

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
COLÉGIO POLITÉCNICO DA UFSM  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA DE PRECISÃO

Núbia Pentiado Aires

**RELAÇÃO DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO COM  
A PRODUTIVIDADE DE MILHO EM ÁREAS IRRIGADAS  
NO RIO GRANDE DO SUL**

Santa Maria, RS  
2022

Núbia Pentiado Aires

**RELAÇÃO DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO COM A PRODUTIVIDADE DE  
MILHO EM ÁREAS IRRIGADAS NO RIO GRANDE DO SUL**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Agricultura de Precisão, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Agricultura de Precisão.

Orientadora: Profa. Dra. Maríá Silvia Pardi Lacruz

Santa Maria, RS  
2022

Aires, Núbia P.

Relação dos índices de vegetação com a produtividade de milho em áreas irrigadas do Rio Grande do Sul.- 2022.

94 p.;

Orientadora: María Silvia Pardi Lacruz

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Politécnico da UFSM, Programa de Pós Graduação em Agricultura de Precisão, RS, 2022

1. Índices de vegetação 2. Estimativa de produtividade 3. Milho I. Pardi Lacruz, María Silvia II. Título.

---

© 2022

Todos os direitos autorais reservados a Núbia Aires. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: nubia.aires@gmail.com

**Núbia Pentiado Aires**

**RELAÇÃO DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO COM A PRODUTIVIDADE DE  
MILHO EM ÁREAS IRRIGADAS NO RIO GRANDE DO SUL**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Agricultura de Precisão, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Agricultura de Precisão**.

Aprovado em 29 de agosto de 2022.

---

**María Silvia Pardi Lacruz, Dra. (UFSM)**  
(Presidente/Orientadora)

---

**José Marinaldo Gleriani, Dr. (UFV)**

---

**Juliano Dalcin Martins, Dr. (UFSM)**

Santa Maria, RS  
2022

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida e por permitir que eu siga em constante evolução.

Aos meus pais, Elma e Valdecir, que nunca mediram esforços para que eu continuasse estudando, por todo carinho, educação e amor para que eu me tornasse o que sou hoje.

Ao meu esposo Robson, por todo amor, compreensão, por estar sempre comigo, me apoiando e por ser o maior incentivador para que realizasse o mestrado.

À Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), e em especial ao Programa de Pós Graduação em Agricultura de Precisão por todo o aprendizado.

A minha orientadora, Profa. Dra. María Silvia Pardi Lacruz, pela confiança, compreensão, carinho, empatia e grandes ensinamentos, pois me recebeu para orientação na metade do mestrado, enfrentamos muitas coisas, incluindo uma pandemia e ela se mostrou sempre disposta para me auxiliar.

Ao Gustavo de David, por me auxiliar na busca de dados para construção desse trabalho e aos produtores que de disponibilizaram em compartilhar os dados.

A Amanda e Jocélia, por todo apoio e por todo suporte acadêmico e profissional.

A Irriga Global, pela disponibilização dos dados para que o trabalho fosse realizado, ao time da agronomia, em especial ao Luis Pedro por todo apoio e auxílio durante essa caminhada.

A todos que de alguma forma contribuíram para que este momento se tornasse possível, o meu muito obrigada.

## RESUMO

### RELAÇÃO DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO COM A PRODUTIVIDADE DE MILHO EM ÁREAS IRRIGADAS NO RIO GRANDE DO SUL

AUTORA: Núbia Pentiado Aires

ORIENTADORA: María Silvia Pardi Lacruz

A oferta de alimentos para abastecer a população mundial é um tema amplamente discutido, com a necessidade de aumentar a produtividade sem aumentar a área, priorizando a sustentabilidade dos recursos hídricos, energéticos e do meio ambiente como um todo. A agricultura está altamente tecnológica e tecnificada almejando altas produções e custos reduzidos, com isso a necessidade de informações após cultura ser semeada, como em fases iniciais de cultivo é de suma importância para o planejamento da lavoura. O presente estudo tem como objetivo identificar qual índice de vegetação apresenta melhor correlação com a produtividade do milho, em diferentes estágios e em condições irrigadas no Rio Grande do Sul, utilizando imagens Sentinel-2. O trabalho foi realizado em cinco áreas localizadas nos municípios de Catuípe e Cachoeira do Sul, apresentam, respectivamente, solo argiloso e franco arenoso. As safras agrícolas avaliadas foram as de 2019/20 e 2020/21, utilizando 25 imagens MSI/Sentinel-2. Foram utilizadas as bandas 2, 3 e 8 e calculados os índices de vegetação NDVI, SAVI, ARVI e EVI2; o processamento das imagens foi realizado no software QGIS. Posteriormente realizou-se a análise dos componentes principais, seguido da correlação de Pearson e a regressão linear. Os resultados mostraram que para os estádios V6 a V10 o ARVI e o NDVI apresentaram uma melhor determinação para estimativa da produtividade de milho,  $R^2$  0,73 e 0,71, respectivamente. No estádio R1/R2 foram o SAVI com  $R^2$  0,67 e o ARVI com 0,62 e em R4, o NDVI com 0,50. Para o estádio R5 a correlação com a produtividade foi muito baixa, pois a cultura inicia a senescência. Os diferentes tipos de solo não apresentaram diferenças nos índices de vegetação.

**Palavras-chave:** Índices de vegetação; estimativa de produtividade; milho.

## ABSTRACT

### RELATIONSHIP OF VEGETATION INDEX WITH CORN YIELD IN IRRIGATED FIELDS IN RIO GRANDE DO SUL

AUTHOR: Núbia Pentiado Aires

ADVISOR: María Silvia Pardi Lacruz

The supply of food to the world's population is a largely discussed topic, with the need to increase yield without increasing the field, prioritizing the sustainability of water resources, energy and the environment. Agriculture is highly technological and technified, seeks high productions and reduced costs, thus, the need for information after the crop is sown is of paramount importance for the planning of the crop. The present study objective to identify which vegetation index presents better correlation with corn yield, at different stages and under irrigated conditions in Rio Grande do Sul, using Sentinel-2 images. The study was carried out in five fields located in the cities of Catuípe and Cachoeira do Sul, which respectively, clay and sandy loam soils. The season evaluated were those of 2019/20 e 2020/21, using 25 MSI/Sentinel-2 images. The NDVI, SAVI, ARVI and EVI2 vegetation indices were calculated using Sentinel-2 spectral bands 2, 3 and 8. The image processing was performed in QGIS software. Principal components analysis was performed, the Pearson's correlation and linear regression. The results showed that for the V6 to V10 stages, the ARVI and the NDVI presented a better determination for estimating corn yield,  $R^2$  0.73 and 0.71, respectively. In stage R1/R2 were SAVI with  $R^2$  0.67 and ARVI with 0.62 and in R4, NDVI with 0.50. For the R5 stage, the correlation with yield was very low, as the culture start senescence. The different types of soil did not show differences in vegetation index.

**Keywords:** Vegetation index; yield estimate; corn.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fenologia da cultura do milho. ....	16
Figura 2 - Curva de resposta espectral característica da vegetação.....	18
Figura 3 - Localização das áreas em estudo, situadas nos municípios de Cachoeira do Sul, no Estado do Rio Grande do Sul. ....	22
Figura 4 - Localização das áreas em estudo, situadas nos municípios de Catuípe, no Estado do Rio Grande do Sul. ....	22
Figura 5 - Localização das estações meteorológicas.....	28
Figura 6 - Distribuição dos pixels dentro das áreas de estudo da região noroeste .....	31
Figura 7 - Distribuição dos pixels dentro das áreas de estudo da região centro-sul.....	32
Figura 8 - Temperatura média do ar (°C), precipitações (mm), e evapotranspiração de referência (ET <sub>o</sub> ) para as áreas situadas na região de Cachoeira do Sul, no ano agrícola de 2019/20 e 2020/21, Rio Grande do Sul .....	37
Figura 9 - Temperatura média do ar (°C), precipitações (mm), e evapotranspiração de referência (ET <sub>o</sub> ) para as áreas situadas na região de Catuípe, no ano agrícola de 2019/20 e 2020/21, Rio Grande do Sul. ....	38
Figura 10 - Irrigações realizadas nas áreas K5 e K6 para as safras 2019/20 e 2020/21 .....	39
Figura 11 - Irrigações realizadas nas áreas H1, H2 e H4 para as safras 2019/20 e 2020/21 ....	40
Figura 12 - Análise dos componentes principais quando a cultura apresenta estádios entre V6 a V10, para os índices NDVI, SAVI, ARVI, EVI2 e a produtividade real do campo .....	42
Figura 13 - Análise dos componentes principais quando a cultura apresenta estádio R1/R2, para os índices NDVI, SAVI, ARVI, EVI2 e a produtividade real do campo .....	43
Figura 14 - Análise dos componentes principais quando a cultura apresenta estádio R4, para os índices NDVI, SAVI, ARVI, EVI2 e a produtividade real do campo.....	44
Figura 15 - Análise dos componentes principais quando a cultura apresenta estádio R5, para os índices NDVI, SAVI, ARVI, EVI2, NDWI e a produtividade real do campo.....	45
Figura 16 - Regressão linear da relação da produtividade com os índices de vegetação máximo do NDVI, SAVI, ARVI e EVI2 para áreas em estádios de V6 a V10 .....	50
Figura 17 - Regressão linear da relação da produtividade com os índices de vegetação médio do NDVI, SAVI, ARVI e EVI2 para áreas em estádios de V6 a V10 .....	51
Figura 18 - Regressão linear da relação da produtividade com os índices de vegetação máximo e médio do NDVI, SAVI, ARVI e EVI2 para áreas em estádios de R1/R2.....	53



Figura 19 - Regressão linear da relação da produtividade com o NDVI médio para áreas em fenologia R4. ....	54
Figura 20 – Índices de Vegetação e a correlação com a produtividade. ....	55
Figura 21 - – Índices de Vegetação e a relação significativa com a produtividade. ....	55
Figura 22 - Índices de vegetação NDVI, SAVI, ARVI e EVI2 para cada área estudada (H1, H2, H4, K5 e K6) da safra 2019/20.....	57
Figura 23 - Índices de vegetação NDVI, EVI, SAVI e ARVI para cada área estudada (H1, H2, H4, K5 e K6) da safra 2020/21.....	58
Figura 24 - Comparação dos índices de vegetação para a safra 2019/20 e 2020/21 nas 9 áreas em estudo.....	60
Figura 25 - Representação visual dos índices de vegetação da safra 2019/20 referente à área H1 no dia 17/11/2019.....	61
Figura 26 - Representação visual dos índices de vegetação da safra 2019/20 referente à área H2 no dia 17/11/2019.....	62
Figura 27 - Representação visual dos índices de vegetação da safra 2019/20 referente à área H4 no dia 17/11/2019.....	63
Figura 28 - Representação visual dos índices de vegetação da safra 2019/20 referente à área K5 no dia 19/11/2019.....	65
Figura 29 - Representação visual dos índices de vegetação da safra 2019/20 referente à área K6 no dia 19/11/2019.....	66
Figura 30 - Representação visual dos índices de vegetação da safra 2020/21 referente à área H1 no dia 21/11/2020.....	68
Figura 31 - Representação visual dos índices de vegetação da safra 2020/21 referente à área H2 no dia 21/11/2020.....	69
Figura 32 - Representação visual dos índices de vegetação da safra 2020/21 referente à área H4 no dia 01/12/2020.....	70
Figura 33 - Representação visual dos índices de vegetação da safra 2020/21 referente à área K5 no dia 18/12/2020.....	72
Figura 34 - Representação visual dos índices de vegetação da safra 2020/21 referente à área K6 no dia 18/12/2020.....	73
Figura 35 - Representação visual dos índices de vegetação da safra 2019/20 referentes às áreas H1, H2, H4, K5 e K6 para análise dos resultados em diferentes tipos de solo.....	75

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Informações gerais sobre as áreas em estudos nos anos agrícolas 2019/20 e 2020/21. .....	21
Tabela 2 - Caracterização físico-hídrico dos solos das áreas .....	24
Tabela 3 - Dados da visita técnica, safra 2019/20 .....	26
Tabela 4 - Dados da visita técnica, safra 2020/21. ....	27
Tabela 5 - Dados de produtividade das áreas. ....	29
Tabela 6 - Datas das imagens coletadas do satélite MSI/Sentinel-2 das áreas localizadas nos municípios de Catuípe e Cachoeira do Sul para as safras 2019/2020 e 2020/2021. ....	30
Tabela 7 - Dados de semeadura das áreas em estudo .....	34
Tabela 8 - Correlação de Pearson, intensidade e significância das áreas nos estádios V6 a V10 .....	46
Tabela 9 - Correlação de Pearson, intensidade e significância das áreas nos estádios R1/R2 .	47
Tabela 10 - Correlação de Pearson, intensidade e significância das áreas nos estádios R4.....	48
Tabela 11 - Correlação de Pearson, intensidade e significância das áreas nos estádios R5. ....	49

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$\theta_{CC}$	Umidade da capacidade de campo
$\theta_{PMP}$	Umidade do ponto de murcha permanente
$\theta_{SAT}$	Umidade de saturação
ARVI	<i>Atmospherically Resistant Vegetation Index</i>
DP	Densidade de partícula
Ds	Densidade do solo
ETc	Evapotranspiração da cultura
ETo	Evapotranspiração de referência
EVI	<i>Enhanced Vegetation Index</i>
EVI2	<i>Enhanced Vegetation Index 2</i>
Macro	Macroporosidade
Micro	Microporosidade
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
PT	Porosidade total
SAVI	<i>Soil Adjusted Vegetation Index</i>

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	13
2	REVISÃO DE LITERATURA .....	15
2.1.	ASPECTOS GERAIS DA CULTURA DO MILHO .....	15
2.3.	A AGRICULTURA DE PRECISÃO E O SENSORIAMENTO REMOTO .....	17
2.4.	ÍNDICES DE VEGETAÇÃO .....	19
2.5.	ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE .....	20
3	MATERIAL E MÉTODOS .....	21
3.1.	ÁREA DE ESTUDO .....	21
3.2.	PROCESSAMENTO DOS DADOS .....	29
3.3.	DETERMINAÇÃO DOS ÍNDICES ESPECTRAIS DE VEGETAÇÃO .....	30
3.3.1.	Cálculo do NDVI.....	32
3.3.2.	Cálculo do SAVI .....	32
3.3.3.	Cálculo do ARVI.....	33
3.3.4.	Cálculo do EVI2 .....	33
3.4.	ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE .....	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	36
5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES .....	76
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	78
	REFERÊNCIAS QUE USEI PARA FORMAÇÃO DO MEU CONHECIMENTO PARA ESCREVER A DISSERTAÇÃO .....	85
6	ANEXOS.....	87

## 1 INTRODUÇÃO

A oferta de alimentos para abastecer a população mundial é um tema amplamente discutido, pois o crescimento da população não segue o aumento da produção de alimentos, ocorrendo alta demanda e baixa oferta de produtos em alguns países. Nessa linha discute-se o aumento de produtividade sem a necessidade de aumentar a área, priorizando a sustentabilidade dos recursos hídricos, energéticos e do meio ambiente. Para conseguir êxito no aumento de produtividade otimizando o uso das áreas aptas para a agricultura é preciso aliar a produção de alimentos à alta tecnologia, e utilizar ferramentas como a irrigação e a agricultura de precisão.

