

Observa-se que a sequência anual das imagens não corresponde à sequência das fases da videira, este fato ocorre porque o grupo de pesquisa que é composto por 15 membros, em média, precisa que todos estejam disponíveis para ir a campo, pois trabalham em um Laboratório no estado de Utah e as coletas foram realizadas num campo de pesquisa no estado da Califórnia. Sendo assim, os dias de coleta das imagens, na maioria das vezes, não coincide com as fases sequenciadas da videira.

Os índices de vegetação de alvos da superfície terrestre retratam o comportamento espectral da vegetação e do solo, demonstrando o comportamento das mudanças temporais e espaciais da superfície. Este comportamento espectral é obtido por meio de imagens, utilizando sensores específicos em uma plataforma. As plataformas utilizadas para as imagens obtidas foram o VANT AggieAir e o Landsat 8.

O detalhamento das imagens depende da resolução do sensor que a plataforma carrega. Os sensores utilizados no VANT AggieAir, para captura de imagens e obtenção do NDVI possuem uma resolução de 15 x 15 cm, na imagem de 09/08/2014, e 10 x 10 cm nas demais imagens, estas resoluções resultam em 44 pixels/m<sup>2</sup> e 100 pixels/m<sup>2</sup>, respectivamente. Já os sensores (OLI – *Operational Land Images*) utilizados na plataforma Landsat 8 possuem uma resolução de 30 x 30 m, o que significa que a área de cada pixel da imagem é 900 m<sup>2</sup>.

O número de pixels influencia diretamente na qualidade da imagem. Tendo em vista que a área de um pixel das imagens do Landsat 8 é 900 m<sup>2</sup>, percebe - se na Figura 13 a baixa resolução destas imagens comparadas às imagens de VANT (Figura 12). Comparando e analisando a área que foi destacada nas imagens de VANT e de satélite, constata-se que o NDVI calculado por satélites pode mascarar o comportamento dos dados de campo, pois devido ao tamanho do pixel é detectado

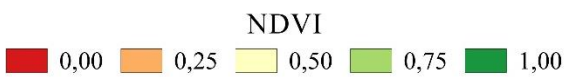
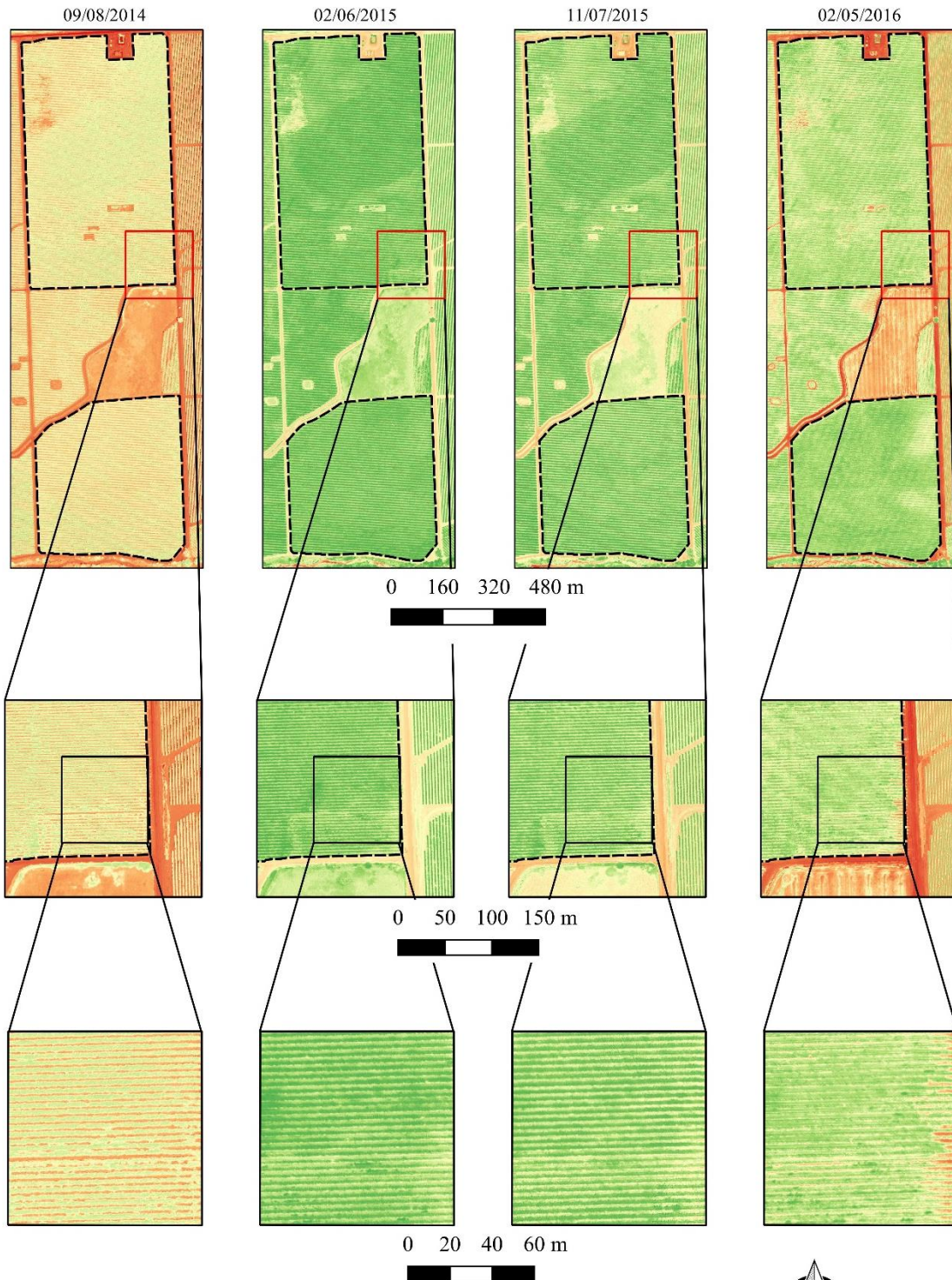
uma maior área de solo exposto e isto acontece devido a influência da máxima semelhança de veracidade que é utilizada pela linguagem do algoritmo utilizado no software de programação.

Neste contexto, pode-se afirmar que as imagens de VANT obtém um maior detalhamento da área e, conseqüentemente, expressam melhores resultados dos índices calculados por elas.

O NDVI é utilizado para detectar diversas características de vitalidade das culturas agrícolas. Porém, para que esta caracterização represente as condições mais próximas do real, é fundamental que se tenha uma imagem de boa resolução para caracterizar a biomassa, taxa fotossintética e demanda hídrica, pois é necessário um maior detalhamento da área.

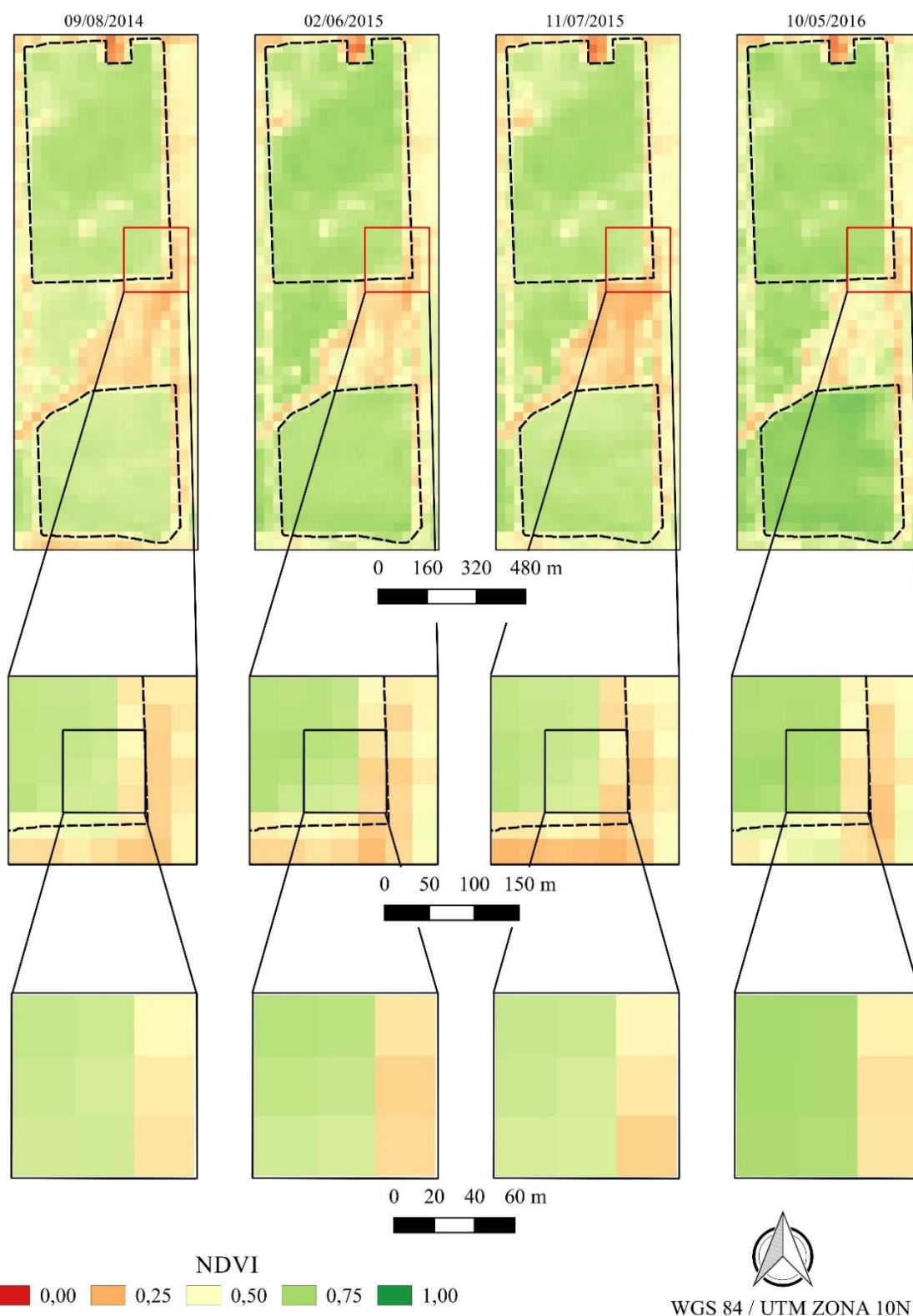
As imagens da área foram obtidas pelo VANT AggieAir no mesmo dia e horário da passagem do Satélite Landsat 8, exceto no dia 02 de maio de 2016 porque nesta data a passagem do satélite coincidiu com um dia de nuvens, prejudicando a qualidade da imagem. Neste sentido, a imagem obtida com o VANT no dia 02/05/2016 foi comparada com a imagem do Satélite do dia 10/05/2016. Apesar do satélite possuir uma periodicidade de 16 dias em uma determinada localidade, as imagens dos dias vão sendo capturadas com uma sobreposição e, por este motivo, na imagem do dia 10/05/2016 foi possível capturar a área de estudo.

**Figura 12 - Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) para a cultura da videira determinado por meio de imagens obtidas com VANT *AggiAir Minion* (Veículos Aéreos não Tripulados)**



Fonte: Elaborado pela autora.

**Figura 13** - Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) para a cultura da videira determinado por meio de imagens com Landsat 8



Fonte: Elaborado pela autora.

Os valores de NDVI podem variar entre -1 e 1, sendo as superfícies que contém água ou nuvens representadas por valores menores que zero, áreas que contém solo exposto com valores próximos ou igual a zero e áreas com vegetação com valores maiores de zero e próximo de 1. A tabela 6 contém os valores de NDVI calculados por meio de imagens de VANT e Satélite, em cada área e fase da cultura analisada.

**Tabela 6** - Valores de NDVI das subáreas Norte e Sul calculados por meio de imagens do VANT *AggieAirMinione* do satélite Landsat 8

Estádio fenológico	LANDSAT 8		VANT	
	SUBÁREA A (NORTE)	SUBÁREA B (SUL)	SUBÁREA A (NORTE)	SUBÁREA B (SUL)
Floração	0,72 (0,039) <sup>x</sup>	0,66 (0,027) <sup>x</sup>	0,75 (0,050) <sup>x</sup>	0,75 (0,029) <sup>x</sup>
1º fase de crescimento de baga	0,67 (0,040) <sup>x</sup>	0,77 (0,042) <sup>x</sup>	0,87 (0,038) <sup>x</sup>	0,88 (0,016) <sup>x</sup>
2º fase de crescimento de baga	0,68 (0,050) <sup>x</sup>	0,69 (0,029) <sup>x</sup>	0,84 (0,050) <sup>x</sup>	0,85 (0,023) <sup>x</sup>
Maturação dos frutos	0,71 (0,040) <sup>x</sup>	0,62 (0,029) <sup>x</sup>	0,59 (0,026) <sup>x</sup>	0,58 (0,024) <sup>x</sup>

<sup>x</sup> representa o desvio padrão ( $\sigma$ ) dos valores de cada estágio fenológico estudado e para cada método utilizado.

Fonte: Elaborado pela autora.