Os investimentos no setor de irrigação resultam em um aumento da produtividade e no valor da produção, sem a necessidade do aumento das áreas de cultivo e contribuindo para a segurança alimentar, já que muitos alimentos são produzidos com a utilização de irrigação (ANA, 2019). Somando-se as áreas cultivadas com arroz e irrigadas por inundação e a área irrigada por pivô central o Rio Grande do Sul possui aproximadamente 15% da área cultivada com culturas produtoras de grãos irrigada (MARTINS et al, 2016). Segundo a ANA (2019), é um dos sistemas de irrigação que pode ser utilizado em grandes áreas com diferentes condições físicas, totalmente automatizado e que apresenta incentivos e subsídios pelo poder público o que leva a crescente expansão no país.

Ao comparar a produtividade da agricultura de sequeiro com a irrigada se pode ter um aumento de 2 a 3 vezes mais quando se oferta água, além da garantia de colheita e redução do fator de risco causado por condições climáticas desfavoráveis (MENDES, 1998).

Com a necessidade de aumentar a produção para abastecer a população e frente aos desafios que a agricultura apresenta, como aumento dos custos de produção, degradação da terra, terras agricultáveis disponíveis, mudanças climáticas e pouca mão de obra, a agricultura de precisão vem como uma ferramenta que auxilia na eficiência da utilização de recursos e da produtividade (NARVAEZ et al., 2017).

Dentro da agricultura de precisão o sensoriamento remoto é amplamente utilizado para obter informações de objetos sem o contato *in loco*, o que possibilita a visualização e identificação das diferentes características de cobertura e solo. Segundo Shiratsuchi et al. (2014) técnicas de sensoriamento remoto são utilizadas na avaliação nutricional e da necessidade hídrica das plantas, previsão do tempo, detecção de doenças e pragas, e na estimativa de produtividade, dentre outras.

A estimativa da produtividade antes da colheita é importante para a tomada de decisão no manejo da cultura maximizando o rendimento (JIN et al, 2018). Segundo Villalba (2012) os

índices de vegetação demonstram o potencial de produtividade dos grãos e são uma ferramenta que pode ser utilizada para detectar os fatores limitantes e as estratégias adequadas para o manejo da cultura; estes índices também permitem fazer a previsão de safra no âmbito de planejamento governamental

Os índices de vegetação são ferramentas importantes para caracterização da dinâmica temporal e do vigor da vegetação. Para Formaggio e Sanches (2017) esses índices são formulações matemáticas a partir de dados espectrais obtidos por sensores remotos e que permite avaliar e estimar a cobertura vegetal como a atividade fotossintética. Existem vários índices de vegetação, como o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), proposto por Rouse Jr. et al. (1974), é um dos índices mais antigos e também mais utilizados. Um dos índices que utiliza a linha do solo é o *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI), (HUETE, 1988), e que minimiza os efeitos do solo. O *Atmospherically Resistant Vegetation Index* (ARVI), foi um índice desenvolvido com um processo de autocorreção para efeitos atmosféricos e foi proposto por Kaufman e Tanré (1992). E o *Enhanced Vegetation Index* (EVI2), é similar ao EVI, porém utiliza somente duas bandas, minimizando distorções atmosféricas (JIANG, 2008).

Diante dessa nova agricultura que vem sendo consolidada, altamente tecnológica, almejando altas produções com custos reduzidos é que se torna necessário obter informações antes mesmo da cultura ser semeada, para realização de um planejamento para toda uma safra.

Sendo assim, o objetivo geral da pesquisa é identificar o desempenho dos índices de vegetação NDVI, SAVI, ARVI, e EVI2 e determinar qual apresenta a melhor correlação com a produtividade do milho em diferentes estágios e em condições irrigadas no Rio Grande do Sul, utilizando imagens MSI/Sentinel-2.

Como os objetivos específicos se propõe:

- Determinar a relação dos índices de vegetação NDVI, SAVI ARVI, e EVI2 com a produtividade do milho em condições irrigadas;
- Determinar quais estágios da cultura apresentam uma boa correlação na estimativa da produtividade utilizando os índices de vegetação NDVI, SAVI, ARVI e EVI2;
- Determinar se os diferentes tipos de solo influenciam na correlação dos índices de vegetação NDVI, SAVI, ARVI e EVI2 com a produtividade.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. ASPECTOS GERAIS DA CULTURA DO MILHO

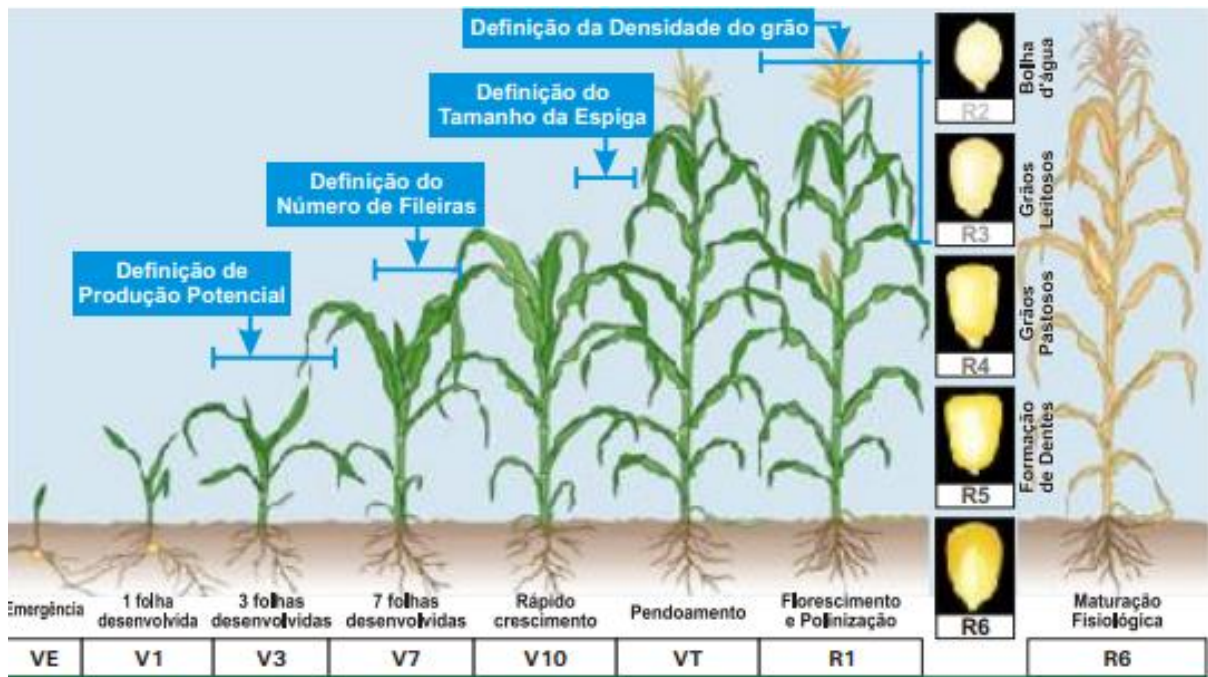
O trigo, arroz e milho são responsáveis aproximadamente por dois terços das calorias diárias necessárias (FAO, 2018). Segundo dados da USDA (2018) o milho é o cereal mais produzido e consumido no mundo, apresentando os Estados Unidos, China e Brasil como principais produtores. O Brasil apresenta uma área cultivada de 16,80 milhões de hectares de milho ocupando o terceiro lugar de maior produtor mundial com uma produção total de 83,50 milhões de toneladas (USDA, 2018).

A produtividade média do milho é de 7500 kg ha<sup>-1</sup> no Rio Grande do Sul (CONAB, 2018), porém Schwalbert et al., (2018) chegaram a valores próximos de 14000 kg ha<sup>-1</sup> em áreas experimentais irrigadas no sul do Brasil. O fator ambiental que mais limita a obtenção de altos rendimentos de grãos de milho no Brasil é a deficiência hídrica, principalmente no estado do Rio Grande do Sul, que apresenta a ocorrência histórica de um bom volume de precipitação, porém com uma distribuição não uniforme nos momentos em que a planta mais precisa (SANGOI et al., 2010).

Devido à alta necessidade de água ocasionada pela alta evapotranspiração e a alta sensibilidade fisiológica na determinação de seus principais componentes de rendimento, como o número de espigas por planta e o número de grãos por espiga, a cultura do milho é muito sensível a déficits hídricos (BERGAMASCHI et al., 2007). Principalmente durante o período de floração ao início do enchimento de grãos da cultura. A Figura 1 mostra as fases fenológicas do milho, e os componentes de rendimento que são definidos em que cada estágio de desenvolvimento, qualquer estresse que ocorra nestes períodos irá refletir na produtividade final da cultura.

Para que ocorra o crescimento e desenvolvimento das plantas, é necessário que aspectos do clima como a temperatura média (diurna e noturna), precipitação e radiação solar, estejam de acordo com as exigências da cultura (FANCELLI & DOURADO-NETO, 2000). Com isso a eficiência do uso da radiação interceptada, as condições de temperatura e o status fisiológico da cultura no período que antecede e após o pendoamento determinarão as taxas de crescimento, o número potencial de grãos e conseqüentemente o potencial produtivo (ANDRADE et al. 1993, 1993a; OTEGUI & BONHOMME, 1998).

Figura 1 - Fenologia da cultura do milho.



Fonte: Adaptado de FANCELLI (1986) e RITCHIE (1993).

Conforme Zhang et al. (2013), o vigor da vegetação em culturas de milho aumenta rapidamente durante a fase vegetativa, permanece estável durante a fase de reprodução e diminui lentamente durante a fase de senescência. A vegetação fotossintética é a vegetação viva (TARAZONA et al., 2018) que está diretamente relacionada com a radiação fotossinteticamente ativa (DEJONGE, 2012). Com isso sabe-se que a radiação solar incidente nas plantas, pode ser fracionada em três partes, a radiação solar absorvida que é utilizada para as reações da fotossíntese, a radiação solar transmitida que passa pela folha e a radiação solar refletida, que é utilizada para mensurar diversos aspectos da planta através de ferramentas do sensoriamento remoto.

## 2.2. IRRIGAÇÃO

O déficit hídrico é o principal fator de redução na produção das culturas de primavera-verão no Rio Grande do Sul (BERGAMASCHI et al., 2007). Isso ocorre devido à distribuição irregular das precipitações pluviais e elevada demanda evaporativa da atmosfera que ocorre neste período (ZIPPER et al., 2016). Para reduzir os efeitos do risco climático causado pela falta de água para as culturas utiliza-se a irrigação como alternativa.

A irrigação é o setor que consome grandes volumes de água, portanto seu uso deve ser realizado de forma racional e criteriosa, de forma que evite desperdícios e aumente a produção



(PEREIRA et al., 2012). Para suprir a necessidade hídrica das culturas associa-se a prática da irrigação para complementar a disponibilidade de água que naturalmente vem das precipitações (SETTI et al., 2001).

Segundo dados da ABID (2020) a utilização da irrigação localizada e a aspersão por pivô central aumentaram cerca de 70% no Brasil entre os anos 2006 e 2019. A ANA (2021) menciona que os pivôs centrais concentram sua maior utilização para cultivos de grandes *commodities* como o feijão, soja, algodão e milho e que em um mesmo pivô consegue-se realizar até três safras no mesmo ano.

Ainda segundo a ANA (2021), a soja e o milho apresentam rendimentos 2 a 3 vezes maiores do que em sequeiro. Com isso, para manter altas produtividades é importante a suplementação da disponibilidade hídrica para as plantas com a utilização de sistemas de irrigação (CECHI, 2019).

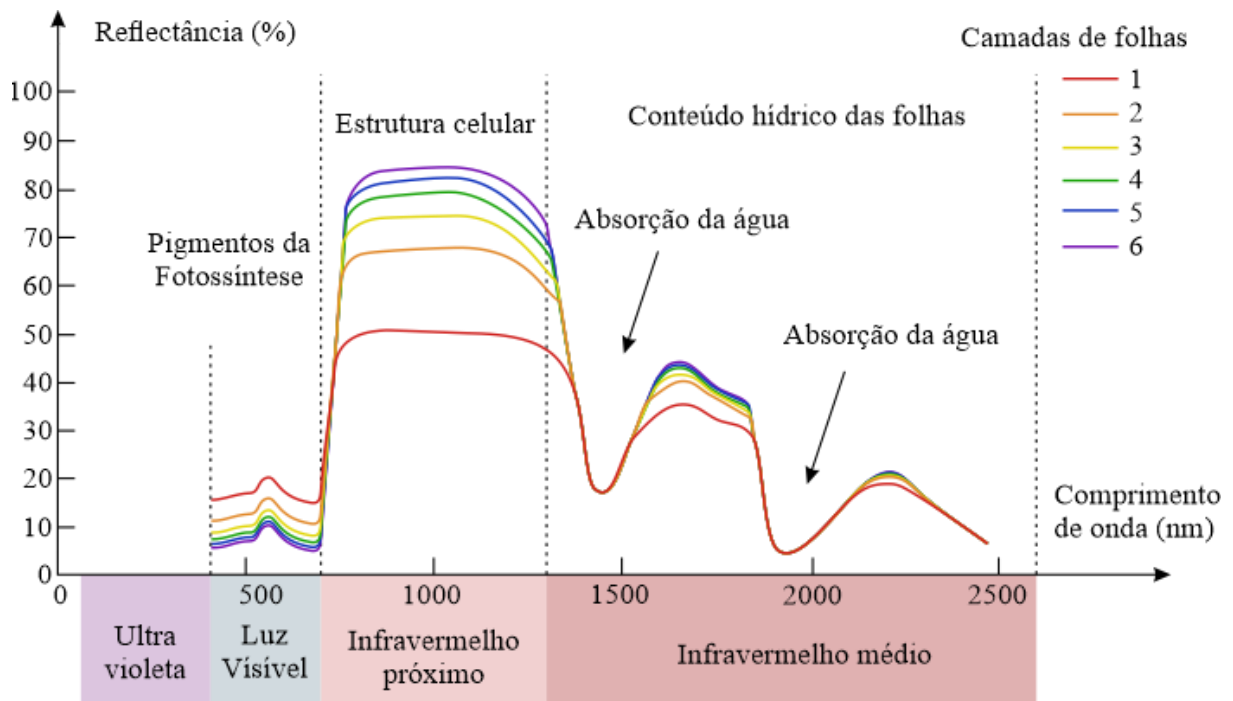
### 2.3. A AGRICULTURA DE PRECISÃO E O SENSORIAMENTO REMOTO

A agricultura de precisão é um conjunto de ferramentas e tecnologias que possibilita o gerenciamento localizado das lavouras, otimizando o sistema produtivo com a finalidade de obter um aumento no retorno econômico e a redução do impacto ao meio ambiente (SENAR, 2019). O tratamento diferenciado de pequenas áreas dentro de um mesmo talhão, considerando o seu potencial produtivo é o que define a agricultura de precisão (MILANI, 2006).

Segundo Oliveira (2019) a agricultura de precisão busca, principalmente, redução de custos e impactos ambientais aplicando menos insumos na produção agrícola, com isso utiliza ferramentas como o sensoriamento remoto, considerando a variabilidade espacial e temporal de uma área. A utilização do sensoriamento remoto na agricultura proporciona a redução dos custos e do tempo se comparado com levantamentos realizados a campo (SEELAN et al., 2003).

A utilização de tecnologias com satélite de detecção remota aplicada à agricultura é considerada cada vez mais um método de interesse, visto que tem como possibilidade monitorar grandes dimensões de áreas por meio de imagens obtidas por plataformas orbitais (MARQUES, 2018). O sensoriamento remoto utiliza a energia eletromagnética, que pode ser originada do sol, por pulsos de uma antena radar ou emitida pelos alvos; esta energia é dividida em faixas espectrais (Figura 2), em termos de comprimento de onda ou de frequência (LORENZZETTI, 2015).

Figura 2 - Curva de resposta espectral característica da vegetação



Fonte: Auster tecnologia (2020). Disponível em: <https://www.austertecnologia.com/>

Uma das técnicas utilizadas no sensoriamento remoto é obtenção de imagens de sensores acoplados em satélites. Existem vários satélites na órbita da Terra que realizam o imageamento do planeta, dentre eles o Sentinel-2, que segundo Drusch (2012), um dos principais objetivos deste satélite é fornecer imagens multiespectrais de alta resolução e alta frequência de revisita. Segundo a European Space Agency (2015) e Navarro et. al., (2017) a missão é composta por dois satélites Sentinel-2A e Sentinel-2B que estão na mesma órbita, com resolução espacial de 10m (bandas do visível), 20m (bandas do infravermelho) e 60m (bandas de correção atmosférica) e com o tempo de revisita de 5 dias. Esta é uma missão imageadora multiespectral do Programa GMES (*Global Monitoring for Environment and Security*), administrada pela Comunidade Europeia e a ESA, para observação da Terra, realizando coleta de dados sobre a vegetação, solos e umidade, rios e áreas costeiras, e dados para correção atmosférica.

Existem diversas aplicações do sensoriamento remoto na agricultura, pode-se citar a estimativa de biomassa e produtividade, o monitoramento de estresse hídrico e do vigor das plantas e a avaliação de estádios fenológicos (BRANDÃO, 2009). Obtém-se ganhos significativos no levantamento de dados relacionados à agricultura irrigada quando se utiliza o sensoriamento remoto aliado a outras geotecnologias (ANA, 2021).

Segundo Molin et al. (2015) na agricultura as faixas do espectro eletromagnético mais usadas são a do infravermelho próximo e do visível. As características biofísicas das plantas, biomassa, fração radiativa interceptada fotossinteticamente, ou área foliar são associadas a dados de reflectância (CARNEIRO, 2018). Essas características são melhores analisadas utilizando combinações matemáticas de distintas faixas espectrais (ATZBERGER, 2013). Isso gera os chamados índices de vegetação que segundo Shiratsuchi et al. (2014) é necessário a compreensão da resposta espectral da vegetação por meio do comportamento da reflectância para um melhor entendimento dos índices de vegetação.

#### 2.4. ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

Os índices de vegetação se originam da combinação algébrica de duas ou mais bandas espectrais relacionadas com as características espectrais da vegetação (MATSUSHITA et al., 2007). São de grande importância para a agricultura, pois é através deles que se consegue obter inúmeros levantamentos com relação aos cultivos. Segundo Jensen (2009) com os índices de vegetação podem-se determinar parâmetros como o teor de clorofila, índice de área foliar, biomassa verde, porcentagem de cobertura verde, entre outros.

Segundo Jackson e Huete (1991) os índices de vegetação resultam do arranjo dos dados espectrais, que destacam o sinal da vegetação minimizando as variações da irradiância solar e os efeitos do substrato do dossel vegetal. Esses índices de vegetação envolvem comprimentos de ondas específicos do espectro eletromagnético, o que permite a determinação da densidade e cobertura vegetal (CRUZ et al., 2011).

As bandas mais utilizadas são a do vermelho e do infravermelho próximo, pois apresentam mais de 90% da variação espectral da vegetação; estes índices realçam o comportamento espectral da vegetação e correlacionam com os parâmetros biofísicos (ROSA, 2003).

Existem inúmeros índices de vegetação, um dos mais utilizados é o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), proposto por Rouse Jr. et al. (1974) e que apresenta forte correlação com o crescimento da cultura. O NDVI é um indicador numérico baseado na diferença entre os comprimentos de onda da faixa do vermelho e do infravermelho próximo, dividido pela sua soma (ZERBATO et al., 2016).

Devido à influência do solo no NDVI, Huete (1988) criou o SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*) para amenizar este efeito. Segundo Shiratsuchi et al. (2014) este índice se baseia na tendência de que em baixas densidades de vegetação a curva de solo se aproxima da

curva da vegetação, levando o solo a influenciar pouco em dosséis vegetativos que ainda não estão totalmente fechados e quase nenhuma influência em densidades altas de vegetação.

O ARVI (*Atmospherically Resistant Vegetation Index*), que corrige os efeitos dos aerossóis, parte do princípio de que a atmosfera afeta mais significativamente a radiação vermelha do que a radiação infravermelha (MARQUES, 2018).

Outro índice é o EVI (*Enhanced Vegetation Index*) desenvolvido por Huete et al. (1997) para otimizar o sinal da vegetação; este índice apresenta uma maior sensibilidade em regiões com alta biomassa e melhora o monitoramento da vegetação, pois reduz a influência do solo e da atmosfera nos dados. Uma derivação do EVI, o EVI2 foi proposto por Jiang et al. (2008). O EVI2 é similar ao EVI, entretanto, não utiliza a banda espectral na faixa do azul, minimizando distorções causadas pela atmosfera, teoricamente melhorando os resultados fornecidos pelo EVI.

## 2.5. ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE

A estimativa das produtividades potenciais das culturas agrícolas, pode ser realizada utilizando técnicas de modelagem (ASSIS et al. 2006). Estes modelos matemáticos definem quantitativamente hipóteses sobre o sistema real, permitindo deduzir suas consequências (DOURADO-NETO et al., 1998). Segundo Yin (1996) os modelos de simulação de produtividade potencial das culturas utilizam atributos da planta como: área foliar, crescimento e fenologia.

Os índices de vegetação podem ser utilizados para a bioestimativa, pois eles têm relação quase lineares da radiação fotossinteticamente ativa (GOWARD e HUENNRICH, 1992; MYNENI e WILLIAMS, 1994; TAN et al., 2013), essa radiação é a fonte de energia para a fotossíntese e controla boa parte da produtividade (AKITSU et al., 2017). Vários índices de vegetação poderiam ser usados na estimativa de culturas agrícolas pois possuem boa correlação com a produtividade de biomassa (OLIVEIRA, 2019), podendo realizar relações diretas entre os índices de vegetação e a produtividade medida no campo (VARELLA et al., 2011). Segundo Araújo et al., (2004) os índices de vegetação gerados a partir de imagens multiespectrais podem estimar a produtividade da cultura a partir da sua relação com o vigor da cultura.

Para CERUTTI (2019) as estimativas de produtividade antes da colheita, permitem que sejam realizadas estratégias de irrigação e o planejamento da produção dos grãos tanto para áreas irrigadas como de sequeiro.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. ÁREA DE ESTUDO

Foram selecionadas áreas de cultivo de milho irrigadas pelo sistema de irrigação pivô central nas safras 2019/2020 e 2020/2021. Para seleção das áreas levou em consideração a representatividade da área, disponibilidade de dados históricos de produtividade da área irrigada, diferentes regiões do estado e disponibilidade de imagens.

Foram selecionados 5 pivôs de irrigação, sendo 3 áreas localizadas no município de Catuípe, na região noroeste do estado do Rio Grande do Sul, e 2 áreas no município de Cachoeira do Sul na região centro sul (Figuras 3 e 4).

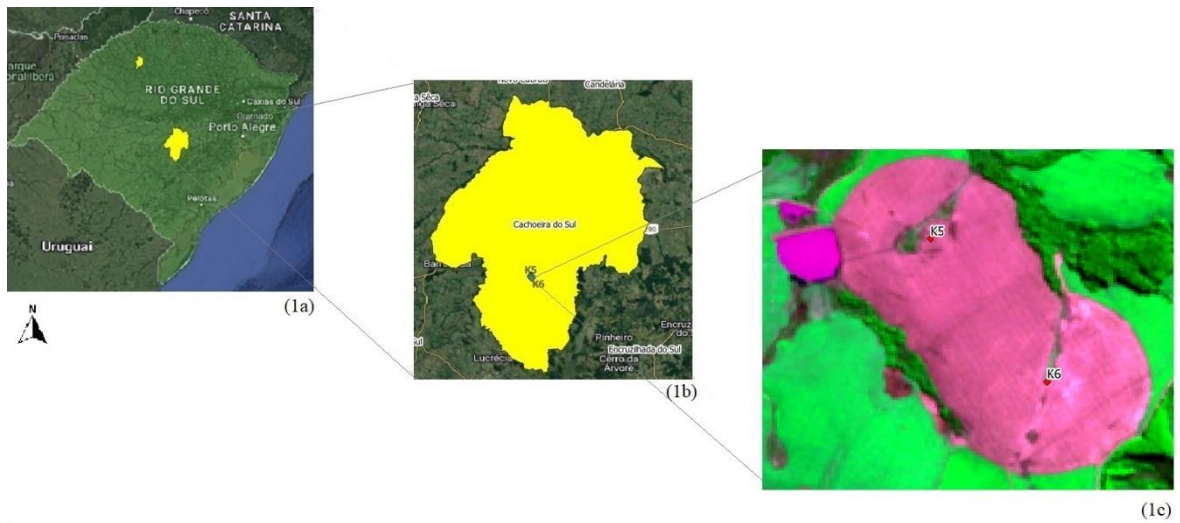
As áreas localizadas no município de Catuípe foram denominadas H1, H2 e H4 estão na Tabela 1. E as áreas localizadas no município de Cachoeira do Sul foram denominadas K5 e K6 (Tabela 1).

Tabela 1 - Informações gerais sobre as áreas em estudos nos anos agrícolas 2019/20 e 2020/21.

Área	Município	Coordenadas		Altitude (m)	Área Irrigada (ha)
		Latitude	Longitude		
H1	Catuípe	28° 01' 21,4" S	54° 06' 46,9" W	388	31
H2	Catuípe	28° 01' 50,3" S	54° 06' 29,5" W	378	29
H4	Catuípe	28° 01' 45,9" S	54° 03' 06,1" W	413	70
K5	Cachoeira do Sul	30° 22' 12,7" S	53° 01' 51,4" W	122	36
K6	Cachoeira do Sul	30° 22' 32,6" S	53° 01' 35,0" W	158	48

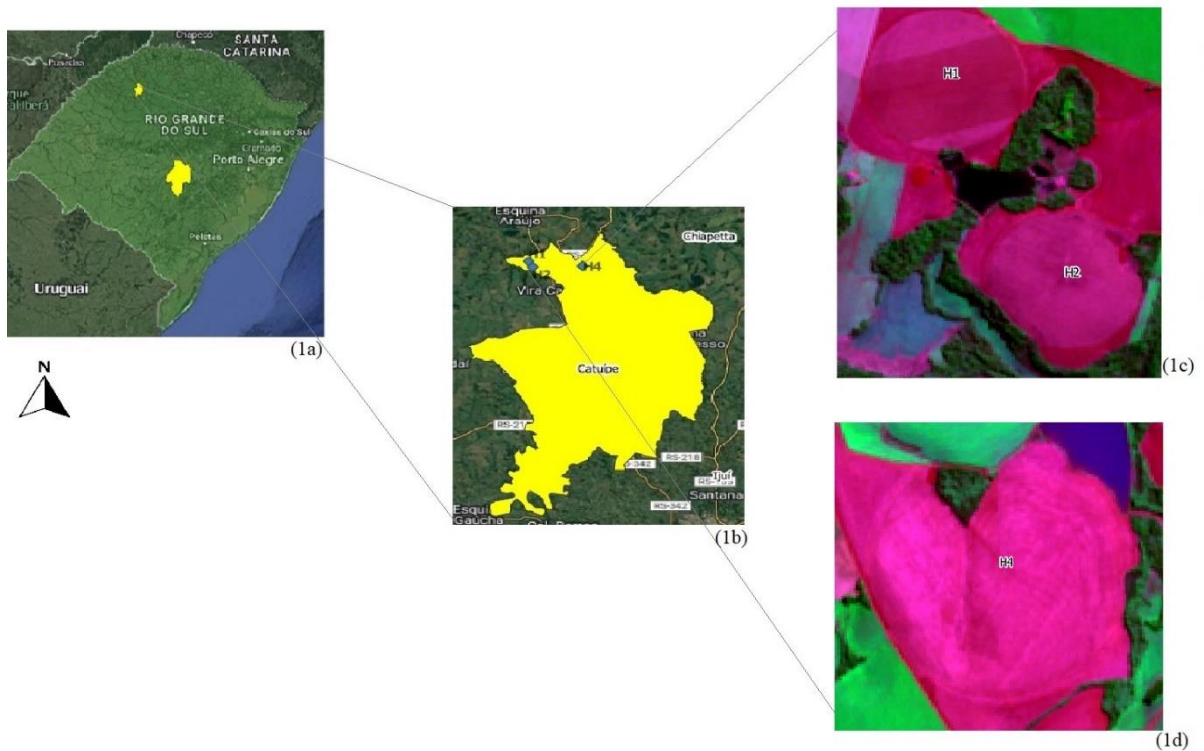
Fonte: a autora (2022).

Figura 3 - Localização das áreas em estudo, situadas nos municípios de Cachoeira do Sul, no Estado do Rio Grande do Sul.



Nota - 1a localização da cidade onde foram realizados os estudos; 1b localização dos pivôs estudados na região centro-sul, município de Cachoeira do Sul; 1c localização e formato das áreas estudadas, pivôs K5 e K6.  
Fonte: a autora (2022).

Figura 4 - Localização das áreas em estudo, situadas nos municípios de Catuípe, no Estado do Rio Grande do Sul.



Nota - 1a localização da cidade onde foram realizados os estudos; 1b localização dos pivôs estudados na região noroeste, município de Catuípe; 1c localização e formato da área estudada, pivô H4; 1d localização e formato da área estudada, pivô H1 e H2.  
Fonte: a autora (2022).

As áreas estudadas apresentam monitoramento da irrigação baseado em dados do solo, clima, equipamento e dados da cultura. A empresa Irriga Global que realiza essa prestação de serviço indica quando e quanto o produtor deve aplicar de irrigação. Com isso é possível garantir um racional e eficiente uso da água para a cultura, garantindo o seu correto desenvolvimento.

A Tabela 2 apresenta as características físico-hídricas do solo das áreas de estudo. Os dados da caracterização físico hídrica do solo foram acessados do banco de dados da Irriga Global. Os dados existentes no banco da Irriga Global são de análises realizadas no laboratório de análises físicas do Sistema Irriga, pertencente ao Departamento de Engenharia Rural da Universidade Federal de Santa Maria.

Nas áreas H1, H2 e H4 o solo é classificado como argiloso e a área cultivada é de 31, 29 e 70 hectares, respectivamente. Nas áreas K5 e K6 apresentam solo franco arenoso e a área cultivada é 36 e 48 hectares, respectivamente.