Espera-se que o comportamento do NDVI seja: crescente na fase de brotação até o início da maturação, pois é a fase de crescimento vegetativo e, posteriormente, enchimento dos frutos; constante na fase próxima à colheita até a colheita propriamente dita, pois nesta fase toda área foliar já está desenvolvida e está ocorrendo o suprimento dos drenos (frutos); e decrescente após a fase de colheita, considerando que após esta fase é realizado uma poda para que ocorra a renovação das folhas e posteriormente uma nova floração.

Ao entrar em processo de floração, o NDVI deve ser maior que a fase de maturação dos frutos e menor que as fases de crescimento da baga. Os valores expressos de NDVI pelas imagens capturadas são semelhantes, em ambas as plataformas. Porém, ao compará-los com as fases anteriores dentro da mesma plataforma, percebemos que os expressos pelas imagens do Landsat 8 não assumem o comportamento adequado, visto que a variação entre fases não obedece de forma coerente os valores crescentes, constantes e decrescentes nas fases estudadas.

Nas fases de crescimento de baga, os valores de NDVI devem ser maiores do que na fase de maturação dos frutos, pois nestas fases a planta encontra-se em pleno desenvolvimento. Estes valores são expressos de forma mais coerente nas imagens capturadas por VANT, pois ocorreu um incremento em relação à fase anterior (maturação dos frutos), de 50% na 1ª fase de crescimento da baga e 44,8% na 2ª fase de crescimento da baga na subárea A e, na subárea B, um incremento de 50% e 46,5% nas fases citadas. Já nos valores de NDVI expressos pelas imagens do LANDSAT 8 houve uma redução na subárea A de 5,6% e 4,2%, e um incremento de 13% e 23% na subárea B.

Os valores de NDVI no dia 09 de agosto de 2014, expressos nas imagens capturadas pelo Landsat 8 (0,71 e 0,68), são superiores aos valores expressos pelas imagens do VANT (0,58) (Tabela 6). Nesta data, a imagem foi capturada na fase de maturação dos frutos, no final de verão e próximo do outono. Neste período, as folhas da videira estão começando a ficar vermelhas e amarelas, com isso ocorre a redução da clorofila e, conseqüentemente, os valores de NDVI são menores.

Sendo assim, pode-se inferir que os valores de NDVI deveriam ser menores, ou mais próximos de zero, o que representa uma área com solo exposto e pouca vegetação. Nas imagens capturadas pelo VANT pode-se visualizar este menor valor, em ambas as áreas, e isto pode ter ocorrido devido ser uma imagem de melhor resolução, fazendo com que o algoritmo calcule o índice esperado de forma mais precisa.

Analisando videiras na região da Serra Gaúcha, Junges et al. (2017) constataram que os perfis temporais de NDVI obtidos por sensoriamento remoto por meio de plataformas terrestres refletem o acúmulo de biomassa ao longo do ciclo, permitindo o monitoramento do crescimento e desenvolvimento das plantas durante os estágios e mudanças de dossel.

Os mesmos autores afirmam que o NDVI obtido por meio de sensores em plataformas terrestres pode ser usado para caracterizar o vigor do dossel vegetativo em vinhedos a partir de dados meteorológicas e práticas de manejo em tempo real, as quais são difíceis de quantificar por outros métodos tradicionais já utilizados, sendo a plataforma terrestre indicada com uma forma rápida e precisa, se comparada com as plataformas orbitais.

Um estudo de caso para vinhedos no estado de Washington, realizado para estimar o crescimento da cultura por meio de NDVI utilizando imagens de satélites,

constatou a superestimação de valores de NDVI nas fases analisadas (BADR et al., 2015), corroborando com os resultados encontrados nesta pesquisa, uma vez que os valores de NDVI encontrados por meio da plataforma orbital Landsat 8, na fase de maturação dos frutos, são valores mais altos do que os encontrados pela plataforma terrestre VANT, deduzindo assim a superestimação por ser uma fase em que a cultura se encontra com uma menor área foliar e folhas com menores teores de clorofila, o que deveria acarretar um menor NDVI.

Junges et al. (2017), utilizando sensores em plataforma terrestres, encontraram valores de NDVI para videira entre 0,80 e 0,86 na fase de frutificação, ratificando os resultados desta pesquisa em que se obteve valores de NDVI, por meio de VANT, variando de 0,84 a 0,88, na mesma fase supracitada.

## **6.2 Comparação do Kc\_NDVI encontrados por plataforma terrestre e plataforma orbital**

Utilizando a equação de Er-Raki et al. (2013) proposta para o cálculo de Kc por meio de sensoriamento remoto ( $Kc_{NDVI}$ ) com  $R^2 = 0,63$  (Equação 5), foram comparados os coeficientes de cultivo encontrados por meio das imagens de VANT e do Landsat 8 para a área em estudo desta pesquisa.

As Figuras 14 e 15 representam as imagens que expressam os valores de Kc da videira, calculados por meio do NDVI obtidos com as plataformas VANT e Landsat 8, respectivamente. Percebe-se nas figuras que as imagens do VANT possuem uma melhor resolução do que as imagens do Landsat 8, devido ao número de pixels que o sensor captura por metro quadrado, demonstrado anteriormente nas Figuras 12 e 13. Neste sentido, pode-se inferir que os valores de Kc expressos pelas imagens de VANT representam um comportamento mais próximo do real.

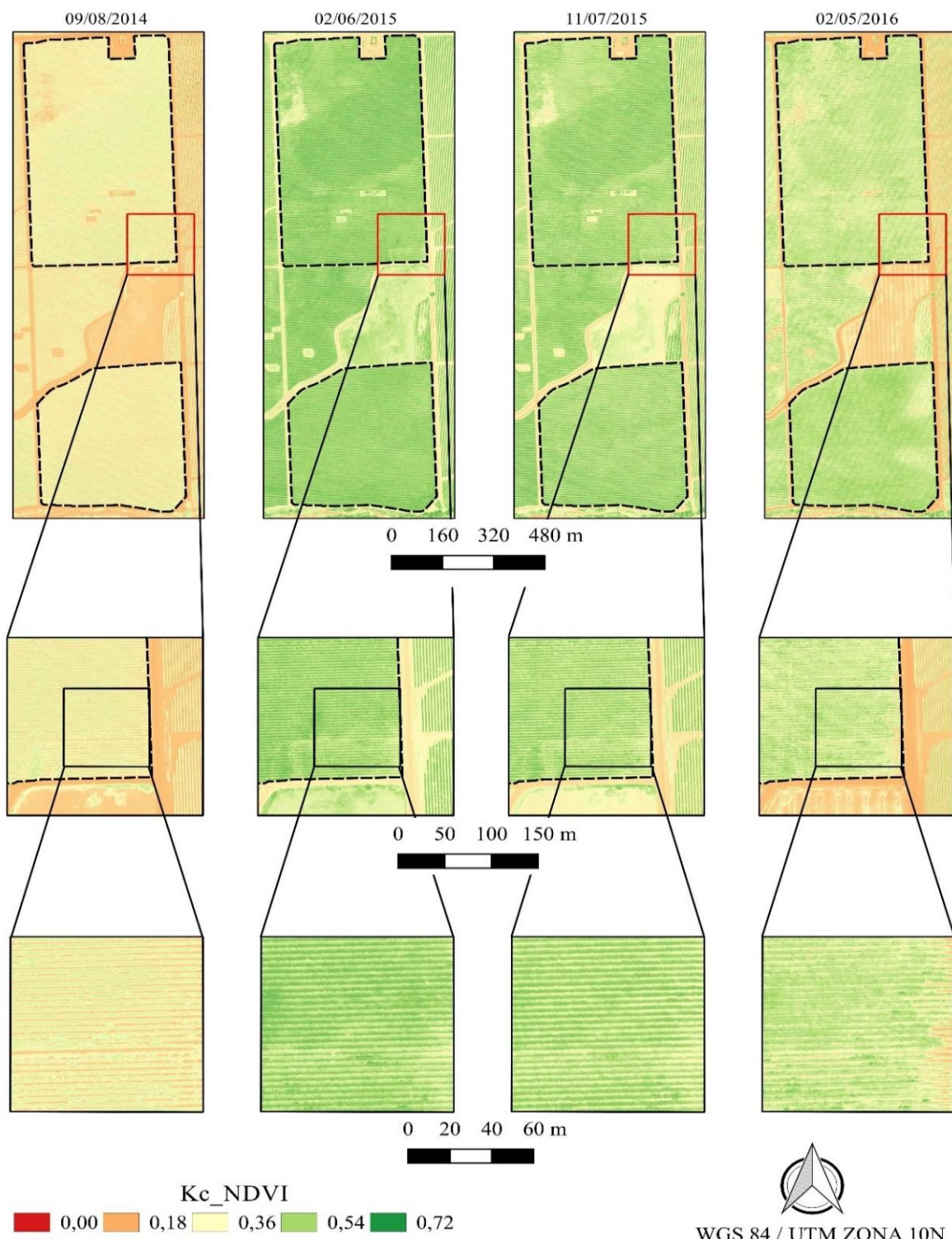
Oliveira (2014) avaliando a variação temporal dos índices de vegetação na cultura da soja e cana-de-açúcar e comparando os resultados de  $Kc_{NDVI}$  e Kc FAO, observou um padrão semelhante, confirmando que o NDVI pode ser utilizado como alternativa na obtenção do coeficiente de cultura.

Souza (2016) avaliando a estimativa da demanda hídrica utilizando NDVI, concluiu que os valores de NDVI permitem estimar os coeficientes de cultura,



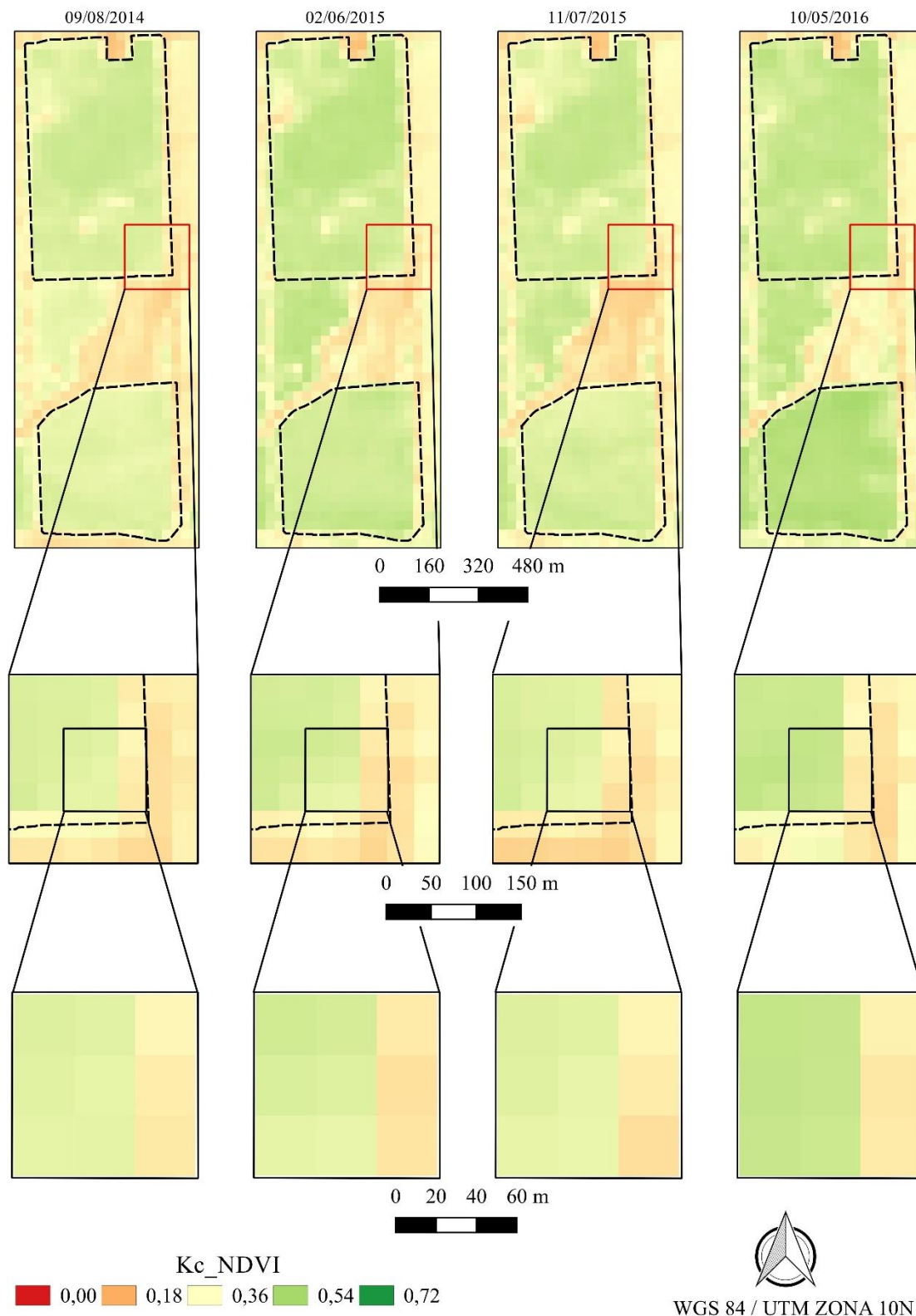
mostrando-se uma alternativa eficiente para obtenção da demanda hídrica. Porém, a maioria destas pesquisas é realizada com plataformas orbitais, existindo poucas pesquisas que utilizem VANT, as quais possuem uma melhor resolução e, conseqüentemente, um resultado mais próximo do real.