Tabela 2 - Caracterização físico-hídrico dos solos das áreas

Camada (m)	$D_s$ (g cm <sup>-3</sup> )	$D_p$	Porosidade			$\theta_{SAT}$	$\theta_{CC}$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	$\theta_{PMP}$	Granulometria		
			PT	Macro (%)	Micro				Areia	Silte (%)	Argila
H1											
0,00 - 0,20	1,37	2,77	51	3	47	0,584	0,450	0,250	8	35	57
0,20 - 0,40	1,27	2,72	53	5	48	0,621	0,446	0,250	6	38	56
0,40 - 0,60	1,28	2,67	52	7	45	0,564	0,427	0,320	2	32	66
H2											
0,00 - 0,20	1,37	2,66	49	5	44	0,524	0,417	0,240	4	37	59
0,20 - 0,40	1,31	2,68	51	3	48	0,576	0,457	0,260	3	34	63
0,40 - 0,60	1,45	2,81	49	4	45	0,59	0,414	0,300	5	34	61
H4											
0,00 - 0,20	1,41	2,68	47	6	42	0,518	0,391	0,240	2	40	58
0,20 - 0,40	1,35	2,72	51	5	46	0,545	0,429	0,260	3	37	60
0,40 - 0,60	1,22	2,71	55	8	47	0,587	0,437	0,290	2	40	58
K5											
0,00 - 0,20	1,64	2,60	37	10	27	0,381	0,217	0,080	56	26	18
0,20 - 0,40	1,57	2,61	40	12	28	0,414	0,216	0,080	56	26	18
0,40 - 0,60	1,49	2,56	42	14	27	0,454	0,215	0,070	56	26	18
K6											
0,00 - 0,20	1,48	2,49	41	9	32	0,440	0,255	0,100	67	19	14
0,20 - 0,40	1,30	2,52	49	12	37	0,541	0,272	0,080	68	19	13
0,40 - 0,60	1,41	2,51	44	10	34	0,463	0,279	0,090	68	19	13

Nota -  $D_s$ : Densidade do solo;  $D_p$ : Densidade de Partícula; PT: Porosidade Total; Macro: Macroporosidade; Micro: Microporosidade;  $\theta_{SAT}$ : Umidade de saturação;  $\theta_{CC}$ : Umidade da capacidade de campo;  $\theta_{PMP}$ : Umidade do Ponto de murcha permanente.

Fonte: a autora (2022).



O clima das regiões enquadra-se na classe “Cfa”, subtropical úmido de acordo com a classificação climática de Köppen (MORENO, 1961; ALVARES et al., 2014), em que as temperaturas médias variam entre 15° e 18°, com mínimas de até -10°C e máximas de 40° e a precipitação média no sul do estado fica entre 1.299mm e 1.500mm e no norte entre 1.500mm e 1.800mm (WREGGE et al., 2012).

Os dados de fenologia da cultura são do banco de dados da Irriga Global e são determinados conforme a escala fenológica de Ritchie et al., (1993). Esse banco de dados apresenta os dados estimados conforme o milho híbrido que foi semeado e os dados mensurados a campo.

Durante a visita técnica é realizado o levantamento da umidade do solo na profundidade que se encontram as raízes do milho (0-20; 20-40; 40-60 cm), medição da altura de plantas e avaliação da fenologia da planta (Tabelas 3 e 4). A umidade do solo é mensurada utilizando o equipamento manual *Frequency Domain Reflectometry (FDR)*.

Tabela 3 - Dados da visita técnica, safra 2019/20

Área	Data	DAS	Altura de planta (m)	Estádio fenológico	Umidade do solo (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )		
					0-20 (cm)	20-40 (cm)	40-60 (cm)
H1	25/09/2019	28	0,15	V3	0,40	0,41	0,41
	24/10/2019	57	1,40	V13	0,39	0,41	0,41
	14/11/2019	78	2,20	R1	0,41	0,41	0,41
	06/12/2019	100	2,30	R4	0,42	0,44	0,44
	03/01/2020	128	2,30	R5	0,39	0,41	0,42
H2	25/09/2019	27	0,15	V3	0,40	0,41	0,41
	24/10/2019	56	1,40	V13	0,39	0,41	0,42
	14/11/2019	77	2,20	R1	0,42	0,42	0,42
	06/12/2019	99	2,30	R4	0,41	0,44	0,44
	03/01/2020	127	2,30	R5	0,41	0,42	0,42
H4	28/08/2019	6	0,00	V0	0,41	0,41	0,41
	25/09/2019	34	0,25	V4	0,42	0,43	0,43
	24/10/2019	63	1,20	V12	0,39	0,42	0,42
	14/11/2019	84	2,30	R1	0,42	0,43	0,43
	06/12/2019	106	2,30	R4	0,42	0,43	0,45
	03/01/2020	134	2,30	R6	0,41	0,41	0,42
K5	01/10/2019	42	0,25	V5	0,28	0,29	0,29
	21/10/2019	62	0,90	V9	0,36	0,37	0,37
	13/11/2019	85	2,20	R1	0,29	0,29	0,29
	02/12/2019	104	2,30	R3	0,24	0,25	0,27
	21/12/2019	123	2,30	R5	0,32	0,33	0,33
K6	01/10/2019	45	0,25	V5	0,31	0,32	0,32
	21/10/2019	65	0,90	V9	0,36	0,36	0,36
	13/11/2019	88	2,20	R1	0,28	0,28	0,28
	02/12/2019	107	2,30	R3	0,27	0,28	0,28
	21/12/2019	126	2,30	R5	0,30	0,32	0,32

Nota - Data: data da visita técnica; DAS: dias após a semeadura.

Fonte: a autora (2022).

Tabela 4 - Dados da visita técnica, safra 2020/21.

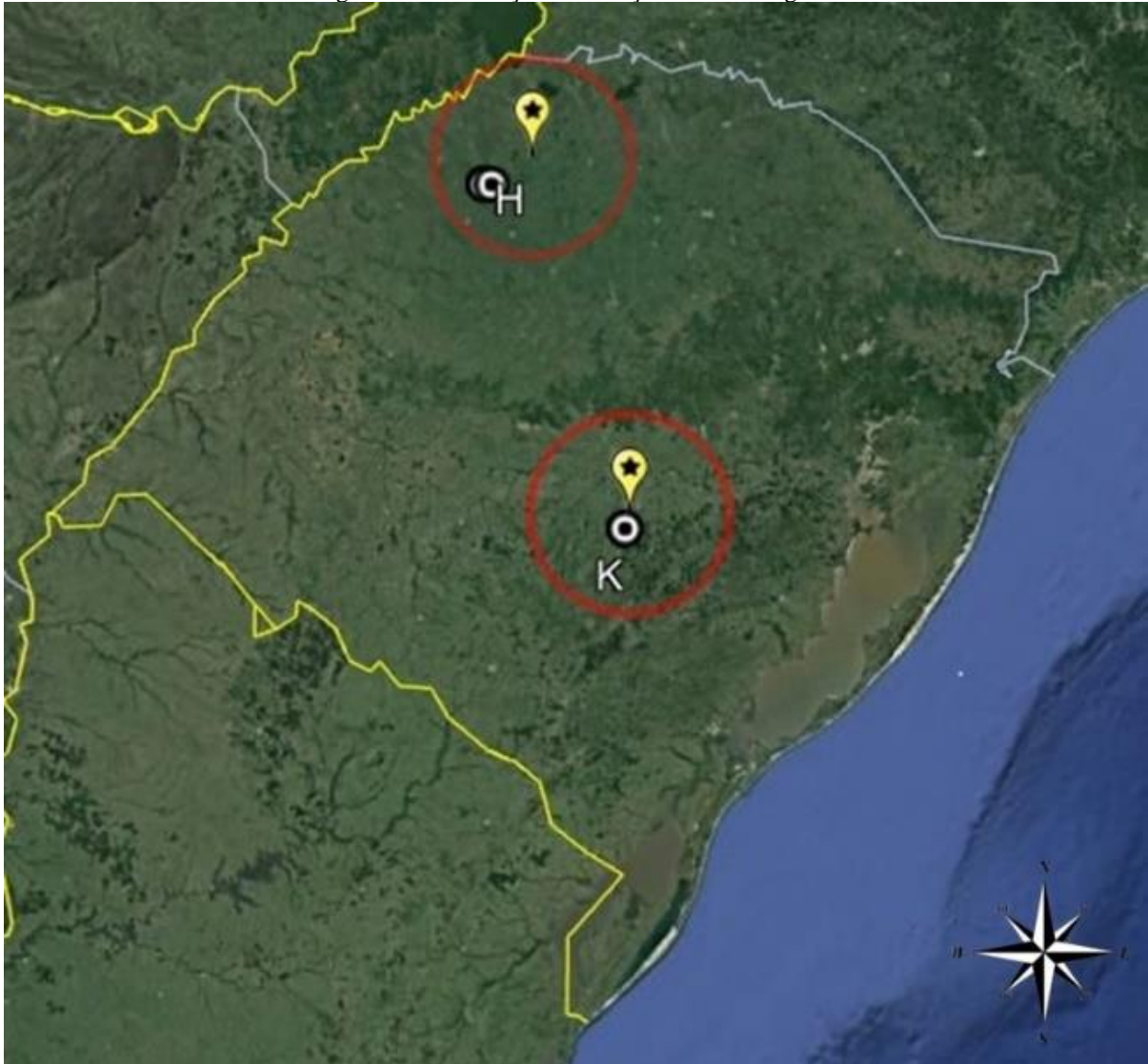
Área	Datas	DAS	Altura de planta (cm)	Fenologia	Umidade do solo (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )		
					0-20 (cm)	20-40 (cm)	40-60 (cm)
H1	03/09/2020	5	0	VE	0,44	0,46	0,46
	24/09/2020	26	0,20	V3	0,41	0,45	0,46
	14/10/2020	46	1,10	V8	0,40	0,40	0,40
	11/12/2020	104	2,10	R4	0,41	0,41	0,41
	12/01/2020	136	2,10	R6	0,42	0,42	0,42
H2	03/09/2020	5	0	VE	0,42	0,45	0,45
	24/09/2020	26	0,20	V3	0,40	0,45	0,45
	14/10/2020	46	1,00	V9	0,40	0,41	0,41
	11/12/2020	104	2,10	R4	0,41	0,41	0,42
	12/01/2020	136	2,10	R6	0,42	0,42	0,42
H4	03/09/2020	9	0,00	VE	0,45	0,46	0,46
	24/09/2020	30	0,15	V3	0,42	0,45	0,45
	14/10/2020	50	1,10	V10	0,41	0,42	0,42
	12/01/2020	140	2,10	R6	0,43	0,43	0,43
K5	16/09/2020	47	0,15	V4	0,35	0,35	0,35
	10/10/2020	71	0,70	V7	0,27	0,27	0,27
	31/10/2020	92	2,00	V18	0,27	0,27	0,27
	24/11/2020	116	2,10	R3	0,29	0,29	0,29
	19/12/2020	141	2,10	R4	0,25	0,25	0,25
K6	16/09/2020	48	0,25	V5	0,36	0,36	0,36
	10/10/2020	72	0,70	V8	0,26	0,26	0,26
	31/10/2020	93	2,00	V19	0,27	0,27	0,27
	24/11/2020	117	2,10	R1	0,27	0,27	0,27
	19/12/2020	142	2,10	R4	0,26	0,26	0,26

Nota - Data: data da visita técnica; DAS: dias após a semeadura.

Fonte: a autora (2022).

Foi realizado o levantamento das variáveis meteorológicas diárias durante a safra de milho para as áreas em estudo. Utilizou-se os dados de uma estação meteorológica próxima à área noroeste e outra próxima a área localizada na região centro-sul (Figura 5). Os dados obtidos são da temperatura máxima e mínima (°C), precipitações (mm), radiação global incidente, evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) e evapotranspiração máxima nos anos agrícolas 2019/20 e 2020/21 registrado nas estações meteorológicas próximas aos locais estudados, com exceção da precipitação, que foi registrada em cada área.

Figura 5 - Localização das estações meteorológicas



Nota - O ícone amarelo indica a localização da estação meteorológica e a circunferência indica a região de abrangência dos dados da estação meteorológica para realização dos cálculos relacionados a estimativa de evapotranspiração.

Fonte: a autora (2022).

Essas 5 áreas foram utilizadas na estimativa da produtividade testando diferentes índices de vegetação. Os dados utilizados foram obtidos das safras 2019-2020 e 2020-2021 em que foram semeadas nas áreas de pivô central, diferentes híbridos de milho (*Zea mays* L.), conforme a Tabela 5.

Tabela 5 - Dados de produtividade das áreas.

Pivô	Semeadura	Colheita	Híbridos	Área (ha)	Produtividade (T ha <sup>-1</sup> )
H1	28/08/2019	08/01/2020	P1630	31	13,27
H1	29/08/2020	14/01/2021	P1225	31	11,52
H2	29/08/2019	08/01/2020	P1630	29	13,06
H2	29/08/2020	14/01/2021	P1225	29	11,94
H4	22/08/2019	04/01/2020	P1630	70	12,72
H4	25/08/2020	14/01/2021	AG 9025	70	14,10
K5	20/08/2019	09/01/2020	Dkb230	36	9,48
K5	31/07/2020	03/01/2021	AG9025	36	13,62
K6	17/08/2019	09/01/2020	Dkb230	48	10,08
K6	30/07/2020	03/01/2021	AG9025	48	13,26

Fonte: a autora (2022).

### 3.2. PROCESSAMENTO DOS DADOS

As imagens utilizadas são do sensor MSI/Sentinel-2, que apresenta resolução temporal de 5 dias e espacial de 10m nas bandas do azul (490nm), verde (560nm), vermelho (665nm) e infravermelho próximo (842nm), denominadas de B2, B3, B4 e B8, respectivamente.

Foram utilizadas 14 imagens MSI/Sentinel-2 com pouca ou nenhuma ocorrência de nuvens da região Noroeste do estado do Rio Grande do Sul, abrangendo o período de agosto de 2019 a fevereiro de 2020, o que corresponde à safra 2019/2020 e o período de agosto de 2020 a janeiro de 2021, que corresponde à safra 2020/2021. Para a região centro sul, foram utilizadas 11 imagens MSI/Sentinel-2 livres de nuvens ou com baixa incidência e abrangendo o período de agosto de 2019 a fevereiro de 2020, correspondendo à safra 2019/2020 e o período de outubro de 2020 a fevereiro de 2021, correspondendo à safra 2020/2021.

As imagens foram obtidas gratuitamente através do site do Copernicus Europe's Eyes on Earth (<https://www.copernicus.eu/en>). O software utilizado para processamento das imagens foi o QGIS versão 3.10.14 e para organização dos dados levantados foi utilizado o Microsoft Office Excel 2016. Realizou-se a conversão do *Digital Number* dessas imagens para valores de refletância no topo da atmosfera e a correção dos efeitos atmosféricos por meio de *plugins Sentinel* (Complemento de Classificação Semi-Automática – *Semi automatic classification plugin*). Foi escolhido esse método pela plataforma amigável para execução, pois não necessita de informações adicionais sobre a atmosfera do local, pois utiliza como base a imagem, e é um complemento do QGIS.