**Figura 14 -** Coeficiente de cultivo determinado por meio do NDVI para a cultura da videira obtido por meio de imagens de VANT



**Fonte:** Elaborado pela autora.

**Figura 15 -** Coeficiente de cultivo determinado por meio do NDVI para a cultura da videira obtido por meio de imagens do satélite Landsat-8



**Fonte:** Elaborado pela autora.

Para o cálculo do  $Kc_{NDVI}$  foram utilizadas os valores de NDVI de cada fase e para cada área em estudo. Sendo cada data, sequenciada, representando o Kc da fase de maturação do fruto, 1° fase de crescimento da baga, 2° fase de crescimento da baga e floração. Posteriormente foram capturados os Kc médios das áreas para a realização da comparação entre os valores calculados para cada plataforma e, em seguida, avaliar estes valores com os indicados pela FAO.

A tabela 7 apresenta os valores  $Kc_{NDVI}$  médios para cada fase estudada da videira. Os valores de Kc nas imagens capturadas pelo AggieAir variaram de 0,39 a 0,57, sendo o menor valor encontrado na maturação do fruto e maiores valores na fase de frutificação, para o modelo proposto por Er-Raki et al. (2013).

**Tabela 7** - Valores de  $Kc_{NDVI}$  das subáreas Norte e Sul calculados por meio de imagens do VANT *AggieAirMinione* do satélite Landsat 8

Estádio fenológico	NORTE			SUL		
	ETo mm/dia	$Kc_{NDVI}$ VANT	$Kc_{NDVI}$ L8	ETo mm/dia	$Kc_{NDVI}$ VANT	$Kc_{NDVI}$ L8
Floração	4,96	0,48 (0,032) <sup>x</sup>	----	5,16	0,49 (0,022) <sup>x</sup>	----
	5,12	----	0,47 (0,022) <sup>x</sup>	5,23	----	0,43 (0,020) <sup>x</sup>
1° fase de crescimento de baga	5,55	0,57 (0,026) <sup>x</sup>	0,43 (0,023) <sup>x</sup>	5,59	0,57 (0,013) <sup>x</sup>	0,50 (0,026) <sup>x</sup>
2° fase de crescimento de baga	5,85	0,55 (0,032)+ <sup>x</sup>	0,44 (0,029) <sup>x</sup>	5,90	0,55 (0,017) <sup>x</sup>	0,45 (0,017) <sup>x</sup>
Maturação dos frutos	5,90	0,40 (0,014) <sup>x</sup>	0,46 (0,024) <sup>x</sup>	5,74	0,39 (0,012) <sup>x</sup>	0,41 (0,015) <sup>x</sup>

<sup>x</sup> representa o desvio padrão ( $\sigma$ ) dos valores de cada estágio fenológico estudado e para cada método utilizado.

Fonte: Elaborado pela autora.

Já os valores expressos nas imagens capturadas pelo Landsat 8 variaram de 0,41 a 0,50. Estes resultados mostraram a diferença existente quando ocorre a mudança de sensor, constatando que além da possibilidade da menor periodicidade de análise de um determinado cultivo, a resolução do sensor que a plataforma carrega é de fundamental importância, pois interfere efetivamente na avaliação dos parâmetros biofísicos e fisiológicos das culturas estudadas.

Sun et al. (2017) avaliando NDVI em videiras por meio de imagens de Landsat 7 e Landsat 8, na mesma área de estudo desta pesquisa (Lodi – California), encontraram diferenças nos valores de NDVI obtidos por estas plataformas. Os

autores justificam que as razões para estas diferenças são complexas tais como a resoluções dos sensores utilizadas e altura de coletas das imagens, porém citam que uma das razões é a diferença dos sensores na reflectância das bandas utilizadas para o cálculo do NDVI.

Observando os valores de  $K_c$  expressos nas imagens de VANT (Tabela 7), nota-se um aumento gradativo entre a fase de florescimento e as fases de crescimento de baga. A tendência do ciclo é o aumento da área foliar, em seguida entrar em fase de floração e posterior enchimento dos frutos até a colheita. Neste sentido, os  $K_c$  de floração estariam aumentando gradativamente (0,48 e 0,49), para a 1ª fase de crescimento da baga (0,57), com uma ligeira redução na 2ª fase de crescimento da baga (0,55).

Percebe-se que os valores de  $K_{c\_NDVI}$  obtidos por meio de imagens de VANT possuem a tendência explicada por Allen et al. (1998), em que no estágio fenológico de desenvolvimento inicial, as culturas possuem um menor  $K_c$ , pois apresentam uma menor área foliar, tendo um aumento gradativo à medida que ocorre o desenvolvimento vegetativo, a floração e a frutificação. Em culturas anuais, o  $K_c$  reduz à medida que ocorre a senescência das plantas e em culturas perenes a redução é expressa no comportamento da poda para renovação do ciclo.

Os valores de  $K_c$  obtidos por meio das imagens do Landsat 8 (Tabela 7) não expressam o mesmo comportamento supracitado das imagens capturadas pelo VANT, onde foram obtidos valores de: 0,47 e 0,42 na fase de floração; 0,43 e 0,50 na 1ª fase de crescimento da baga; 0,44 e 0,45 na 2ª fase de crescimento da baga e 0,46 e 0,41 na fase de maturação para as subáreas norte e sul, respectivamente.

Percebe-se que não ocorre um comportamento gradativo das fases da cultura, podendo estar superestimando na fase de maturação e subestimando na fase de desenvolvimento efetivo (crescimento da baga), acarretando assim uma indicação não condizente com a realidade.

Neste sentido, quando se avalia coeficiente de cultura para indicação de lâminas de irrigação é necessário permitir a estimativa mais próxima da necessidade hídrica da planta, para que se possa fazer um bom manejo do recurso hídrico e da cultura.

Allen et al. (1998) descreve os coeficientes de cultivo para as fases inicial, média e final de diversas culturas sem estresse hídrico em clima sub-úmido. Segundo os autores, o coeficiente de cultivo para videira, em que seu fruto será consumido como uva de mesa ou seca, possui valor de 0,30; 0,85 e 0,45 para as fases inicial, média e

final. Já as videiras com os frutos destinados à produção de vinho os valores inicial, médio e final de  $K_c$  são, respectivamente, 0,30; 0,70 e 0,45.

Os valores de  $K_c$  (0,70) da fase intermediária descritos no Boletim da FAO 56, são das fases que representam o desenvolvimento vegetativo pleno até o início da maturação, então seria necessário ter uma imagem de VANT capturada nesta fase para fazermos a comparação dos valores. O  $K_c$  exposto na Tabela 7, na fase intermediária, representa as fases de crescimento de baga, ou seja, a fase de frutificação, em que a exigência de água já está reduzindo devido a maturação do fruto. Porém, pode-se perceber a tendência expressiva que os  $K_{c\_NDVI}$  obtidos por meio de imagens de VANT possuem em relação ao comportamento semelhante aos indicados pela FAO, mostrando assim a viabilidade do uso desta tecnologia para o manejo da irrigação.

Na tabela 8 a seguir estão os valores de evapotranspiração de referência ( $ETo$ ), coeficientes de cultivo calculados pelo NDVI ( $K_{c\_NDVI}$ ), evapotranspiração da cultura calculada por sensoriamento remoto ( $ETc$  VANT e  $ETc$  L8) e a evapotranspiração real da cultura ( $ETc$ ) calculada pela Covariância de Vórtice Turbulento.

Os maiores valores da evapotranspiração de referência, para as datas estudadas e em ambas as áreas, ocorreram na fase de maturação da videira e nas fases de crescimento de baga, esses maiores valores são justificados pela estação de verão. Com o produto da evapotranspiração de referência com os  $K_c$  calculados por sensoriamento remoto obteve-se a evapotranspiração da cultura para cada fase e cada plataforma (VANT e Landsat 8).

Percebe-se que a  $ETc$  estimada por meio de imagens de VANT e Landsat 8, na fase de maturação, possui uma grande diferença da  $ETr$  medida, podendo estar expressando valores de subestimados. Nesta fase, os  $K_{c\_NDVI}$  são relativamente baixos. Os altos valores de  $ETr$  medidos pelo método da Covariância de Vórtice Turbulento são influenciados pela estação de verão, onde predominam altas temperaturas.

Considerando que o NDVI é máximo quando possui uma intensa área vegetada e menor quando as folhas estão com características de senescência (amarelas ou vermelhas), pode-se inferir que os valores de NDVI, na fase próxima à colheita, são baixos porque as folhas da videira já se encontravam amarelas e avermelhadas, ou seja, com um menor valor de clorofila. Neste sentido, obtêm-se valores de  $K_{c\_NDVI}$  baixos, pois a equação proposta por Er-Raki et al. (2013) é uma função linear

crescente, fazendo com que a variável dependente diminua quando a variável independente diminui, ou vice e versa, e conseqüentemente, valores reduzidos de ETc.

**Tabela 8** - Informações de parâmetros para o manejo da irrigação determinada por diferentes métodos para a subárea A (NORTE) e subárea B (SUL)

NORTE						
Estádio fenológico	ETo mm/dia	Kc_NDVI VANT	Kc_NDVI L8	ETc VANT mm/dia	ETc L8 mm/dia	ETr mm/dia
Floração	4,96	0,48 (0,032) <sup>x</sup>	----	2,38 (0,115) <sup>x</sup>	----	3,18
	5,12	----	0,47 (0,022) <sup>x</sup>	----	2,41 (0,157) <sup>x</sup>	3,30
1° fase de crescimento de baga	5,55	0,57 (0,026) <sup>x</sup>	0,43 (0,023) <sup>x</sup>	3,17 (0,144) <sup>x</sup>	2,41 (0,126)	3,21
2° fase de crescimento de baga	5,85	0,55 (0,032) <sup>x</sup>	0,44 (0,029) <sup>x</sup>	3,19 (0,191) <sup>x</sup>	2,58 (0,167) <sup>x</sup>	3,61
Maturação dos frutos	5,90	0,40 (0,014) <sup>x</sup>	0,46 (0,024) <sup>x</sup>	2,33 (0,080) <sup>x</sup>	2,71 (0,140) <sup>x</sup>	4,79
SUL						
Estádio fenológico	ETo mm/dia	Kc_NDVI VANT	Kc_NDVI L8	ETc VANT mm/dia	ETc L8 mm/dia	ETr mm/dia
Floração	5,16	0,49 (0,022) <sup>x</sup>	----	2,54 (0,112) <sup>x</sup>	----	3,30
	5,23	----	0,43 (0,020) <sup>x</sup>	----	2,22 (0,105) <sup>x</sup>	3,50
1° fase de crescimento de baga	5,59	0,57 (0,013) <sup>x</sup>	0,50 (0,026) <sup>x</sup>	3,21 (0,068) <sup>x</sup>	2,80 (0,143) <sup>x</sup>	3,17
2° fase de crescimento de baga	5,90	0,55 (0,017) <sup>x</sup>	0,45 (0,017) <sup>x</sup>	3,27 (0,101) <sup>x</sup>	2,66 (0,097) <sup>x</sup>	3,63
Maturação dos frutos	5,74	0,39 (0,012) <sup>x</sup>	0,41 (0,015) <sup>x</sup>	2,24 (0,070) <sup>x</sup>	2,35 (0,088) <sup>x</sup>	4,76

<sup>x</sup> representa o desvio padrão ( $\sigma$ ) dos valores de cada estágio fenológico estudado e para cada método utilizado.

Fonte: Elaborado pela autora.

A fase de maior demanda hídrica, nos dados analisados por sensoriamento remoto, foi a fase em que a videira se encontra em pleno desenvolvimento de frutificação, a qual corresponde a 2° fase de crescimento de bagas. Porém, seria necessário obter mais imagens nas fases de início do enchimento dos frutos, a fim de

possuir dados intercalados entre a fase inicial e de floração para obtenção e avaliação do comportamento, aferindo os resultados já expressos nas fases avaliadas desta pesquisa.

Er-Raki et al. (2013) encontraram valores de  $Kc_{NDVI}$  videira em três estádios de crescimento (inicial, médio e maturação): 0,22; 0,45 e 0,30. Ao compará-los com os valores apresentados na FAO-56 (Allen et al, 1988), especialmente para o estágio médio, são valores baixos. Os autores explicam que, provavelmente, esta diferença é ocasionada devido à diferença entre o clima e as práticas agrícolas utilizadas em cada região de medição e também pode ser atribuída ao tipo de sistema utilizado (gotejamento).

Observando-se a Tabela 9 percebe-se que houve diferenças significativas pelo teste F ( $p < 0,01$ ) para os métodos de avaliação da  $ET_c$ , nos respectivos estádios fenológicos (Tabela 8), com variação observada (Teste F a  $p < 0,01$ ) entre os três métodos para determinação média da  $ET_c$ .

**Tabela 9** - Quadrados médios e teste de media para  $ET_c$ , determinada por diferentes métodos para subárea A (NORTE) e subárea B (SUL)

<b>NORTE</b>				
<b>Estádio fenológico</b>	<b>QM</b>	<b>ETr mm/dia</b>	<b>ETc VANT mm/dia</b>	<b>ETc L8 mm/dia</b>
Floração	9,49**	3,24a	2,40b	2,41b
1° fase de crescimento de baga	8,08**	3,21a	3,16a	2,39b
2° fase de crescimento de baga	10,77**	3,61a	3,19a	2,57c
Maturação dos frutos	70,20**	4,79a	2,33c	2,71b
<b>Média</b>	<b>1,58*</b>	<b>3.71a</b>	<b>2.77ab</b>	<b>2,52b</b>
<b>SUL</b>				
<b>Estádio fenológico</b>	<b>QM</b>	<b>ETr mm/dia</b>	<b>ETc VANT mm/dia</b>	<b>ETc L8 mm/dia</b>
Floração	14,82**	3,40a	2,54b	2,25c
1° fase de crescimento de baga	2,29**	3,17a	3,21a	2,80b
2° fase de crescimento de baga	9,84**	3,63a	3,27b	2,65c
Maturação dos frutos	81,66**	4,76a	2,22c	2,35b



				...continua
<b>Média</b>	1,66*	3,74a	2.81ab	2.5b

\*\*Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F, \* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F. Médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem estatisticamente em linha pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Elaborado pela autora.

### 6.3 Correlação do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) com o coeficiente de cultura (Kc)

O NDVI é um índice de vegetação amplamente utilizado para investigação da cobertura do dossel e das propriedades biofísicas da vegetação tais como biomassa e índice de área foliar. Considerando que os valores de Kc variam com as características edafoclimáticas da região, assim, com a cultura empregada e o seu estágio de desenvolvimento, pode-se afirmar que ele tem uma relação estreita com o NDVI por ser um índice que caracteriza bem as condições de ambiente e da vegetação.

Sendo assim, foi realizado uma correlação entre o Kc medido em campo e NDVI calculado por imagens de VANT, a fim de gerar uma equação para cálculo de Kc da videira por sensoriamento remoto, com um melhor ajuste e coeficiente de determinação. A relação encontrada por meio de uma regressão linear simples obteve um coeficiente de determinação igual a 94,95 % ( $R^2 = 0,9495$ ), representando assim um bom ajuste dos dados correlacionados (Figura 16).

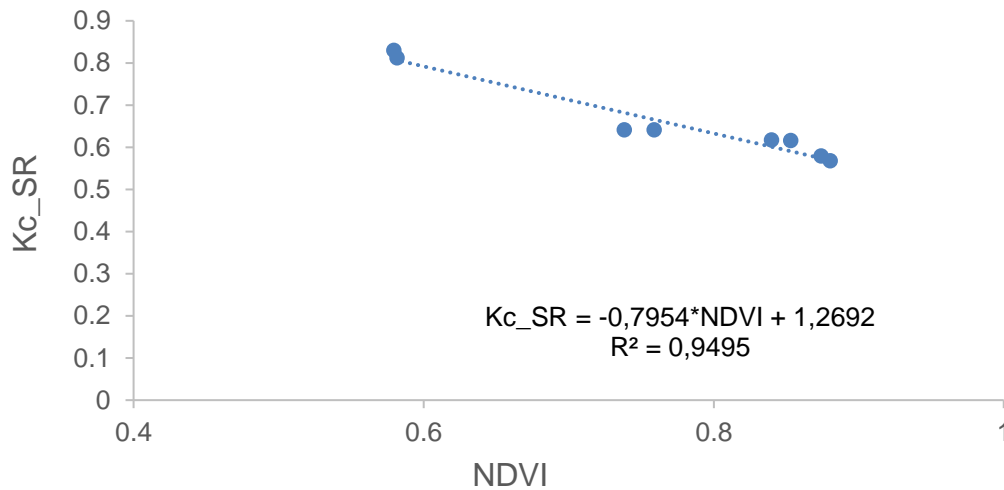
Mahmound e Gan (2019), usando um conjunto de dados ao longo do ciclo de diversas culturas, encontram correlações lineares entre Kc e NDVI para diversos cultivos agrícolas em estudo, inclusive, para cultivo da videira. Os autores encontram uma regressão linear simples ( $Kc = - 0,12 \cdot NDVI + 0,55$ ) para videira, com  $R^2 = 0,90$ .

A equação de regressão linear simples (Figura 16) é semelhante a equação encontrada para videira por Mahmound e Gan (2019), pois apresenta coeficiente angular negativo, contando-se que a relação entre Kc e NDVI para videira é uma relação decrescente, apresentando também um bom ajuste dos dados.

Apesar do  $R^2$  ter representado um bom ajuste, foi realizada um teste F de igualdade de variância para testar a significância da estatística a 5% de probabilidade. Ao mesmo tempo, foi realizado o cálculo do erro quadrado médio (MSE) e a raiz média quadrada dos erros (RMSE) para avaliação do modelo, encontrando um valor de,

respectivamente, 0,0001 e 0,01, demonstrando a curácia da equação encontrada (MAHMOUND; GAN, 2019).

**Figura 16** - Correlação entre os Kc medidos em campo e o NDVI calculado por meio de imagens de VANT



**Fonte:** Elaborado pela autora.

Os Kc\_SR encontrados nas fases de floração, 1º fase de crescimento de bagas e 2º fase de crescimento de bagas e maturação, são: 0,67, 0,60, 0,57 e 0,80, respectivamente. A equação encontrada expressa valores de Kc\_SR menores quando os valores de NDVI são maiores. Os NDVI calculados com imagens de drones nas fases de floração, 1º fase de desenvolvimento da baga e 2º fase de desenvolvimento da baga e maturação, foram de: 0,75, 0,87, 0,84 e 0,59, respectivamente.

O Boletim FAO 56 (ALLEN et al., 1998) recomenda um Kc de 0,7 na fase intermediária para videira destinada a vinho. Segundo os autores, esta fase intermediária vai do desenvolvimento vegetativo pleno até o início da maturação. Considerando que as fases analisadas nesta pesquisa (floração, 1º fase de crescimento de bagas, 2º fase de crescimento de bagas e maturação) são fases intermediárias, percebe-se que os Kc\_SR nas fases entre a floração e o desenvolvimento da baga são menores, já na fase de maturação este valor foi maior do que o proposto pela FAO.

Villagra et al. (2014) analisando Kc para videira por meio do método de Covariância de Vórtices Turbulentos, encontraram valores de Kc variando entre 0,8 a 1,10 nas fases intermediária. Constatando-se que os valores propostos pelo Boletim

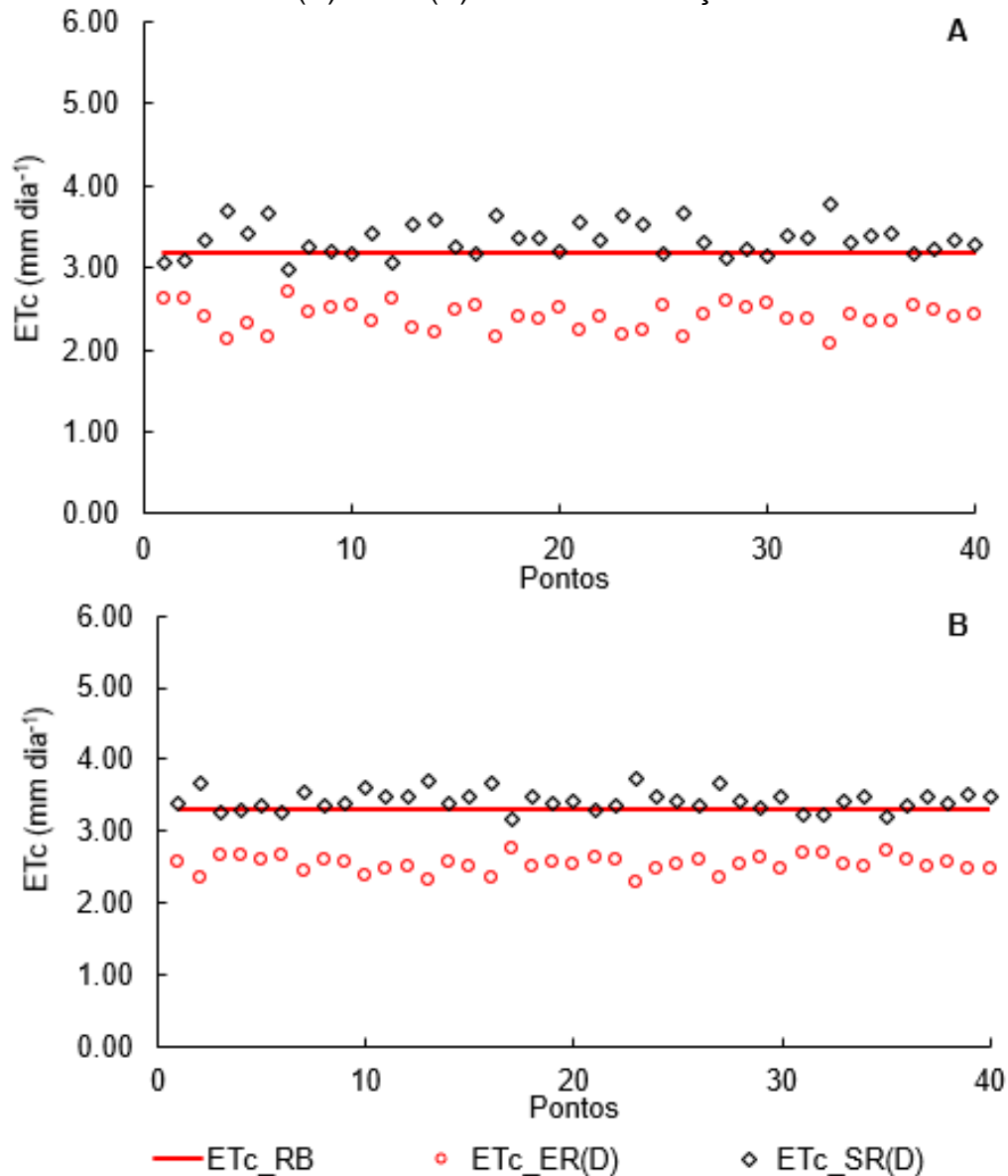
da FAO 56 subestimam os valores encontrados por meio de dados medidos em campo.

Utilizando a equação de regressão linear citada na Figura 16, foram calculados os valores de  $K_c$  e em seguida a evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ) para as fases em estudo, utilizando o produto do  $K_{c\_SR}$  pela  $ET_o$ . Após o cálculo foi realizado um gráfico de dispersão para observar a tendência que a  $ET_c$  possui, estimada por dados de sensoriamento remoto, em relação a  $ET_c$  calculada pela Covariância de Vórtices Turbulentos (Figura 17).

A evapotranspiração da cultura estimada pela equação de ER-RAKI et al. (2013) e pela equação gerada nesta pesquisa (Figura 16), foram nomeadas de  $ET_{c\_RE(D)}$  e  $ET_{c\_SR(D)}$ , respectivamente, ambas estimadas utilizando imagens de drone. Já a  $ET_c$  calculada pela Covariância de Vórtices Turbulentos foi nomeada de  $ET_{c\_RB}$ .

Na fase de floração, a  $ET_{c\_RB}$  foi de  $3,2 \text{ mm dia}^{-1}$ . Percebe-se que a  $ET_{c\_SR(D)}$  apresentou uma tendência similar a  $ET_{c\_RB}$ , pois foi estimada com o valor médio de  $3,4 \text{ mm dia}^{-1}$ , possuindo um aumento de aproximadamente de 6%. Já a  $ET_{c\_ER(D)}$  foi de  $2,5 \text{ mm dia}^{-1}$ , sendo 26,4% menor que a  $ET_{c\_RB(D)}$ .