O plugin para conversão das imagens MSI/Sentinel-2 para valores de reflectância no topo da atmosfera realiza um cálculo simples que utiliza o valor de quantificação fornecido nos metadados (CONGEDO, 2017). Para a correção dos efeitos atmosféricos o *plugin* tem como base o *Dark Object Subtraction (DOS)* que é um grupo de correções atmosféricas baseadas na imagem, que apresenta como suposição básica, segundo Chaves 1996, que dentro da imagem alguns pixels estão em completa sombra e suas radiâncias são devido ao espelhamento atmosférico.

Foram adquiridas durante o cultivo do milho irrigado na safra 2019/2020 para a região Noroeste do estado do Rio Grande do Sul, município de Catuípe, um total de 5 imagens mesmo número para a safra 2020/2021, conforme apresentado na Tabela 6. Para a região centro-sul, município de Cachoeira do Sul, foram adquiridas para a safra 2019/2020 5 imagens e para a safra 2020/2021 um total de 2 imagens. O menor número de imagens adquiridas para a safra 2020/2021 no município de Cachoeira do Sul se deve à grande quantidade de nuvens nessa região, nos meses de agosto a outubro do ano de 2020, conforme está apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Datas das imagens coletadas do satélite MSI/Sentinel-2 das áreas localizadas nos municípios de Catuípe e Cachoeira do Sul para as safras 2019/2020 e 2020/2021.

<b>Catuípe</b>			
<b>Ano</b>	<b>Data</b>	<b>Ano</b>	<b>Data</b>
2019	29 de agosto	2020	22 de setembro
	28 de setembro		22 de outubro
	13 de outubro		21 de novembro
	17 de novembro		01 de dezembro
	22 de dezembro		21 de dezembro
<b>Cachoeira do Sul</b>			
2019	30 de setembro	2020	19 de outubro
	10 de outubro		18 de dezembro
	19 de novembro		
	04 de dezembro		
	24 de dezembro		

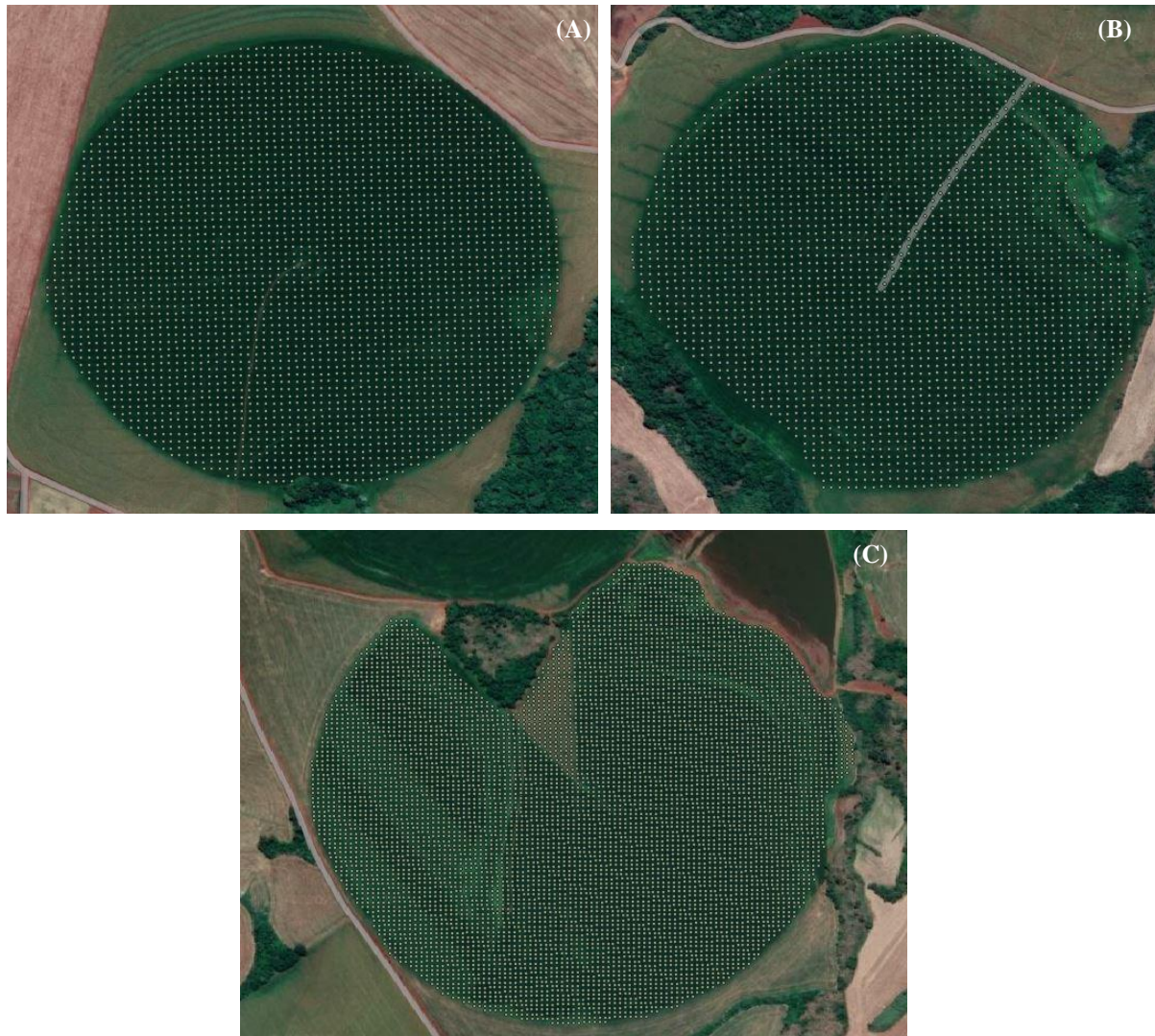
Fonte: a autora (2022).

### 3.3. DETERMINAÇÃO DOS ÍNDICES ESPECTRAIS DE VEGETAÇÃO

Após a realização do processamento inicial das imagens, foram realizadas operações algébricas com as diferentes bandas para os cálculos dos índices de vegetação. O objetivo é encontrar o índice que melhor se ajustasse à estimativa de produtividade do milho, e as propriedades espectrais da vegetação. Foram analisados quatro índices de vegetação para

verificar qual melhor se correlaciona com a estimativa de produtividade. Os índices foram avaliados em função dos pixels referentes a cada área do pivô conforme as Figuras 6 e 7:

Figura 6 - Distribuição dos pixels dentro das áreas de estudo da região noroeste



Nota – (A) 3.178 pixels presentes na grade de pontos dentro do pivô central do campo H1; (B) 2.772 pixels presentes na grade de pontos dentro do pivô central do campo H2; (C) 7.536 pixels presentes na grade de pontos dentro do pivô central do campo H4.

Fonte: a autora (2022).



Figura 7 - Distribuição dos pixels dentro das áreas de estudo da região centro-sul



Nota – (A) 3.384 pixels presentes na grade de pontos dentro do pivô central do campo K5; e (B) 4.770 pixels presentes na grade de pontos dentro do pivô central do campo K6.

Fonte: a autora (2022).

### 3.3.1. Cálculo do NDVI

O NDVI é um índice que quantifica a quantidade de clorofila nas folhas, representando a sazonalidade das culturas, fenologia, período de crescimento, mudanças fisiológicas das folhas e períodos de senescência da vegetação (PONZONI et al., 2012). Calculou-se o NDVI através da equação (Equação 1):

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} ; \quad NDVI = \frac{B8 - B4}{B8 + B4} \quad (1)$$

Onde a banda B8 corresponde à região do infravermelho próximo e a banda B4 corresponde à região do vermelho no sensor MSI/Sentinel-2.

### 3.3.2. Cálculo do SAVI

O SAVI foi projetado para minimizar os efeitos dos solos nas imagens, O SAVI foi calculado com a equação abaixo (Equação 2):

$$SAVI = \frac{[(\rho_{nir} - \rho_{red})(1+L)]}{[(\rho_{nir} + \rho_{red}) + L]} ; \quad SAVI = \frac{[(B8 - B4)(1+L)]}{B8 + B4 + L} \quad (2)$$

Onde B8 é a banda do infravermelho próximo e B4 é a banda do vermelho, O L é um fator de ajuste que apresenta a finalidade de minimizar o efeito do solo e depende da cobertura do solo pela vegetação, os valores variam de 0 a 1. De acordo com Huete (1988) utiliza-se 0,25 para altas densidades de vegetação, 0,5 para médias densidades e 1 para baixas densidades. Na



presente dissertação utilizou-se  $L=0,5$ , pois segundo Formaggio e Sanches (2017) é o valor mais utilizado e quanto mais próximo a 0 os valores se equivalem aos do NDVI, utiliza-se o  $L$  no valor 0,5, que é o valor médio que o dossel de milho apresenta durante o desenvolvimento, onde a equação utilizada está apresentada abaixo (Equação 3):

$$SAVI = \frac{[(1 + 0,5)(\rho_{nir} - \rho_{red})]}{\rho_{nir} + \rho_{red} + 0,5} \quad (3)$$

$$SAVI = \frac{[(1 + 0,5)(B8 - B4)]}{B8 + B4 + 0,5}$$

### 3.3.3. Cálculo do ARVI

Kaufman e Tanré (1992) propuseram um índice que minimiza os efeitos atmosféricos. Realiza uma autocorreção dos efeitos atmosféricos no canal do vermelho com base na diferença entre o vermelho e o azul. Conforme se observa na equação abaixo (Equação 4):

$$ARVI = \frac{(\rho_{nir} - (\rho_{red} - \gamma(\rho_{red} - \rho_{blue})))}{(\rho_{nir} + (\rho_{red} - \gamma(\rho_{red} - \rho_{blue})))}; \quad (4)$$

$$ARVI = \frac{(B8 - (B4 - 1(B4 - B2)))}{(B8 + (B4 - 1(B4 - B2)))}$$

Onde  $\gamma$  é o coeficiente gama e assume valor igual a 1,  $B8$  é a banda do infravermelho próximo,  $B4$  é a banda do vermelho e  $B2$  é a banda do azul.

### 3.3.4. Cálculo do EVI2

O que diferencia do EVI é a utilização de somente duas bandas para o cálculo, mas permanece similar ao EVI de três bandas, principalmente com relação aos efeitos atmosféricos serem insignificantes, com a qualidade de dados mantidas (JIANG et al., 2007). O EVI2 consegue destacar um pouco melhor as diferenças de sazonalidade dentro da lavoura, o que o torna mais eficiente do que o EVI. Também apresenta a vantagem da não utilização da banda azul, que apresenta problemas decorrentes dos efeitos atmosféricos. Autores como Paula et al. (2013) realizaram comparações entre o EVI e o EVI2 destacando a vantagem de utilizar o EVI2 ao invés do EVI em avaliações de pastagens.

O EVI2 pode variar de -1 a 1 e é calculado conforme a equação abaixo (equação 5):

$$EVI2 = 2,5 \left[ \frac{(\rho_{nir} - \rho_{red})}{(\rho_{nir} + 2,4 \rho_{red} + 1)} \right]; \quad EVI2 = 2,5 \left[ \frac{(B8 - B4)}{(B8 + 2,4 * B4 + 1)} \right] \quad (5)$$

Onde B8 é a banda do infravermelho próximo e B4 é a banda do vermelho.

### 3.4. ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE

As áreas de estudo são cinco lavouras comerciais, os dados de plantio como área (hectares), população de plantas por hectare, híbrido semeado, ciclo da cultura, data de semeadura e data de colheita de todas as áreas são apresentados na Tabela 7, utilizaram como espaçamento entre linhas de 0,45 m. As imagens dos índices de vegetação utilizadas no presente trabalho foram recortadas conforme os limites de cada pivô central, onde se realizou o levantamento dos valores máximo, médio e mínimo para cada imagem de cada área e a soma dos valores. Foram realizadas as análises das datas das imagens conforme a fenologia das áreas, onde obteve-se que as áreas que apresentavam maior número de imagens significativas para realizar a análise estatística estavam no estágio reprodutivo do milho. Foram realizadas as análises dos componentes principais, para agrupar os índices e a produtividade real conforme a variação de suas características.

Tabela 7 - Dados de semeadura das áreas em estudo

Pivô	Área (ha)	Plantas ha <sup>-1</sup>	Híbrido	Ciclo (dias)	Data semeadura	Data colheita
H1	31	75.000	P1630	134	28/08/2019	08/01/2020
H1	31	90.000	P1225	139	29/08/2020	14/01/2021
H2	29	75.000	P1630	133	29/08/2019	08/01/2020
H2	29	90.000	P1225	139	29/08/2020	14/01/2021
H4	70	78.000	P1630	136	22/08/2019	04/01/2020
H4	70	80.000	AG 9025	143	25/08/2020	14/01/2021
K5	36	80.000	Dkb230	143	20/08/2019	09/01/2020
K5	36	80.000	AG9025	157	31/07/2020	03/01/2021
K6	48	80.000	Dkb230	146	17/08/2019	09/01/2020
K6	48	80.000	AG9025	158	30/07/2020	03/01/2021

Fonte: a autora (2022).

Para a realização da análise da correlação dos índices de vegetação com produtividade foi obtido um total de 51 imagens, essas imagens foram divididas em quatro grupos, conforme os estádios da cultura. O primeiro grupo abrange os estádios V6 a V10, o segundo grupo os estádios R1 e R2, o terceiro grupo o estádio R4 e o quarto grupo o estádio R5. O intuito ao selecionar as imagens foi de obter os estádios mais próximos da floração para conseguir avaliar o período que tem maior relação com a produtividade do milho.

Na análise de correlação de Pearson, onde se identificou quais índices de vegetação, NDVI; SAVI; ARVI e EVI2 tem relação significativa com a produtividade real e quais os índices que se equivalem na estimativa de produtividade. Com esses dados foram realizadas análises de regressão estatística (linear simples), para os índices que apresentaram boa correlação a produtividade, com a produtividade real sendo a variável dependente e o índice de vegetação a variável independente para a fase reprodutiva do milho. Os dados das análises foram utilizados para determinação de quais índices de vegetação apresentaram correlação com a variação de produtividade.

Como o dado relativo à produtividade real depende totalmente do banco de dados dos produtores, o presente trabalho foi realizado com 2 produtores, totalizando 5 áreas irrigadas com pivô central. A análise relacionada aos diferentes tipos de solo e se eles influenciam na correlação dos índices de vegetação com a produtividade, foi realizada utilizando somente duas classes de solo, o solo argiloso e o solo franco arenoso.

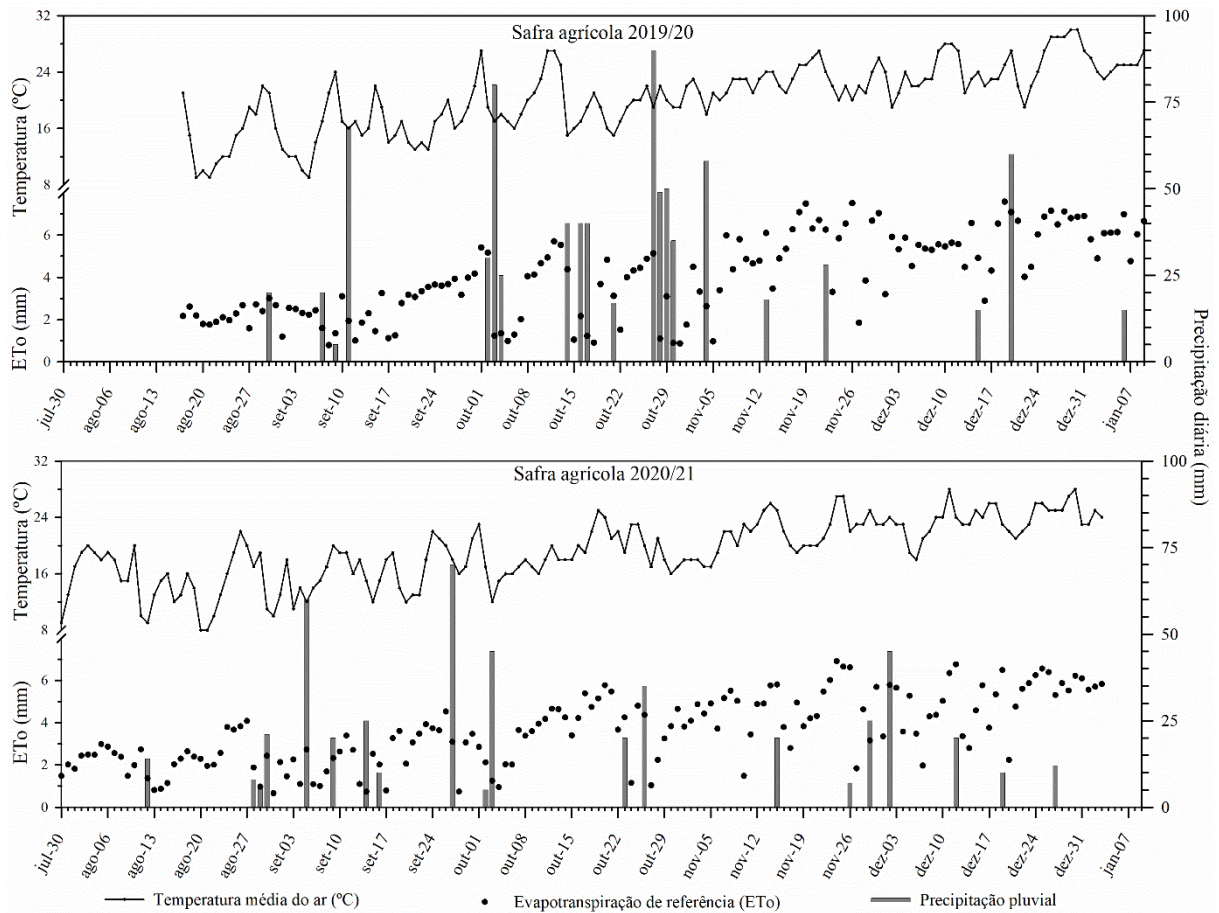
#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao iniciar a coleta de dados para o presente trabalho, no projeto inicial, haviam 13 produtores e um total de 48 campos. Com as limitações impostas nos últimos 2 anos, devido à pandemia do Coronavírus, não se teve acesso a algumas áreas para realização de análises “*in loco*” necessárias para o levantamento dos dados. Realizou-se uma análise dessa listagem inicial e desses 13 produtores constatou-se que 2 apresentam dados suficientes para realização do presente trabalho.

Para realizar as análises relacionadas à produtividade de culturas, inicialmente é feito o levantamento das variáveis meteorológicas para se obter o mapeamento de como foi a produção. Pois o clima está diretamente relacionado ao crescimento das culturas, na produtividade, no manejo da cultura, necessidade de água além de todo o planejamento das atividades agrícolas.

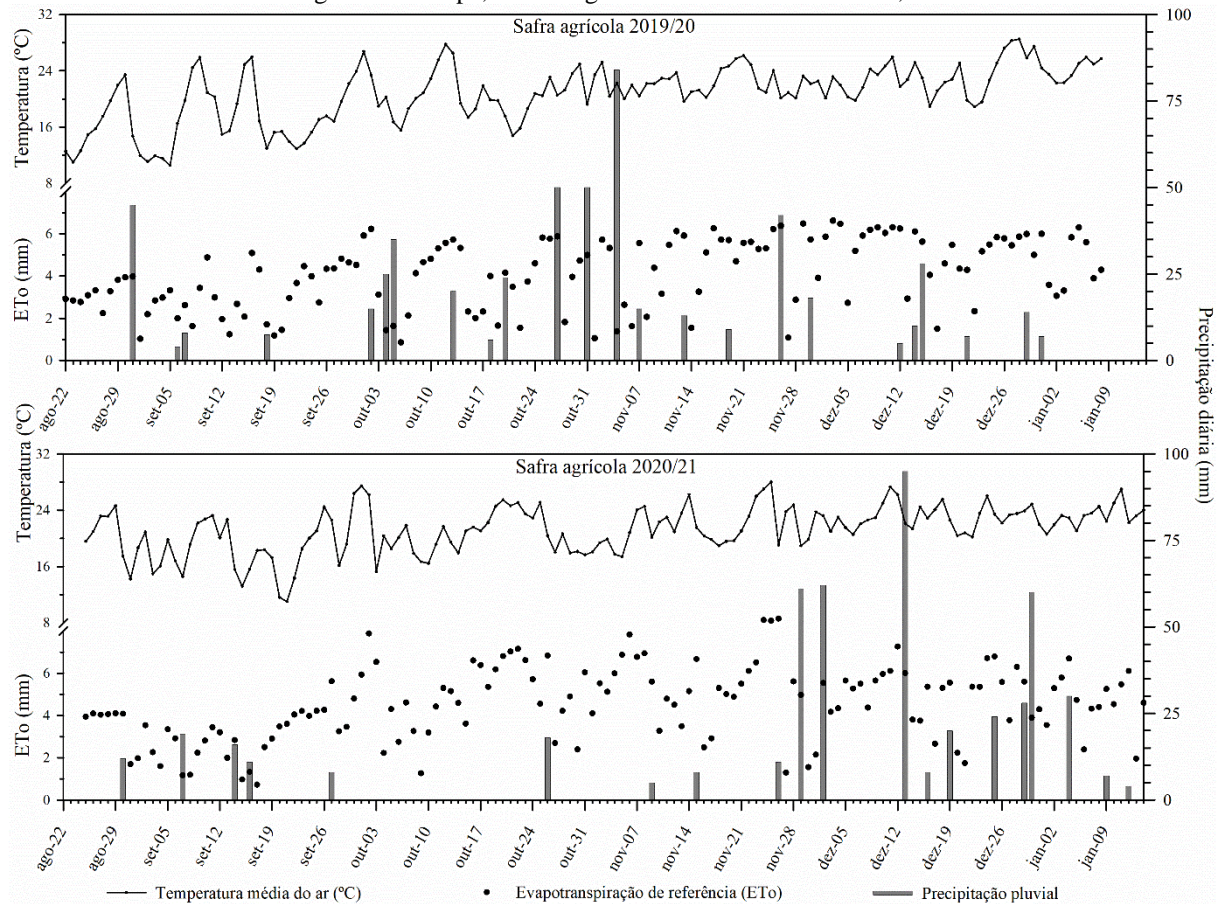
Nas Figuras 8 e 9 são apresentadas as variáveis meteorológicas diárias das áreas utilizadas para o estudo durante o cultivo do milho nos anos agrícolas 2019/20 e 2020/21 para as áreas situadas na região de Cachoeira do Sul e para as áreas situadas no município de Catuípe. Os dados foram coletados das estações meteorológicas de propriedade da Irriga Global, com exceção da precipitação, a qual foi registrada por pluviômetro instalado próxima a cada pivô de irrigação.

Figura 8 - Temperatura média do ar (°C), precipitação (mm), e evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) para as áreas situadas na região de Cachoeira do Sul, no ano agrícola de 2019/20 e 2020/21, Rio Grande do Sul



Fonte: a autora (2022).

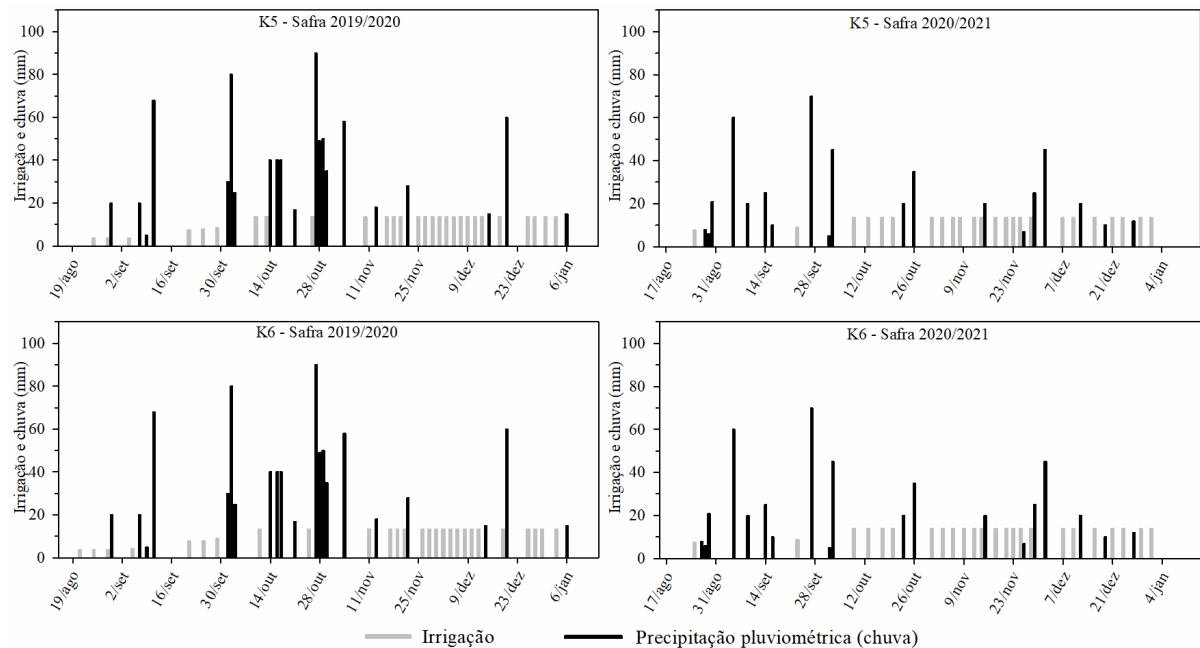
Figura 9 - Temperatura média do ar (°C), precipitação (mm), e evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) para as áreas situadas na região de Catuípe, no ano agrícola de 2019/20 e 2020/21, Rio Grande do Sul.



Fonte: a autora (2022).

Na região centro-sul, as áreas K, na safra 2019/20 a semeadura foi realizada no início da segunda quinzena de agosto, onde as chuvas se concentraram de setembro até o início de novembro, o que abrange desde a germinação até parte do período vegetativo da cultura, aproximadamente 12 folhas de milho isso ocasionou a utilização da irrigação para suprir a demanda da cultura por água no período reprodutivo, conforme se observa na Figura 10. Durante todo o ciclo da cultura choveu aproximadamente 803mm durante a safra 2019/20. Já na safra 2020/21, para as áreas centro-sul, em que a semeadura foi realizada no final de julho, o volume de chuva foi menor comparado ao ano anterior, totalizando aproximadamente 478 mm. Realizou-se irrigações para suprir a demanda da cultura durante todo o cultivo, desde a emergência até o período reprodutivo, como podemos observar na Figura 10.

Figura 10 - Irrigações realizadas nas áreas K5 e K6 para as safras 2019/20 e 2020/21

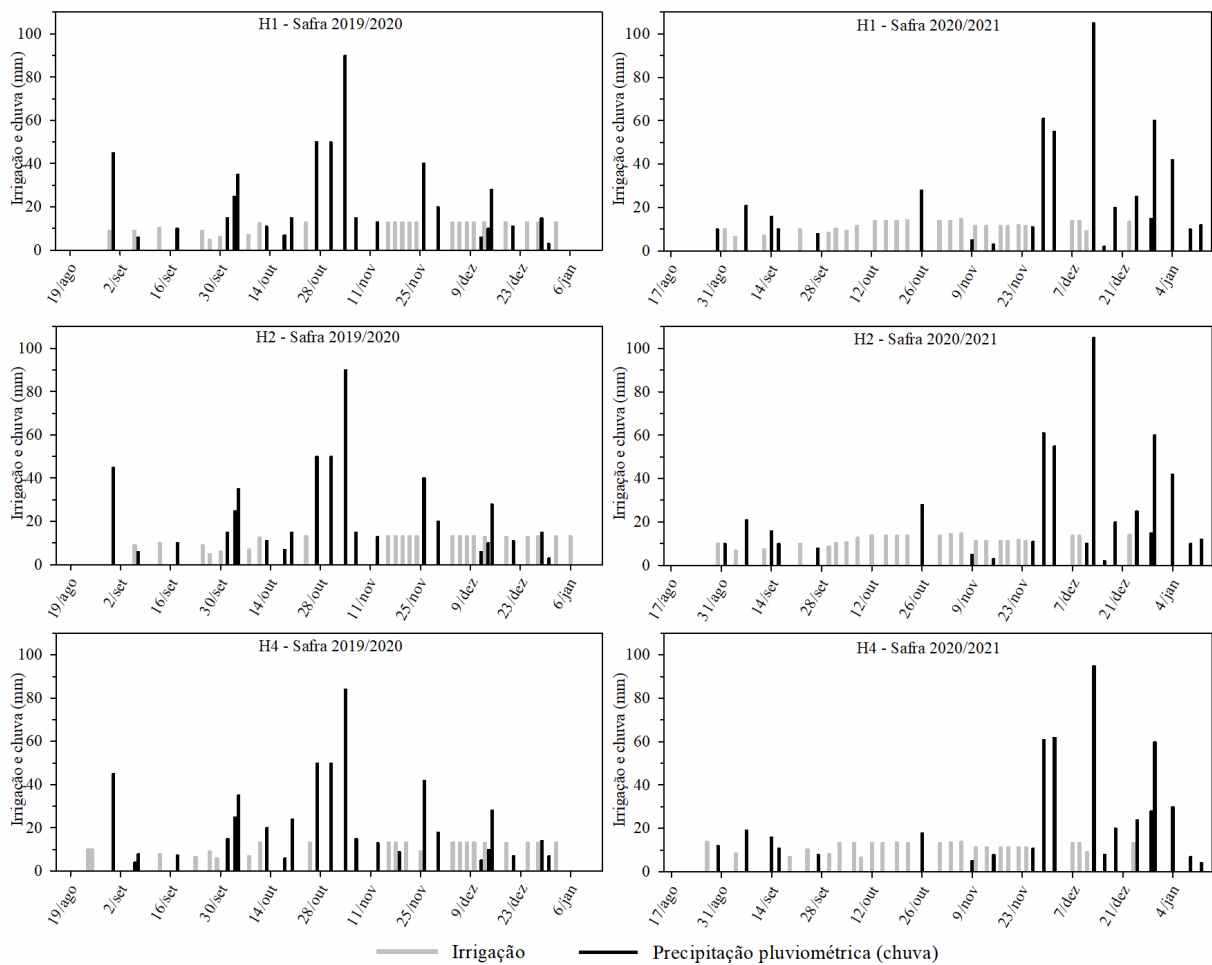


Fonte: a autora (2022).