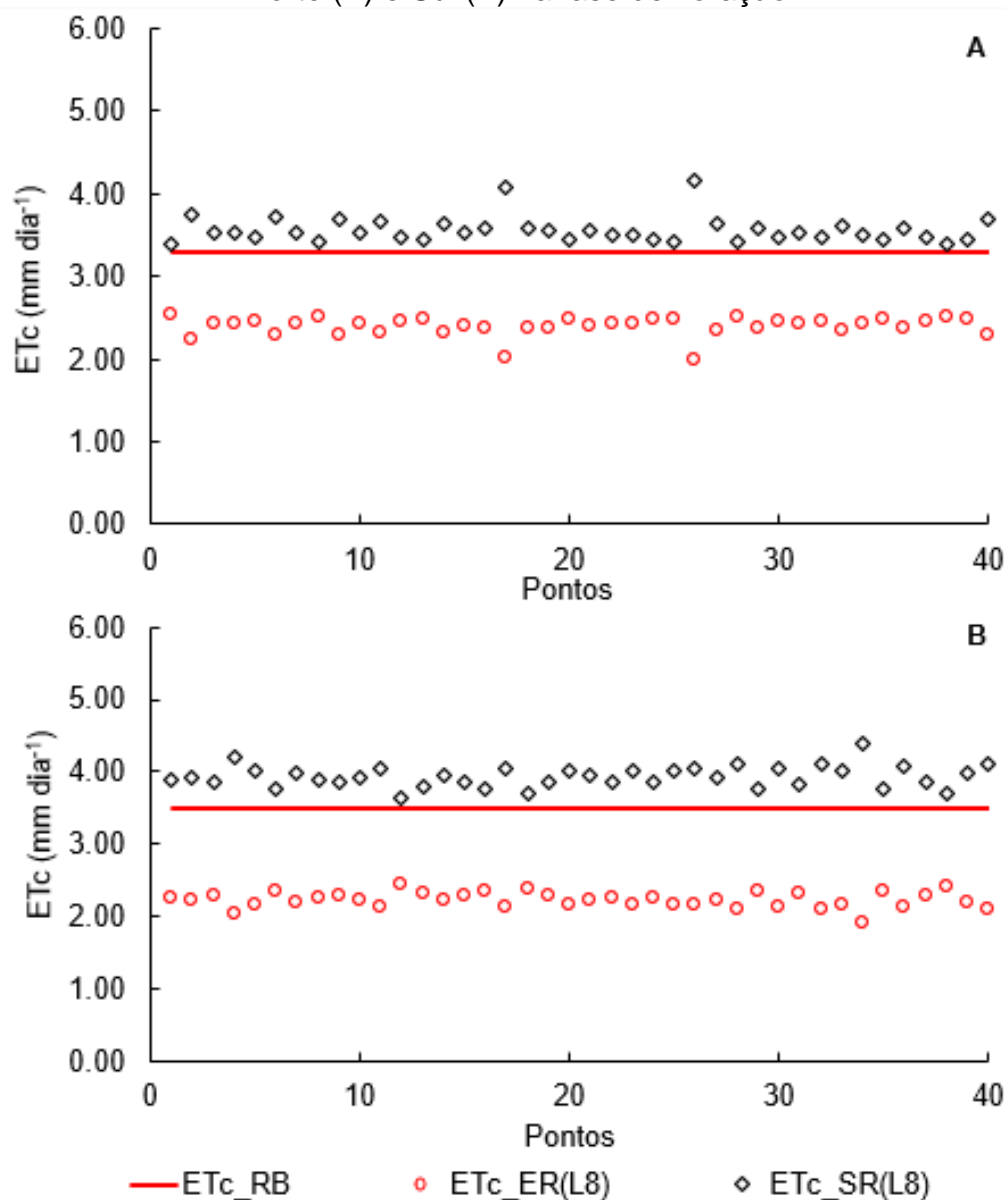
**Figura 17** - Comparação da evapotranspiração da cultura estimada pelos modelos de sensoriamento remoto por meio de VANT ( $ETc_{ER(D)}$  e  $ETc_{SR(D)}$ ) com a  $ETc$  calculada pela Coravariância de Vórtices Turbulentos ( $ETc_{RB}$ ) nas subáreas Norte (A) e Sul (B) na fase de floração



**Fonte:** Elaborado pela autora.

Considerando a  $ETc$  estimada por sensoriamento remoto com imagens de satélite (Figura 18), na fase de floração percebe-se a mesma tendência citada pelas imagens de drone (Figura 17). Porém a  $ETc_{ER(L8)}$  teve valores ainda menores do que as estimada por drone na mesma equação, tendo uma redução de 32,35%, pois o valor médio encontrado foi de 2,3 mm dia<sup>-1</sup>.

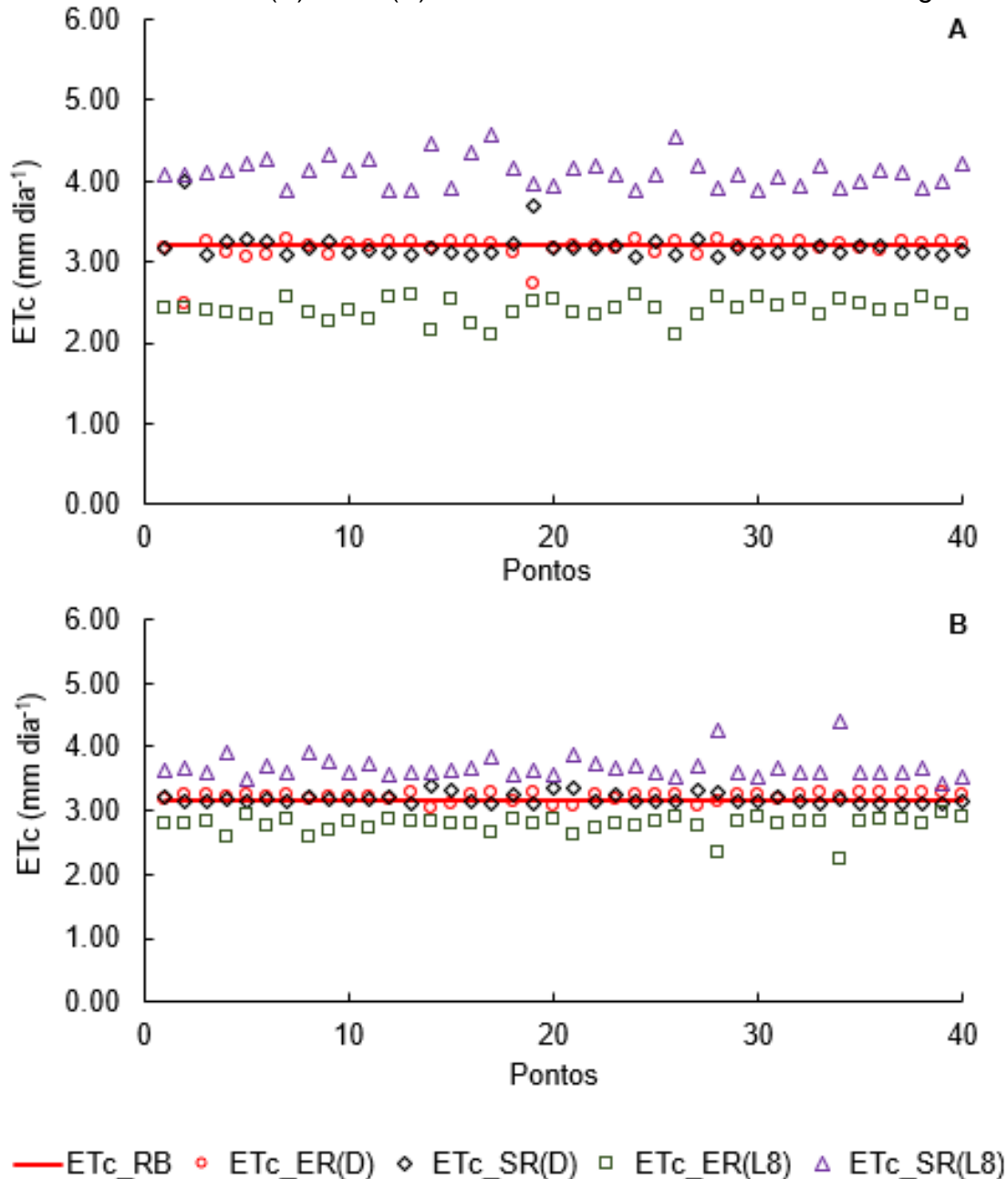
**Figura 18** - Comparação da evapotranspiração da cultura estimada pelos modelos de sensoriamento remoto por meio de satélite ( $ETc\_ER(L8)$  e  $ETc\_SR(L8)$ ) com a  $ETc$  calculada pela Corvariância de Vórtices Turbulentos ( $ETc\_RB$ ) nas subáreas Norte (A) e Sul (B) na fase de floração



**Fonte:** Elaborado pela autora.

Na 1<sup>o</sup> fase de desenvolvimento da baga (Figura 19), a  $ETc$  estimada por ambos os modelos com imagens de drone apresentou valores equivalentes ao da  $ETc\_RB$  ( $3,2 \text{ mm dia}^{-1}$ ). Já com as imagens de satélite, a  $ETc\_SR(L8)$  foi em média de  $3,9 \text{ mm dia}^{-1}$  e a  $ETc\_ER(L8)$  foi em média de  $2,6 \text{ mm dia}^{-1}$ , apresentando um aumento de 21,87% e uma redução de 18,75%, respectivamente.

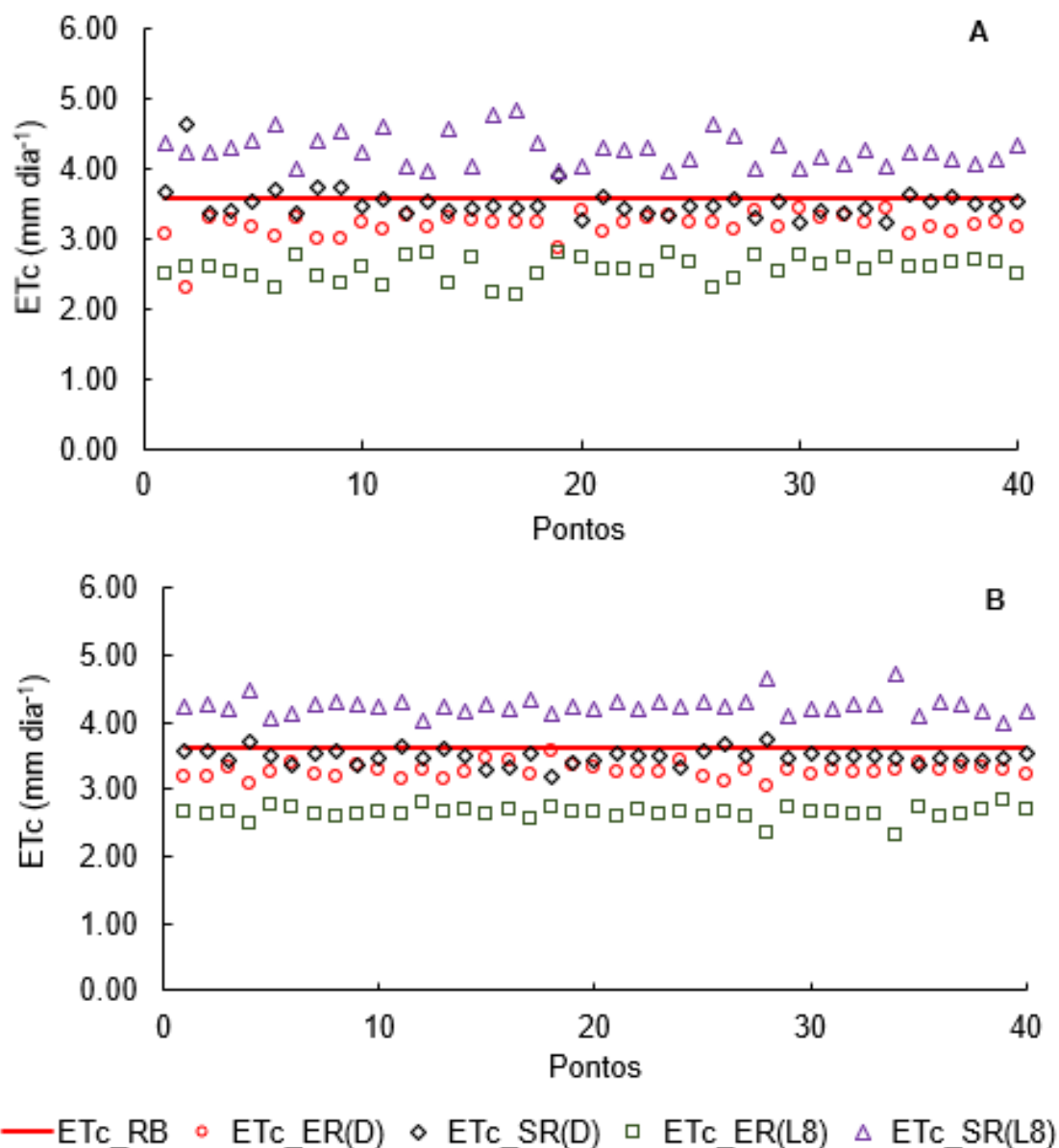
**Figura 19** - Comparação da evapotranspiração da cultura estimada pelos modelos de sensoriamento remoto ( $ETc_{ER(D)}$ ,  $ETc_{SR(D)}$ ,  $ETc_{ER(L8)}$  e  $ETc_{SR(L8)}$ ) com a  $ETc$  calculada pela Coravariância de Vórtices Turbulentos ( $ETc_{RB}$ ) nas subáreas Norte (A) e Sul (B) na 1ª fase de desenvolvimento da baga



**Fonte:** Elaborado pela autora.

Na segunda 2ª fase de desenvolvimento da baga (Figura 20) ocorreu uma tendência similar à fase anterior, em que a  $ETc$  estimada pelos modelos com imagens de satélite teve uma redução e um aumento em relação a  $ETc_{RB}$  quando foram utilizados os modelos de ER-RAKI et al. (2013) e o proposto por esta pesquisa, respectivamente.

**Figura 20** - Comparação da evapotranspiração da cultura estimada pelos modelos de sensoriamento remoto ( $ETc\_ER(D)$ ,  $ETc\_SR(D)$ ,  $ETc\_ER(L8)$  e  $ETc\_SR(L8)$ ) com a  $ETc$  calculada pela Coravariância de Vórtices Turbulentos ( $ETc\_RB$ ) nas subáreas Norte (A) e Sul (B) na 2ª fase de desenvolvimento da baga

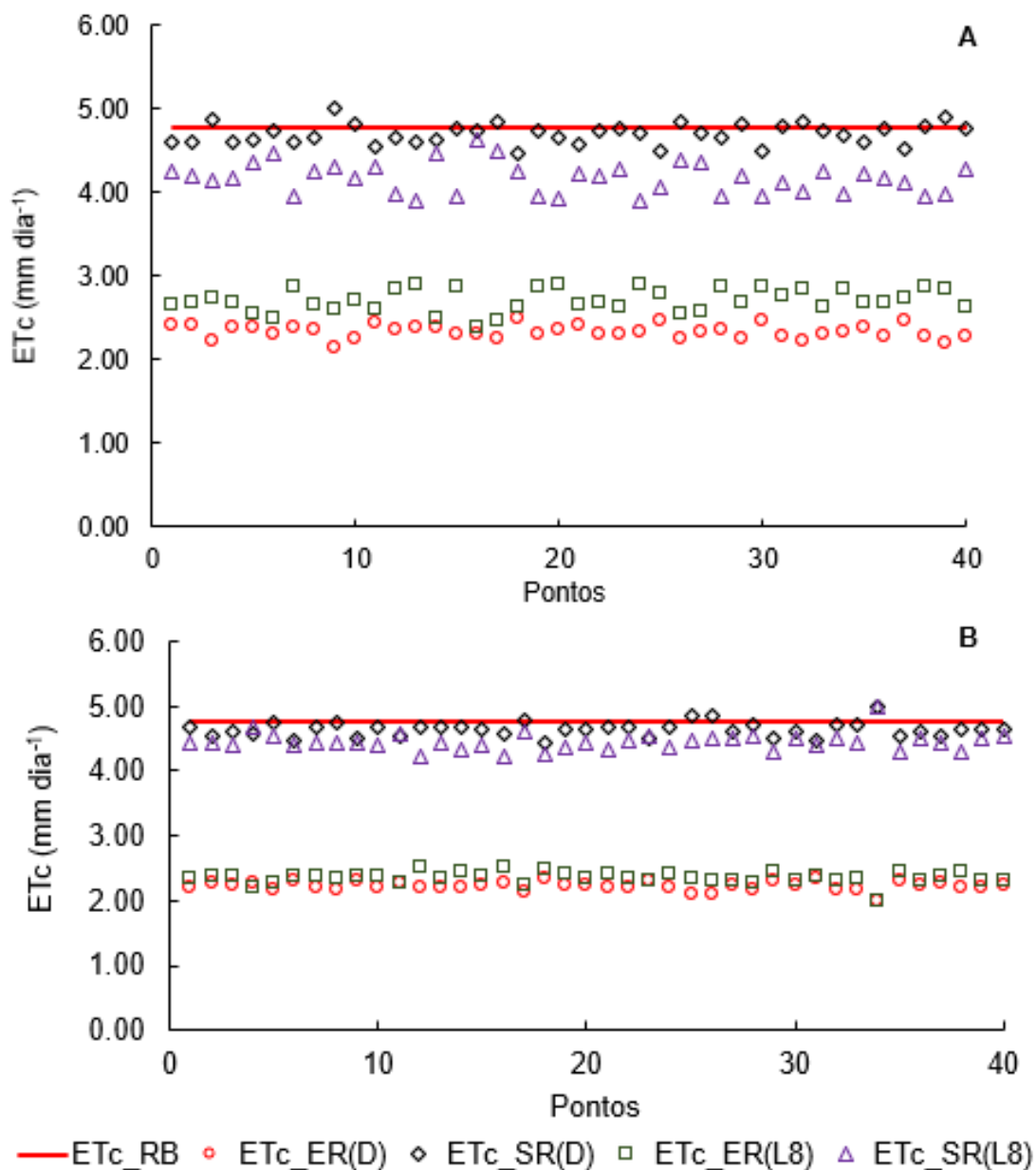


Fonte: Elaborado pela autora.

Em contrapartida ao utilizar as imagens de drone, a  $ETc\_SR$  e  $ETc\_ER$  apresentou valores próximos à  $ETc$  medida em campo. Porém, observa-se que o modelo proposto por esta pesquisa teve uma maior aproximação. Sendo os valores médios de  $ETc\_SR(D)$  e  $ETc\_ER(D)$  foram 3,5 mm dia<sup>-1</sup> e 3,2 mm dia<sup>-1</sup>, respectivamente, considerando que a  $ETc\_RB$  nesta fase foi de 3,6 mm dia<sup>-1</sup>.

Na fase de maturação dos frutos (Figura 21), o modelo que melhor se ajustou à  $ETc_{RB}$  foi o proposto por esta pesquisa, apresentando uma maior aproximação quando se utilizou as imagens de drone. Mas quando foi utilizada a equação exponencial percebeu-se que os valores de  $ETc$  estimado por sensoriamento remoto se distanciaram muito da  $ETc_{RB}$ , com as imagens de ambas plataformas.

**Figura 21** - Comparação da evapotranspiração da cultura estimada pelos modelos de sensoriamento remoto ( $ETc_{ER(D)}$ ,  $ETc_{SR(D)}$ ,  $ETc_{ER(L8)}$  e  $ETc_{SR(L8)}$ ) com a  $ETc$  calculada pela Corvariância de Vórtices Turbulentos ( $ETc_{RB}$ ) nas subáreas Norte (A) e Sul (B) na fase de maturação



Fonte: Elaborado pela autora.



A  $ETc_{SR}$ , na fase de maturação, foi de 4,7 e 4,2 mm dia<sup>-1</sup> calculada pelas imagens de drone e satélite, respectivamente. Esses valores foram próximos da  $ETc_{RB}$  que foi de 4,8 mm dia<sup>-1</sup>. Já os valores de  $ETc_{ER(D)}$  e  $ETc_{ER(L8)}$  foram de 2,33 e 2,7 mm dia<sup>-1</sup>, representando em média uma redução de 50% em relação a  $ETc_{RB}$  (Figura 19).

A  $ETc_{RB}$  medida em campo, na fase de maturação, apresentou um valor de 4,8 mm dia<sup>-1</sup>, sendo este valor maior que nas demais fases, podendo ser considerado alto, pois a cultura estava na fase de finalização do ciclo e possuindo parte das folhas amareladas, o que significa uma redução da clorofila e, conseqüentemente, da atividade fotossintética. Porém, nesta medição as temperaturas ainda estavam elevadas e coincidiu com uma irrigação, fazendo com que o solo estivesse mais úmido e, conseqüentemente, ocorresse uma maior evapotranspiração.

Em clima árido e semiárido pode ocorrer a variação da demanda atmosférica, não caracterizando uma demanda hídrica do atual estado da planta, pois existe variabilidade espacial e temporal das características climáticas, tais como: precipitação, temperatura e umidade (CAMARGO et al., 2012)

Pereira et al. (2016), avaliando o uso da eficiência da água em videiras, encontraram evapotranspiração da cultura em média de 3,1, 3,9 e 2,4 mm dia<sup>-1</sup> nas fases de floração, maturação e colheita, respectivamente. Diante disso, observa-se que as fases de floração e maturação, corroboram com os resultados desta pesquisa, onde foram encontrados valores médios de 3,4 e 3,9 mm dia<sup>-1</sup>, nas fases supracitadas. Porém, os resultados encontrados entre as fases de maturação e colheita não condizem com os resultados encontrados por Pereira et al. (2016).

Texeira, Bastiaanssen e Bassoi (2007) relatam que a idade do vinhedo, os tipos de solo, diferentes sistemas de irrigação e manejo de água podem acarretar diferenças na  $ETc$  observadas em diferentes estudos.

#### **6.4 Avaliação do desempenho dos modelos $ETc_{SR}$ e $ETc_{ER}$**

O desempenho dos modelos  $ETc_{SR}$  e  $ETc_{ER}$  foi avaliado para a estimativa da evapotranspiração real da videira em função da evapotranspiração diária calculada pela Covariância de Vórtices Turbulentos.

Os indicadores estatísticos  $rMBE$ ,  $rRMSE$  e  $d$  de Willmott, obtidos da validação dos valores estimados de  $ET_c$ , estão apresentados na Tabela 10 e 11, sendo utilizado o teste  $t$  a 5% de probabilidade.

O resultado obtido  $rMBE$  (Tabela 11 e 12), utilizando imagens de drone, mostra que a equação proposta por esta pesquisa (Figura 14) subestima a evapotranspiração da cultura em 0,14 e 0,74% ( $0,005 \text{ mm dia}^{-1}$  e  $0,338 \text{ mm dia}^{-1}$ ) nas subáreas norte e sul, respectivamente. Similarmente, a equação 5 subestima os valores de  $ET_r$ , porém, a subestimação com este modelo ( $Kc\_NDVI = 0,1808e^{1,3138*NDVI}$ ) é maior, apresentando uma subestimação de 25,01 e 24,36 % nas subáreas norte e sul, respectivamente. Estes valores de subestimação correspondem a  $0,925$  e  $0,905 \text{ mm dia}^{-1}$ , aproximadamente uma subestimação de  $1,0 \text{ mm dia}^{-1}$ .

**Tabela 10** - Indicadores de desempenho para subárea Norte

Drone					
Modelos	MBE ( $\text{mm dia}^{-1}$ )	$rMBE$ (%)	RMSE ( $\text{mm dia}^{-1}$ )	$rRMSE$ (%)	$d$ (-)
$ET_c\_ER^*$	-0.925	-25.017	1.307	35.361	0.363
$ET_c\_SR^{**}$	-0.005	-0.135	0.105	2.830	0.993
Satélite					
Modelos	MBE ( $\text{mm dia}^{-1}$ )	$rMBE$ (%)	RMSE ( $\text{mm dia}^{-1}$ )	$rRMSE$ (%)	$d$ (-)
$ET_c\_ER^*$	-1.175	-31.778	1.290	34.875	0.457
$ET_c\_SR^{**}$	0.338	9.128	0.669	18.087	0.572

\* estimada utilizando o  $Kc$  calculado pelo modelo de Er-Raki et al. (2013) (Equação 5); \*\* estimada utilizando  $Kc$  calculado pelo modelo proposto por esta pesquisa (Figura 14).

Fonte: Elaborado pela autora.

**Tabela 11** - Indicadores de desempenho para subárea Sul

Drone					
Modelos	MBE ( $\text{mm dia}^{-1}$ )	$rMBE$ (%)	RMSE ( $\text{mm dia}^{-1}$ )	$rRMSE$ (%)	$d$ (-)
$ET_c\_ER^*$	-0.905	-24.361	1.338	36.015	0.309
$ET_c\_SR^{**}$	-0.028	-0.740	0.110	2.970	0.991
Satélite					
Modelos	MBE ( $\text{mm dia}^{-1}$ )	$rMBE$ (%)	RMSE ( $\text{mm dia}^{-1}$ )	$rRMSE$ (%)	$d$ (-)
$ET_c\_ER$	-1.265	-33.599	1.463	38.852	0.349
$ET_c\_SR$	0.318	8.433	0.482	12.794	0.762

\*estimada utilizando o  $Kc$  calculado pelo modelo de Er-Raki et al. (2013) (Equação 5); \*\*estimada utilizando  $Kc$  calculado pelo modelo proposto por esta pesquisa (Figura 14).

Fonte: Elaborado pela autora.

Ao analisar os modelos, quando foram utilizadas imagens de satélites, percebeu-se que o modelo proposto por esta pesquisa possui uma menor subestimação do que o modelo  $Kc\_NDVI = 0,1808e^{1,3138*NDVI}$  (Equação 5), pois a subestimação foi apenas de 9,12 e 8,43% nas subáreas norte e sul, respectivamente. Em contrapartida, a subestimação do modelo da equação 5 foi de 33,59 e 31,77% nas subáreas supracitadas.

Knipper et al. (2018) analisando o uso de imagens de satélite com resolução de 30 m para estimativa de  $ET_c$  e comparação com a  $ET_c$  medida pela Covariância de Vórtices Turbulentos, indicam um desempenho razoável do modelo, com erro absoluto médio de  $0,6 \text{ mm dia}^{-1}$ , cerca de 17% de subestimação do valor observado. Porém, os autores salientam que este mapeamento da  $ET_c$  feito por sensoriamento remoto pode ser utilizado para o gerenciamento da irrigação, desde que ocorra uma melhoria espacial e temporal das imagens utilizadas.

Os resultados obtidos para rRMSE mostram que o espalhamento com a equação 5 é maior do que o espalhamento com a equação proposta por esta pesquisa. Este maior espalhamento é observado em ambas as subáreas e ambas as  $ET_c$  estimadas com as imagens de drone e satélite.

Utilizando a escala classificatória para diferentes intervalos de rRMSE para avaliar a acúrcia dos modelos proposto por Jamieson et al. (1991), percebe-se que o rRMSE, do modelo que estimou a  $ET_c\_ER$ , varia de 34,875 a 38,852%, sendo classificado para os dados desta pesquisa como um modelo pobre, pois possui  $rRMSE \geq 30\%$ .

Já o rRMSE encontrado pelo modelo proposto por esta pesquisa foi de 2,830 e 2,970%, com imagens de drone, sendo considerado um modelo excelente. E para uso do modelo com imagens de satélite, o rRMSE foi de 18,087 e 12,794% nas subáreas norte e sul, respectivamente, sendo considerado um modelo bom, pois o rRMSE estar no intervalo entre 10 a 20%.