Com relação à temperatura média diária na safra 2020/21 foi menor em relação à safra 2019/20, ano agrícola com ocorrência de frio intenso no mês de agosto que atingiu grande parte do país, ocasionando em quedas significativas da temperatura. Essa temperatura mais fria acarretou no prolongamento do ciclo do milho já que este se devolve através do acúmulo térmico.

Na região noroeste, áreas H, na safra 2019/20 e 2020/21 a semeadura ocorreu na segunda quinzena de agosto. As chuvas para as duas safras foram em torno de 500 a 550 mm. Ao analisar as precipitações da safra 2019/20 se observa que foram bem distribuídas ao longo do ciclo, necessitando de mais irrigações para suplementar água para as plantas durante o período reprodutivo do milho. Porém, durante a safra 2020/21 as chuvas foram concentradas na metade do estágio reprodutivo do milho até a maturação, necessitando de irrigação para suprir a necessidade do cultivo durante a fase vegetativa até o início do período reprodutivo, como visualizado na figura 11. Durante a fase vegetativa do milho ocorre a definição da produção potencial, do número de fileiras e do tamanho da espiga e no início da fase reprodutiva ocorre a polinização e a definição da densidade do grão, períodos muito importantes para a produtividade e que não podem ocorrer estresses, como a falta de água. A safra 2020/21 apresentou temperaturas menores se comparada com a safra 2019/20, porém como o milho nessa região foi semeado mais tarde, não afetou no acúmulo térmico para o desenvolvimento, mantendo o ciclo normal.

Figura 11 - Irrigações realizadas nas áreas H1, H2 e H4 para as safras 2019/20 e 2020/21



Fonte: a autora (2022).

Ao analisarmos a evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) tanto na Figura 8, com os dados da região das áreas K, como a Figura 9 com os dados da região H, nota-se que no início do cultivo, a ET<sub>o</sub> apresenta valores baixos, pois os dias são menores associados a inclinação solar, resultam em uma menor radiação solar incidente, que é o principal componente das estimativas da evapotranspiração. Nesse período a cultura apresenta pouca área foliar o que resulta em baixa evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>), com o aumento da área foliar a ET<sub>c</sub> vai aumentando, até o início da fase reprodutiva e consequente acúmulo de amido nos grãos de milho. Quando o cultivo começa a fase de maturação a tendência é a redução da evapotranspiração com a senescência das folhas.

Outras variáveis importantes que influenciam a ET<sub>c</sub> é a temperatura e as precipitações, temperaturas baixas tendem a levar a uma evapotranspiração menor se comparado a temperaturas mais altas e precipitações tendem a diminuir a evapotranspiração da cultura, pois



realizam o resfriamento das folhas, diminuindo as perdas para o meio, além de propiciar dias nublados. É de suma importância a análise desses fatores climáticos, chuva, evapotranspiração e temperatura do ar durante o cultivo, pois o milho se desenvolve através do acúmulo térmico. Conforme Bergonci (2001), Matzenauer (1994) e Bergamaschi et al. (2004, 2006) o período que o milho apresenta alta sensibilidade a deficiência hídrica ocorre durante a floração e o início do enchimento de grãos. Esse período do início da fase reprodutiva do milho é que ocorrem as maiores demandas da cultura devido a maior área foliar e necessidade de nutrientes para o desenvolvimento do grão.

Para o cálculo dos índices de vegetação foram adquiridas imagens desde a emergência da cultura até a maturação fisiológica. Porém para realizar a estimativa da produtividade através dos índices de vegetação utiliza-se imagens no período vegetativo, em torno de 9 a 12 folhas de milho e no período reprodutivo, em torno dos estádios R2/R3. Alguns autores relatam que o período crítico para determinar a produtividade do milho é aproximadamente 20 dias antes e 20 dias após o florescimento (JOHNSON, 2014; SAKAMOTO et al., 2014; PERALTA et al., 2016).

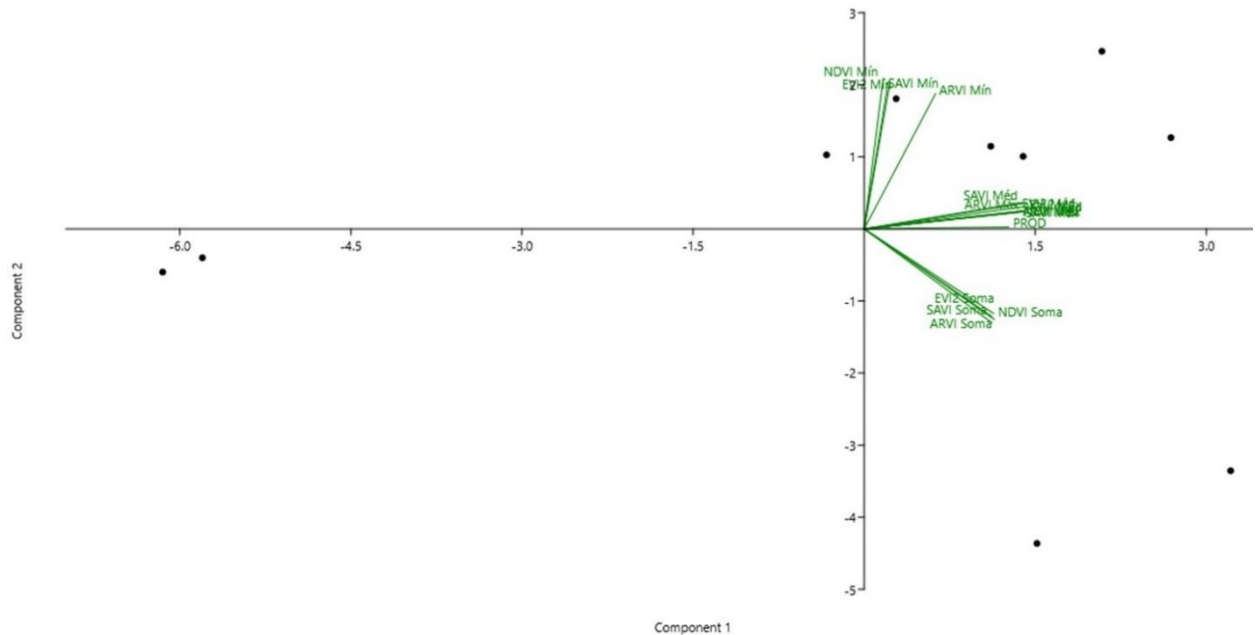
Para aquisição de imagens orbitais durante o ciclo de uma cultura o maior limitante para realização desses levantamentos é a presença de nuvens. Se observa isso ao verificar o número de imagens da região centro-sul e comparar com o número de imagens da região noroeste. A região noroeste, áreas H, apresentou uma maior quantidade de imagens se comparado com a região centro sul, áreas K, isso se deve a grande quantidade de nuvens presentes na região centro sul do estado principalmente na safra 2020/21, onde a primeira imagem, para as áreas estudadas, sem nuvens, foi a partir da segunda quinzena de outubro, dificultando a aquisição das imagens para avaliação.

Após a realização da divisão dos índices de vegetação por grupos em função do estágio da cultura foi realizada a análise de componentes principais, correlação de Pearson e a regressão linear para esses quatro grupos: V6-V10, R1-R2, R4, e R5. A realização da análise dos componentes principais é utilizada quando se tem um grande número de variáveis a serem estudadas, no presente trabalho utiliza-se quatro índices e mais a produtividade real, cada índice de vegetação foi avaliado o seu valor máximo, médio, mínimo e a soma o que tornam 16 variáveis relacionadas aos índices de vegetação que foram avaliadas.

Na análise dos componentes principais dos estádios V6 a V10, apresentados na Figura 12, se observa que os valores máximos e médios do NDVI, SAVI, ARVI e EVI2 apresentam alta correlação entre si e qualquer um pode ser utilizado na estimativa da produtividade, já que estão próximos e na mesma direção. Os valores mínimos do NDVI, SAVI e EVI2 são próximos

apresentando alta correlação entre si, somente o valor mínimo de ARVI, não se correlaciona com eles, porém se localizam no mesmo quadrante da produtividade. Os valores da soma do NDVI, SAVI, ARVI e EVI2 diminuem conforme aumenta a produtividade, não podendo ser utilizado para estimativas de produtividade.

Figura 12 - Análise dos componentes principais quando a cultura apresenta estádios entre V6 a V10, para os índices NDVI, SAVI, ARVI, EVI2 e a produtividade real do campo

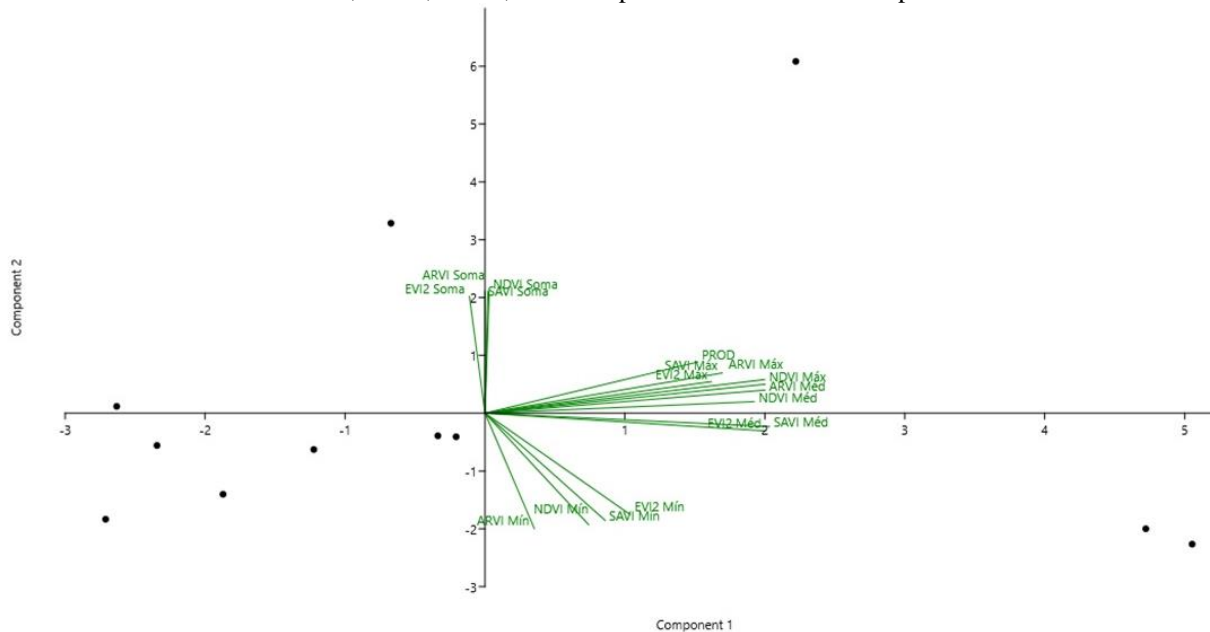


Fonte: a autora (2022).

Os estádios R1/R2 apresentam os mesmos resultados se comparado aos estádios V6 a V10, conforme se observa na Figura 13, onde os índices máximos do NDVI, SAVI, ARVI e EVI2 podem ser usados na estimativa de produtividade, porém somente os valores médios do NDVI e do ARVI apresentam mesma correlação com a produtividade, o SAVI e o EVI2, estão próximos desses índices, porém diminuindo conforme os índices e a produtividade aumentam, o que difere do resultado anterior. Com relação aos valores mínimos de NDVI, SAVI, ARVI e EVI2 eles se justificam entre si, porém diminuem à medida que a produtividade aumenta, não justificando sua utilização nas estimativas da produtividade. E os valores de soma dos índices NDVI, SAVI e ARVI aumentam verticalmente à medida que a produtividade aumenta horizontalmente, não justificando sua utilização. O EVI2 soma apresenta uma tendência diferente dos demais valores da soma dos índices, não se correlacionando, pertencendo a outro quadrante. Os valores mínimo e soma são o oposto do que se encontra no estágio de V6 a V10, onde nestes estádios os valores mínimos aumentam verticalmente, no estágio R1/R2 eles

diminuem e o a soma dos valores diminuem nos estádios V6 a V10, enquanto em R1/R2 elas aumentam verticalmente.

Figura 13 - Análise dos componentes principais quando a cultura apresenta estágio R1/R2, para os índices NDVI, SAVI, ARVI, EVI2 e a produtividade real do campo

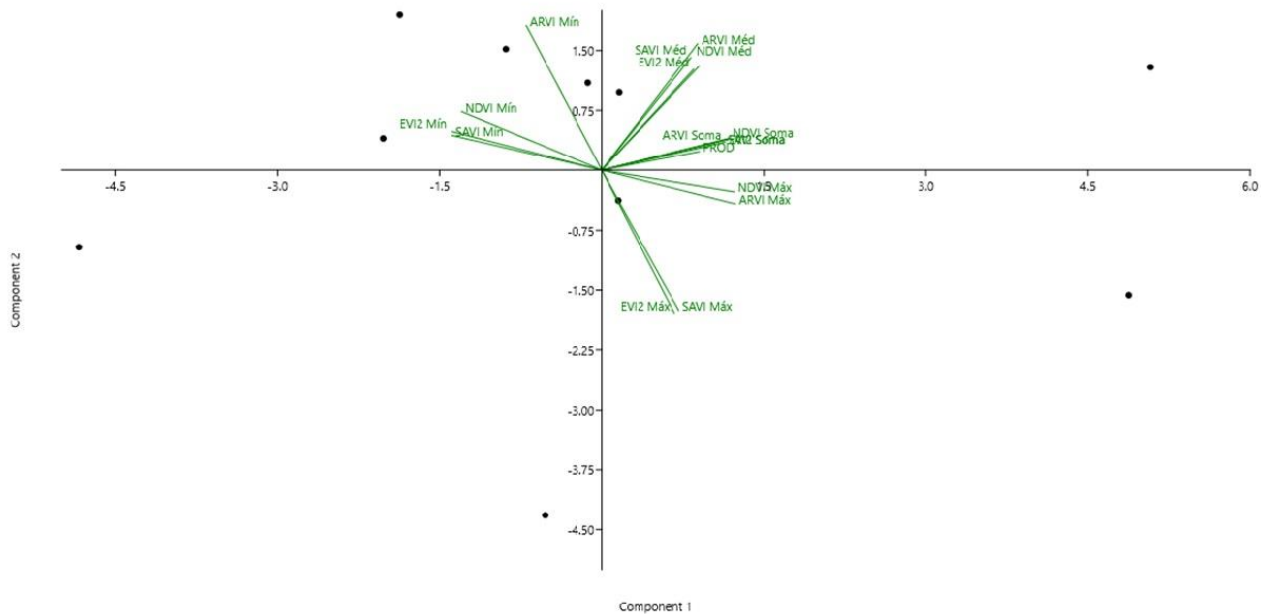


Fonte: a autora (2022).