O índice de concordância  $d$  de Willmott indica a exatidão do modelo avaliado, ou seja, quanto mais próximo de 1 mais exato é o modelo em relação aos dados comparados medidos de campo. Percebe-se na Tabela 11 e 12 que o modelo de estimativa da  $ET_c$  proposto por esta pesquisa ( $ET_c\_SR$ ) possui valores próximo de 1 (0,993 e 0,991), quando foi utilizado imagens de drone. Em contrapartida, quando se

utilizou imagens de satélites o índice apresentou um menor valor nas duas subáreas (0,572 e 0,762).

Assim, percebe-se que mesmo o modelo sendo considerado como um modelo excelente, com exatidão aceitável e baixa subestimação ou superestimação, é importante avaliar o tipo de plataforma que irá coletar as imagens que serão utilizadas para o cálculo de NDVI e, posteriormente, a estimativa da ETc. Este fato pode ser explicado pela qualidade da resolução das imagens obtidas pelos diferentes sensores.

Lopes (2018) avaliando modelos de sensoriamento remoto para estimativa da evapotranspiração real encontra bom desempenho dos modelos, sendo considerado resultados satisfatórios.

A metodologia de sensoriamento remoto é viável para a estimativa da evapotranspiração da cultura em diferentes classes de uso e cobertura da terra, sendo considerada sensível para o discernimento da demanda hídrica em diferentes condições climáticas (PETER et al., 2017).

O manejo da irrigação e o diagnóstico da quantidade necessária de água para uma determinada área de cultivo podem ser estimados pela combinação de sensoriamento remoto com estações agrometeorológicas para auxiliar o produtor nas decisões, obtendo-se resultados satisfatórios no planejamento e gestão da atividade agrícola (SALES, 2016).

Imagens aéreas de alta resolução, tais como as de veículo aéreo não tripulado, podem ser incorporadas aos estudos de estresse hídrico em videiras, em períodos críticos de estágio de desenvolvimento para auxílio do manejo da irrigação, alcançando metas de uniformidade e maiores rendimentos. E, igualmente, podem ser incorporadas para o monitoramento da perda de água evapotranspirativa em escala regional de sistemas de produção agrícola, especialmente em regiões com recursos hídricos limitados (KNIPPER et al., 2018).

## 7 CONCLUSÕES

O resultado deste trabalho mostrou que a resolução influencia nos valores dos índices vegetativos e, conseqüentemente, nos parâmetros que podem ser estimados por eles, mostrando assim que as imagens capturadas por VANT expressam valores mais próximos do real em uma escala temporal mais satisfatória para o uso no manejo da irrigação do que as imagens capturadas por satélite.

O NDVI calculado por imagens capturadas por VANT permite a estimativa de coeficientes de cultivo de forma eficiente, pois na comparação com os Kc propostos pela FAO foi observado um padrão semelhante. Desta forma, o Kc<sub>NDVI</sub> pode ser utilizado para estimar a ET<sub>c</sub> das culturas, por meio do produto com a evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>).

A equação obtida por esta pesquisa, para o cálculo do coeficiente de cultura da videira irrigada em função do NDVI,  $Kc_{SR} = - 0,7954 * NDVI + 1,2692$ , apresentou um excelente ajuste ( $R^2 = 0,94$ ), sendo considerada uma equação com exatidão ( $d = 0,99$ ) quando é utilizado imagens de VANT.

Sendo assim o modelo proposto por esta pesquisa, consegue estimar a ET<sub>c</sub> por meio de sensoriamento remoto, apresentando resultados satisfatórios quando comparados com a ET<sub>c</sub> medida pela Covariância de Vórtices Turbulentos. Assim, constatando-se que o modelo pode ser utilizado para cálculo de demanda hídrica da cultura da videira com um desempenho satisfatório.

Vale salientar que é preciso a validação deste modelo em outras localidades para que seja verificado a sua acurácia em ambientes que possuam condições climáticas diferentes das condições locais onde foi realizada a pesquisa.



## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Atlas Irrigação: uso da água na agricultura irrigada**. Brasília, ANA. 86 p. 2017.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil informe 2018**. Brasília, 2018. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/portal/publicacao/Conjuntura2018.pdf>. Acesso em: 03 ago.2019.
- AGENCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (Brasil). **Regulamentação da ANAC sobre drones completa um ano em vigor**. 2018. Disponível em: <http://www.anac.gov.br/noticias/2018/regulamentacao-da-anac-sobre-drones-completa-um-ano-em-vigor>. Acesso em: 20 de mar. 2019.
- AGENCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (Brasil). **Regulamento Brasileiro da Aviação Civil Especial (RBAC-E nº 94)**: Requisitos gerais para aeronaves não tripuladas de uso civil. SAR/SPO. 2017.
- AGGIEAIR. **História**. Disponível em: <https://aggieair.usu.edu/about/history>. Acesso em: 12 mar. 2019.
- ALLEN, R. G. **REF-ET: Reference evapotranspiration calculator, Version 4.1.22**. Utah State: University Idaho, 2016.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements** - FAO Irrigation and Drainage paper 56. Rome, 297p. (1998).
- ALVES, E. S.; LIMA, D. F.; BARRETOS, J. A. S.; SANTOS, D. P.; SANTOS, M. A. L. Determinação do coeficiente de cultivo para a cultura do rabanete através de lisimetria de drenagem. **Irriga**, Botucatu, v. 22, n. 1, p. 194-203, 2017.
- BACK, A. J. Variação da evapotranspiração de referência calculada em diferentes intervalos de tempo. **Revista de Engenharia Agrícola**, v.27, n.1, p.139-145. 2007.
- BADR, G. et al. Estimating Growing Season Length Using Vegetation Indices Based on Remote Sensing: A Case Study for Vineyards in Washington State. **Transactions of the ASABE**, [s. l.], v. 58, p. 551–564, 2015.
- BEM, B. P.; BOGO, A.; EVERHART, S.; CASA, R. T.; GONÇALVES, M. J.; MARCON FILHO, J. L.; CUNHA, I. C. Effect of Y-trellis and vertical shoot positioning training systems on downy mildew and botrytis bunch rot of grape in highlands of southern Brazil. **Scientia Horticulturae**, v. 185, p. 162-166, 2015.
- BEZERRA, B. G. **Balanco de energia e evapotranspiração em áreas com diferentes tipos de cobertura de solo no cariri cearense através do algoritmo SEBAL**. 2006. 127 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2006.

BUCENE, L.C. **Classificação de terras para irrigação utilizando um sistema de informações geográficas em Botucatu – SP**. 2002. 185 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista. Botucatu, 2002.

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

CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. Conceitos básicos em ciência da geoinformação. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos. INPE, 2001. Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/sergio/2004/04.22.07.43>. Acesso em: 15 fev. 2019.

CAMARGO, U. A.; MANDELLI, F.; CONCEICAO, M. A. F.; TONIETTO, J. Grapevine performance and production strategies in tropical climates. **Asian Journal of Food and Agro-Industry**, Bangkok, v. 5, p. 257-269, 2012.

CAMPOS, I.; NEALE, C. M.; CALERA, A.; BALBONTÍN, C.; GONZÁLEZ-PIQUERAS, J. Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (*Vitis vinifera* L.). **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 98, n. 1, p. 45–54, 2010.

CASTAÑEDA-IBÁÑEZ, C. R. et al. Estimación de coeficientes de cultivo mediante sensores remotos en el distrito de riego Río Yaqui, Sonora, México. **Agrociencia**, [s. l.], v. 49, n. 2, p. 221–232, 2015.

CASTRO, A. I.; SIX, J.; PLANT, R. E.; PEÑA, J. M. Mapping Crop Calendar Events and Phenology-Related Metrics at the Parcel Level by Object-Based Image Analysis (OBIA) of MODIS-NDVI Time-Series: A Case Study in Central California. **Remote Sens**. v. 10, 2018.

CHAVEZ, P. S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, [s. l.], v. 24, n. 3, p. 459–479, 1988.

CHUVIECO, E. **Teledetección ambiental: la observación de la tierra desde el espacio**. Barcelona: Ariel Ciencia, 2002. 568 p.

CORDÃO, M. A.; ARAÚJO, W. P.; PEREIRA, J. R.; ZONTA, J. H.; LIMAS, R. F.; FERREIRA, F. N. Cultivares de algodoeiro herbáceo sob déficit hídrico aplicado em fases fenológicas. **Revista Verde**. Pombal – PB. v. 13, n.3, p.313-321, 2018.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome: FAO,1977. 179p.

ER-RAKI, S. et al. Determination of crop evapotranspiration of table grapes in a semi-arid region of Northwest Mexico using multi-spectral vegetation index. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 122, p. 12–19, 2013.

FERRER, M.; ECHEVERRÍA, G; GONZALEZ-NEVES, G. Influence of the Microclimate Defined by the Training System on the Vineyard Behaviour and the



Oenological Quality of Merlot Grapes. **International Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources**. v. 2, n. 4, p. 95-108, 2015.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em sensoriamento remoto**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 128 p. Disponível em: [http://books.google.com.br/books/about/Inicia%C3%A7%C3%A3o\\_em\\_Sensoriamento\\_Remoto.html?hl=pt-BR&id=18GkH5X81XcC](http://books.google.com.br/books/about/Inicia%C3%A7%C3%A3o_em_Sensoriamento_Remoto.html?hl=pt-BR&id=18GkH5X81XcC). Acesso em: 15 mar. 2019.

GIOVANNINI, E. **Manual de Viticultura**. Porto Alegre: Bookman Editora LTDA, 2014. 255 p.

GLENN, E.P.; NEALE, C.M.U.; HUNSAKER, D.J.; NAGLER, P.L. **Vegetation index-based crop coefficients to estimate evapotranspiration by remote sensing in agricultural and natural ecosystems**. *Hydrol. Process.* 2011, 25, 4050–4062.

GLOBO RURAL. **Parceria visa desenvolver drones para agricultura de precisão**. 2018. Disponível em: <https://revistagloborural.globo.com/Noticias/Pesquisa-e-Tecnologia/noticia/2016/06/parceria-visa-desenvolver-drones-para-agricultura-de-precisao.html>. Acesso em: 12 mar. 2019.

GRIESSER, M.; WEINGART, G.; SHOEDL-HUMMEL, K.; NEUMANN, N.; BECKER, M.; VARMUZA, K.; LIEBNER, F.; SCHUHMACHER, R.; FORNECK, A. Severe drought stress is affecting selected primary metabolites, polyphenols, and volatile metabolites in grapevine leaves (*Vitis vinifera* cv. Pinot noir). **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 88, p. 17-26, 2015.

GUIMARÃES JÚNIOR, S. A. M. **Avaliação por geoprocessamento das áreas de preservação permanente hídricas, no município de Maceió, Alagoas – Brasil: uso da terra, cobertura vegetal, impactos ambientais e vulnerabilidade social**. 2016. 148 f. Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Geografia do Instituto de Geografia, Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2016.

HEINEMANN et al. Sensitivity of APSIM/ORYZA model due to estimation errors in solar radiation. **Bragantia**, Campinas, v. 71, n. 4, p.572-582, 2012.

INSTITUTO DE AERONÁUTICA E ESPAÇO – IAE. Decolagem e Pousos Automáticos (DPA-VANT). 2018. Disponível em: <http://www.iae.cta.br/index.php/aeronautica/dpa-vant>. Acesso em 12 de mar. 2019.

JAMIESON, P. D.; PORTER, J. R.; WILSON, D. R. A test of the computer simulation model ARC - WHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. **Field Crops Research**, v.27, p. 337-350, 1991.

JUNGES, A. H. et al. Normalized difference vegetation index obtained by ground-based remote sensing to characterize vine cycle in Rio Grande do Sul, Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, [s. l.], v. 41, n. 5, p. 543–553, 2017.

KAKHA, T.; GORODETSKY, A. Review of Unmanned Aerial System (UAS) applications in the built environment: Towards automated building inspection procedures using drones [online]. **College Park**: Elsevier. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.002>. Acesso em: 16 mar. 2019.

KAMBLE, B.; KILIC, A.; HUBBARD, K. Estimating Crop Coefficients Using Remote Sensing-Based Vegetation Index. **Remote Sensing**, [s. l.], v. 5, n. 4, p. 1588–1602, 2013.

KIST, B. B.; CARVALHO, C.; TREICHEL, M.; SANTOS, C. V. Anuário brasileiro da fruticultura. Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz, 2018. 88 p.

KNEIPP, R. B. **O estado da arte na utilização de drones para inspeção naval e offshore**. 2018. 67 f. Projeto de graduação, Curso de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica– Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2018.

KNIPPER, K. R.; KUSTAS, W. P.; ANDERSON, M. C.; ALFIERI, J. G.; PRUEGER, J. H.; HAINS, C. R.; GAO, F.; YANG, Y.; MCKEE, L. G.; NIETO, H.; HIPPS, L. E.; ALSINA, M. M.; SANCHEZ, L. Evapotranspiration estimates derived using thermal-based satellite remote sensing and data fusion for irrigation management in California vineyards. **Irrigation Science**. Ed. Springer Berlin Heidelberg. 2018.

KUSTA, et al. The grape remote sensing atmospheric profile and evapotranspiration experimente. **Bulletin of the American Meteorological Society**, Boston, v. 99, n. 9, p. 1791-1812, 2018.

KUZNETSOV, V. D.; SINELNIKOV, V. M.; ALPERT, S. N. Yakov Alpert: Sputnik-1 and the first satellite ionospheric experimente. **Advances in Space Research**. v. 55, ed. 12, p. 2833-2839, 2015.

LAABOUDI, A.; ALLAOUA, C.; BALLAGUE, D.; SBARGOUD, S.; METERFI, J.; HERDA, F. Crop coefficient and water requirement for wheat (*Triticum aestivum*) in different climate regimes of Algeria. **International Journal of Agricultural Policy and Research**, v. 3, n. 8, p. 328–336, 2015.

LI, M.; TANG, P.; WU, W.; LIU, H. General models for estimating daily global solar radiation for different solar radiation zones in mainland China. **Energy Conversion and Management**, v. 70, p. 139-148, 2013.

LIU, M.-Y.; CHI, M.; TANG, Y.-H.; SONG, C.-Z.; XI, Z.-M.; ZHANG, Z.-W. Effect of three training systems on grapes in a wet region of China: Yield, incidence of disease and anthocyanin compositions of vitis vinifera cv. Cabernet Sauvignon. **Molecules**, v. 20, p. 18967-18987, 2015.

LIU, W. T. H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. Campo Grande: Ed. UNIDERP, 2007. 881 p.

LOPES, J. D. **Avaliação e aprimoramento de métodos para estimativa da evapotranspiração real por sensoriamento remoto**. 2018. 79 p. Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa – MG. 2018.

LORENZZETTI, J. A. **Princípios físicos de sensoriamento remoto**. 293 p. São Paulo: Blucher, 2015.

MAHMOUD, S. H.; GAN, T. Y. Irrigation water management in arid regions of Middle East: Assessing spatio-temporal variation of actual evapotranspiration through remote sensing techniques and meteorological data. **Agricultural Water Management**. v. 212, p. 35–47, 2019.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: princípios e métodos**. 3.ed.. Viçosa: Ed. UFV, 2009. 325 p.

MATEOS, L. et al. Monitoring evapotranspiration of irrigated crops using crop coefficients derived from time series of satellite images. I. Method validation. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 125, p.81-91, jul. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2012.11.005>.

MAUGHAN, T.; BLACK, B.; ALLEN, L. N.; DROST, D.; CARDON, G. Grape Irrigation. **Horticulture – Grapes**. EUA. 2017. Disponível em: <https://extension.usu.edu/yardandgarden/ou-files/Grape-Irrigation.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2018.

MELLO, L. M. R. **O Brasil no Contexto do Mercado Vitivinícola Mundial: panorama 2015**. Bento Gonzalvez, Empraba Uva e Vinho. Comunicado Técnico 192. 2016.

MENEGUZZO, J. **Caracterização físico-química e sensorial dos vinhos espumantes da Serra Gaúcha**. 2010. 89 f. Tese de doutorado. Programa de Pós-graduação em Biotecnologia. Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, 2010.

NASCIMENTO, V. F.; FEITOSA, E. O.; SOARES, J. I. Uniformidade de distribuição de um sistema de irrigação por aspersão via pivô central. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia-MS, v. 4, n. 4, p. 65-69, dez. 2017.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION – NASA . **Landsat Data Continuity Mission**. 2013. p. 16. Disponível em: [https://www.nasa.gov/pdf/723395main\\_LDCMpresskit2013-final.pdf](https://www.nasa.gov/pdf/723395main_LDCMpresskit2013-final.pdf) Acesso em: 15 mar. 2019.

NOVO, E. M. L. D. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4. ed. rev. São Paulo: E. Blucher, 2010. 387 p.

OLIVEIRA, F. S. Os conceitos água virtual e pegada hídrica no cenário brasileiro. *In*: GUERRA, J. B. S. O. A. et al. (Coord.). **Links 2015: os elos entre os consumos de água, energia e alimentos, no contexto das estratégias de mitigação das mudanças climáticas**. Palhoça: Ed. Unisul, 2016. p. 27-44.

OLIVEIRA, T. C. D. **Variação temporal dos índices de vegetação da soja e cana-de-açúcar e obtenção do coeficiente de cultura (kc) a partir do NDVI**. 2014. 145 f. Dissertação, Programa de Pós - Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG, 2014.

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

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

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Meteorologia Agrícola**. Edição revisada e ampliada, Piracicaba: USP, 2007. 191 p.

PEREIRA, L. S.; SILVA, D. O.; PAMBOUKIAN, S. V. D. Sensoriamento remoto aplicado à agricultura de precisão no cultivo de bambu. **Revista Mackenzie de Engenharia e Computação**. UPM, São Paulo. V. 16, n. 1, p. 8-33, 2016.

PEREIRA, R. A. A. **Balanço de energia, consumo hídrico e coeficiente de cultivo do trigo no sudeste brasileiro**. 2018. 96 f. Dissertação, Programa de Pós-graduação Engenharia de Sistemas Agrícolas – USP, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 96 p. Piracicaba, 2018.

PEREIRA, V. C.; SEDIYAMA, G. C.; MOURA, S. B.; SILVA, T. G. F.; SOUZA, L. S. B. S. Eficiência do uso da água em videira ‘syrah’ irrigada no submédio do Vale São Francisco. **Irriga**, Botucatu, v. 21, n. 2, 2016.

PETER, A. R.; RUHOFF, A. L.; SILVA, B. B.; ROBERTI, D. R.; BREYER, L. M.; SANTOS, R. P. Monitoramento da evapotranspiração por sensoriamento remoto em áreas de agricultura irrigada no Brasil. *In*: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos 20., 2017. Florianópolis. **Anais** [...] Florianópolis, SC, 2017.

PONZONE, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento Remoto da Vegetação**. 2. Ed. São Paulo: Oficina de Texto, p. 176. 2012. Disponível em: [https://books.google.com.br/books?id=pEHGCgAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=Sensoriamento+Remoto+da+Vegeta%C3%A7%C3%A3o&hl=pt-BR&sa=X&ved=0ahUKEwjn\\_dPc75XhAhVUEbkGHdbNBbsQ6AEIKTAA#v=onepage&q=Sensoriamento%20Remoto%20da%20Vegeta%C3%A7%C3%A3o&f=false](https://books.google.com.br/books?id=pEHGCgAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=Sensoriamento+Remoto+da+Vegeta%C3%A7%C3%A3o&hl=pt-BR&sa=X&ved=0ahUKEwjn_dPc75XhAhVUEbkGHdbNBbsQ6AEIKTAA#v=onepage&q=Sensoriamento%20Remoto%20da%20Vegeta%C3%A7%C3%A3o&f=false). Acesso em: 15 mar. 2019.

PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.E.; KUPLICH, T.M. **Sensoriamento Remoto da Vegetação**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, v. 1, 2012. 176 p.

QUEIROZ-VOLTAN, R. B.; SOUZA ROLIM, G.; PEDRO JUNIOR, M. J.; HERNANDES, J. L. Variações na anatomia foliar de videira Niagara em diferentes sistemas de condução. **Bragantia**. v.70, n.3, p. 488-493, 2011.

RAHMANI, M., BAKHSHI, D.; QOLOV, M. Impact of pruning severity and training systems on red and white seedless table grape (*Vitis vinifera*) qualitative indices. **Australian Journal of Crop Science**, v. 9, p. 55-61, 2015.

RODRIGUES, A. A. **Uso de veículos aéreos não tripulados para mapeamento e avaliação de erosão urbana**. 2016. 136 f. Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Geografia do Instituto de Estudos Socioambientais - Universidade Federal de Goiás. Goiânia. 2016.

ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *In*: Third ERTS Symposium, **Proceedings**, NASA SP-351, NASA, Washington, DC, v. 1, p. 309-317, 1973.

RUHOFF, A. L.; ARAGÃO, L. E.; COLLISCHONN, W.; ROCHA, H. R.; UM, Q.; RUNNING, S. MOD16: Desafios e limitações para a estimativa global de

evapotranspiração. *In: Simpósio brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, 15., 2011, Curitiba. Anais [...].* Curitiba – PR: INPE, 2011. p. 5124-1531.

SALES, D. L. A. **Evapotranspiração e coeficiente de cultura do tomateiro industrial estimado por sensoriamento utilizando o algoritmo SAFER.** 2016. 65 f. Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Universidade Federal de Goiás. Goiânia – GO. 2016.

SILVA, B. B.; LOPES, G. M.; AZEVEDO P. V. Determinação do albedo de áreas irrigadas com base em imagens Landsat 5-TM. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 13, n. 2, p. 11-21, 2005a.

SILVA, B. B.; LOPES, G. M.; AZEVEDO P. V. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5-TM. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 20, n. 2, p. 243 – 252, 2005b.

SILVA, B. B.; BEZERRA, M. V. C. Determinação dos fluxos de calor sensível e latente na superfície utilizando imagens TM – Landsat 5. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. v. 14, n. 2, p.174-186, 2006.

SILVA, D. C.; TOONSTRA, G. W. A.; SOUZA, H. L. S.; PEREIRA, T. A. J. Qualidade de ortomosaicos de imagens de VANT processados com os softwares APS, PIX4D e PHOTOSCAN. **V Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação.** Recife – PE. 2014.

SOUZA, B. D. O. **Estimativa da demanda hídrica potencial na irrigação por pivô central na bacia do rio urucuia utilizando índice de vegetação NDVI.** 2016. 89 f. Dissertação, Programa de Pós - Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG, 2016.

SOUZA, J. D. E SILVA, B. B. Correção atmosférica para temperatura da superfície obtida com imagem TM – Landsat 5. **Revista Brasileira de Geofísica**, v.23, n 4, p.349-358, 2005.

SUN, L.; GAO, F.; ANDERSON, M. C.; KUSTA, W. P.; AISINA., M. M.; SANCHEZ, L.; SAMS, B.; MCKEE, L.; DULANEY, W.; WHITE, W. A.; ALFIERE, J. G.; PRUEGER, J. H.; MELTON, F.; POST, K. Daily Mapping of 30 m LAI and NDVI for Grape Yield Prediction in California Vineyards. **Remote Sens.** Basileia, Suíça. 9, 317. 2017.

TAGLIARINI, F. S. N. **Técnicas de geoprocessamento aplicadas na quantificação de perdas de solo em bacia hidrográfica.** 2017. 121 f. Dissertação, Programa de Pós-graduação em Agronomia/Irrigação e Drenagem – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2017.

TEIXEIRA, A. H. C. et al. Modelling radiation and energy balances with Landsat 8 images under different thermohydrological conditions in the Brazilian semi-arid region. *In: (Christopher M. U. Neale, Antonino Maltese, Eds.) 2015, Anais [...].* Disponível em: <<http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.2195044>>. Acesso em: 7 abr. 2018.

TEIXEIRA, A. H. DE C.; HERNANDEZ, F.B.T.; AANDRADE, R.G. ; LEIVAS, J.F.; BOLFE, E.L. . Energy balance with Landsat images in irrigated central pivots with corn crop in the São Paulo State, Brazil. **Proceedings of SPIE - International Society for Optical Engineering**, v. 9239, p. 923900-1-923900-10, 2014.

TEIXEIRA, A. H. de. C.; BASTIAANSEN, W. G. M.; BASSOI, L. H. Crop water parameters of irrigated wine and table grapes to support water productivity analysis in the São Francisco river basin, Brazil. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.94, p.31-42, 2007.

TESTEZLAF, R. **Irrigação: Métodos, Sistema e Aplicações**. Campinas – SP. Unicamp/FEAGRE, 2017.

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

TOGORES, J. H. **Síntesis y evolución de los compuestos fenólicos**. Tratado de Enología. 2º ed. Madrid: Mundi Prensa, 1210 p. 2011.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Celebrating 50 years of Landsat Vision**. Reston, 2016.

UNO, Y. PRASHER; S. O., LACROIX, R.; GOEL, P. K.; KARIMI, T.; VIAU, A. A.; PATEL, R. M. Artificial neural networks to predict corn yield from Compact Airborne Spectrographic Imager data. **Computers and electronics in agriculture**. v. 47, p. 149-161, 2005.

USGS. **Landsat data continuity mission**. Washington: USGS/NASA, 2013. v. 1, 16.

VILLAGRA, P.; CORTÁZAR, V. G.; FERREYRA, R.; ASPILLAGA, C.; ZÚÑIGA, S. O. F.; SELLÉS, G. Estimation of water requirements and Kc values of 'Thompson Seedless' table grapes grown in the overhead trellis system, using the Eddy covariance method. **Chilean Journal of Agricultural Research**. 74(2). 2014.

XU, X.; CHENG, G.; DUAN, L.; JIANG, R.; PAN, Q.; DUAN, C.; WANG, J. Effect of training systems on fatty acids and their derived volatiles in Cabernet Sauvignon grapes and wines of the north foot of Mt. Tianshan. **Food Chemistry**, v. 181, p. 198–206, 2015.

ZANETTI, J.; GRIPP, J. S.; FERREIRA, I. O.; MEDEIROS, N. G. Análise Crítica da Evolução do Sistema Landsat. **I Seminário Científico da FAGIC**. 2015.

ZONTA, J. H.; BEZERRA, J. R. C.; SOFIATTI, V.; BRANDÃO, Z. N. Yield of cotton cultivars under different irrigation depths in the Brazilian semi-arid region. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**. Campina Grande – PB. v.19, n.8, p.748–754, 2015.