Na análise dos componentes principais para o estágio R4 se encontram resultados totalmente diferentes divergentes dos encontrados nos estádios de V6 a V10 e R1/R2, como está apresentado na Figura 14, ou seja, pouca correlação. Os valores da soma dos resultados dos índices NDVI, SAVI, ARVI e EVI2 se correlacionam entre si e com a produtividade, justificando o seu uso nas estimativas de produtividade. Já os valores médios do NDVI e ARVI se correlacionam entre si, assim como o SAVI e o EVI2, porém não apresentam correlação com a produtividade. Os valores mínimos do SAVI e do EVI2 apresentam correlação entre si, porém não apresentam correlação com a produtividade, pois à medida que a produtividade aumenta eles tendem a diminuir. Os índices NDVI e ARVI mínimo não apresentam nenhum tipo de correlação. Os valores máximos do NDVI e do ARVI se correlacionam entre si assim como do SAVI e EVI2, porém nenhum dos quatro apresentam correlação com a produtividade, pois à medida que ela aumenta eles tendem a diminuir.

Com esses resultados demonstra-se que na fenologia só tem relação dos índices de vegetação com a produtividade para a soma dos valores de cada índice, isso pode ser devido aos processos fisiológicos que envolvem a cultura do milho, em que no estágio R4 começa a diminuir o vigor da planta e conseqüente diminuição dos valores dos índices de vegetação.

Figura 14 - Análise dos componentes principais quando a cultura apresenta estágio R4, para os índices NDVI, SAVI, ARVI, EVI2 e a produtividade real do campo

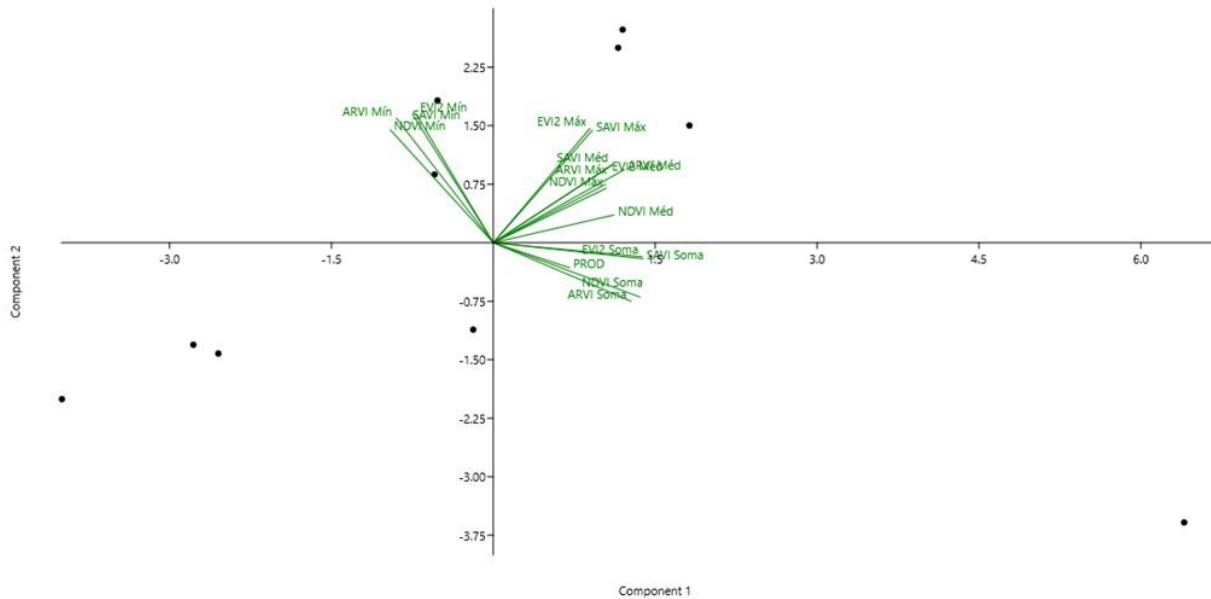


Fonte: a autora (2022).

Seguindo a mesma linha da discussão anterior, a análise de componentes principais para o estágio R5, como se observa na Figura 15. A produtividade apresenta alta correlação somente com a soma dos valores do NDVI e do ARVI, enquanto o SAVI e o EVI2 se correlacionam entre si, porém, não justificam a produtividade. Os valores médios do SAVI, ARVI e EVI2 junto com os valores médios de NDVI e SAVI apresentam correlação entre si, porém não se correlacionam com a produtividade. Os valores máximos de SAVI e EVI2 apresentam alta correlação entre si e os valores médios de NDVI não se correlacionam. Já os valores mínimos de SAVI e EVI2 se correlacionam entre si enquanto o NDVI e o ARVI não apresentam correlação.

Este estágio segue a mesma tendência do R4, porém apresentando características mais acentuadas dos processos fisiológicos do milho, as folhas estão senescendo e os grãos finalizando a maturação, a característica espectral da cultura começa a se alterar. As plantas fotossinteticamente ativas absorvem a energia eletromagnética na região do vermelho e refletem muito na região do verde e do infravermelho próximo (NIR), já quando a cultura começa a atingir a maturação fisiológica e senescer a cultura começa a refletir a região do vermelho e do infravermelho médio (SWIR).

Figura 15 - Análise dos componentes principais quando a cultura apresenta estágio R5, para os índices NDVI, SAVI, ARVI, EVI2, NDWI e a produtividade real do campo



Fonte: a autora (2022).

Ao realizar a análise da correlação de Pearson para as áreas dos estádios vegetativos de V6 a V10, Tabela 8, os valores máximo, médio e soma do NDVI, SAVI, ARVI e EVI2 apresentaram relação significativa com a produtividade. Os índices que expressam uma correlação positiva mais forte com a produtividade foram o ARVI máximo e médio, respectivamente 0,86 e 0,85 seguidos do NDVI máximo e médio com correlação de 0,84 e 0,83 respectivamente. Na sequência encontra-se o SAVI e EVI2 máximo com 0,80 e 0,79 de correlação; o SAVI e o EVI2 médio apresentam respectivamente correlação 0,78 e 0,76; o NDVI e o ARVI soma 0,73 e 0,72, respectivamente, de correlação com a produtividade. E para finalizar com uma correlação 0,70 encontra-se o SAVI e EVI2 soma.

Comparando o NDVI e o EVI2, os resultados encontrados diferem com o que Bolton e Friedl (2013) encontraram pois para o milho o EVI2 é mais efetivo para a estimativa de produtividade que o próprio NDVI, mas para a soja eles não diferem.

Os únicos valores apresentam uma correlação baixa com a produtividade são os valores mínimos do NDVI, SAVI, ARVI e EVI2, isso se deve ao fato de que durante os estádios V6 a V10 a cultura está em plena atividade fotossintética, com os valores dos índices aumentando gradativamente e se aproximando de valores próximos a 1. Entre os estádios V6 e V10, a planta de milho está com o seu potencial produtivo definido e está ocorrendo a definição do número de fileiras de grãos na espiga isso pode explicar a alta correlação dos índices com a produtividade.

Durante os estádios iniciais de desenvolvimento da cultura, ocorrem importantes processos fisiológicos nas plantas, como diferenciação do pendão e da espiga e a definição do número de óvulos na espiga.

Tabela 8 - Correlação de Pearson, intensidade e significância das áreas nos estádios V6 a V10

	Produtividade	
	Intensidade	Significância
NDVI Máx	0,84	0,00
NDVI Mín	0,16	0,66
NDVI Méd	0,83	0,00
NDVI Soma	0,73	0,02
EVI2 Máx	0,79	0,01
EVI2 Mín	0,17	0,63
EVI2 Méd	0,76	0,01
EVI2 Soma	0,70	0,02
SAVI Máx	0,80	0,01
SAVI Mín	0,16	0,65
SAVI Méd	0,78	0,01
SAVI Soma	0,70	0,03
ARVI Máx	0,86	0,00
ARVI Mín	0,42	0,23
ARVI Méd	0,85	0,00
ARVI Soma	0,72	0,02

Nota – Intensidade: Valores acima de 0,5 apresentam uma intensidade maior na correlação entre os índices e a produtividade. Valores da significância: P superiores a 0,050, não há relação significativa entre as duas variáveis. Fonte: a autora (2022).

Ao realizar a análise da correlação de Pearson para os estádios R1/R2, Tabela 9, o SAVI máximo apresenta a relação mais forte com a produtividade, com valor de 0,82, na sequência o ARVI máximo apresenta valor de 0,79. Esses índices indicam uma correlação mais forte com a produtividade, pois são índices melhorados, que apresentam correções para solo e atmosfera, respectivamente. Na sequência o NDVI máximo e o EVI2 máximo apresentaram uma boa correlação positiva, apresentando 0,73 e 0,71 respectivamente, conforme apresentado na Figura 13.

Com relação aos valores máximos apresentarem maior correlação com a produtividade quando a cultura está em estágio R1/R2 é devido a que nesses estágios a cultura apresenta seu máximo vigor, o SAVI e o ARVI apresentam uma melhor correlação com a produtividade se comparado ao NDVI, pois este índice tende a saturar quando a cultura apresenta o seu máximo vigor, este é um ponto importante desse índice, pois esta característica termina diminuindo a detecção de possíveis diferenças no desenvolvimento das plantas. O aumento da área foliar aumenta a reflectância da cultura e conseqüentemente os valores de NDVI, o que pode levar a

saturação desse índice (OLIVEIRA, 2017). Quando ocorre a estabilização do acúmulo de biomassa da cultura do milho é que ocorre a saturação do NDVI (ZANZARINI et al., 2013).

Tabela 9 - Correlação de Pearson, intensidade e significância das áreas nos estádios R1/R2

	Produtividade	
	Intensidade	Significância
NDVI Máx	0,01	0,73
NDVI Mín	1,00	0,00
NDVI Méd	0,08	0,54
NDVI Soma	0,29	0,35
EVI2 Máx	0,02	0,71
EVI2 Mín	0,87	0,06
EVI2 Méd	0,06	0,59
EVI2 Soma	0,42	0,27
SAVI Máx	0,00	0,82
SAVI Mín	0,94	-0,03
SAVI Méd	0,05	0,60
SAVI Soma	0,28	0,36
ARVI Máx	0,00	0,79
ARVI Mín	0,83	-0,07
ARVI Méd	0,02	0,68
ARVI Soma	0,29	0,35

Nota – Intensidade: Valores acima de 0,5 apresentam uma intensidade maior na correlação entre os índices e a produtividade. Valores da significância: P superiores a 0,050, não há relação significativa entre as duas variáveis. Fonte: a autora (2022).

Para o estádio R4, Tabela 10, a correlação de Pearson apresenta correlação significativa da produtividade com os índices NDVI, SAVI e EVI2 médio. O NDVI é um dos índices mais usados para estimativas de produtividade, devido ser o índice mais antigo e conhecido e é de fácil utilização, porém apresenta como problema a saturação quando a cultura atinge o seu máximo vigor. Já o SAVI é um índice de vegetação que apresenta correção relacionada ao solo, com a eliminação dos efeitos do solo se tem uma visão mais real da situação, principalmente quando a área foliar não cobre totalmente o solo. O EVI2 é um índice que minimiza a influência do solo e da atmosfera, é sensível a variação na estrutura do dossel, incluindo o índice de área foliar, fisionomia da planta e arquitetura do dossel (JIANG et al., 2008).

Ao analisar detalhadamente, no estádio R4, o NDVI médio tem maior correlação com a produtividade, 0,71, seguido do EVI2 médio com 0,64 e do SAVI médio com 0,61. Vários trabalhos demonstram a relação do NDVI com a produtividade, pode-se citar modelos de estimativa de rendimento de grãos (PRASAD et al., 2006; BASTIAANSSEN e ALI, 2003), estimativa de coeficientes basais de cultivo e evapotranspiração de milho (CAMPOS et al., 2017) e estimativa da produtividade da água, biomassa e rendimento de grãos de milho e soja

(CAMPOS et al., 2018), o que compactua com a intensidade da relação dele com a produtividade real. O EVI2 e o SAVI apresentaram valores de correlação bem próximos, o primeiro, segundo JIANG et al., (2008), pode revelar diferentes dinâmicas da vegetação, especialmente quando as reflectâncias do vermelho são baixas enquanto o SAVI foi criado para diminuir o efeito do solo sobre diferentes densidades de cobertura vegetal. Diversos trabalhos foram realizados utilizando o SAVI, como o de Borrato e Gomide (2013) que enfatizaram a influência do solo exposto, principalmente no período seco.

Os demais índices apresentaram uma correlação fraca com a produtividade, isso ocorre devido aos processos fisiológicos da cultura. No estádio R4 os processos fisiológicos estão voltados para a deposição do amido no grão e o vigor da planta não se apresenta mais no ápice. Conforme alguns autores relatam o período ideal para realizar a estimativa da produtividade utilizando imagens de satélite se encontra em torno dos estádios V8 a V14 e R2 a R3 dependendo do tipo de híbrido. Conforme os autores Johnson e Mueller, 2010; Peralta et al., 2016; Sakamoto et al., 2014 o período crítico para determinação do rendimento do milho é em torno de 20 dias antes da floração e 20 dias após a floração.

Tabela 10 - Correlação de Pearson, intensidade e significância das áreas nos estádios R4

	Produtividade	
	Intensidade	Significância
<b>NDVI Máx</b>	0,37	0,29
<b>NDVI Mín</b>	-0,44	0,20
<b>NDVI Méd</b>	0,71	0,02
<b>NDVI Soma</b>	0,36	0,30
<b>EVI2 Máx</b>	0,40	0,25
<b>EVI2 Mín</b>	-0,43	0,21
<b>EVI2 Méd</b>	0,64	0,05
<b>EVI2 Soma</b>	0,37	0,30
<b>SAVI Máx</b>	0,42	0,23
<b>SAVI Mín</b>	-0,42	0,22
<b>SAVI Méd</b>	0,61	0,06
<b>SAVI Soma</b>	0,36	0,31
<b>ARVI Máx</b>	0,37	0,29
<b>ARVI Mín</b>	-0,46	0,18
<b>ARVI Méd</b>	0,47	0,17
<b>ARVI Soma</b>	0,32	0,37

Nota – Intensidade: Valores acima de 0,5 apresentam uma intensidade maior na correlação entre os índices e a produtividade. Valores da significância: P superiores a 0,050, não há relação significativa entre as duas variáveis. Fonte: a autora (2022).



Ao analisar a relação dos índices de vegetação com a produtividade quando a cultura apresenta estágio R5, Tabela 11, nota-se que na correlação de Pearson nenhum dos índices apresenta relação significativa com a produtividade, isso ocorre porque a cultura está nesse estágio, os grãos já estão duros, com alta concentração de amido e a planta já não apresenta alto vigor vegetativo pois as folhas estão no processo de senescência onde a maioria da radiação eletromagnética da região do visível ou infravermelho próximo está sendo absorvida e muito pouco refletida. Com esse processo fisiológico ocorrendo no milho, os índices de vegetação que determinam o vigor da planta e auxiliam na estimativa da produtividade não conseguem apresentar dados robustos para realizar essa relação. Se analisar o quadro da intensidade da relação, o máximo que apresenta resultados, porém não significativos, foi no SAVI soma e no EVI soma, ambos com 0,48, que indica uma correlação pequena com a produtividade, comprovando o que foi explanado com relação aos processos fisiológicos do milho.

Tabela 11 - Correlação de Pearson, intensidade e significância das áreas nos estádios R5.

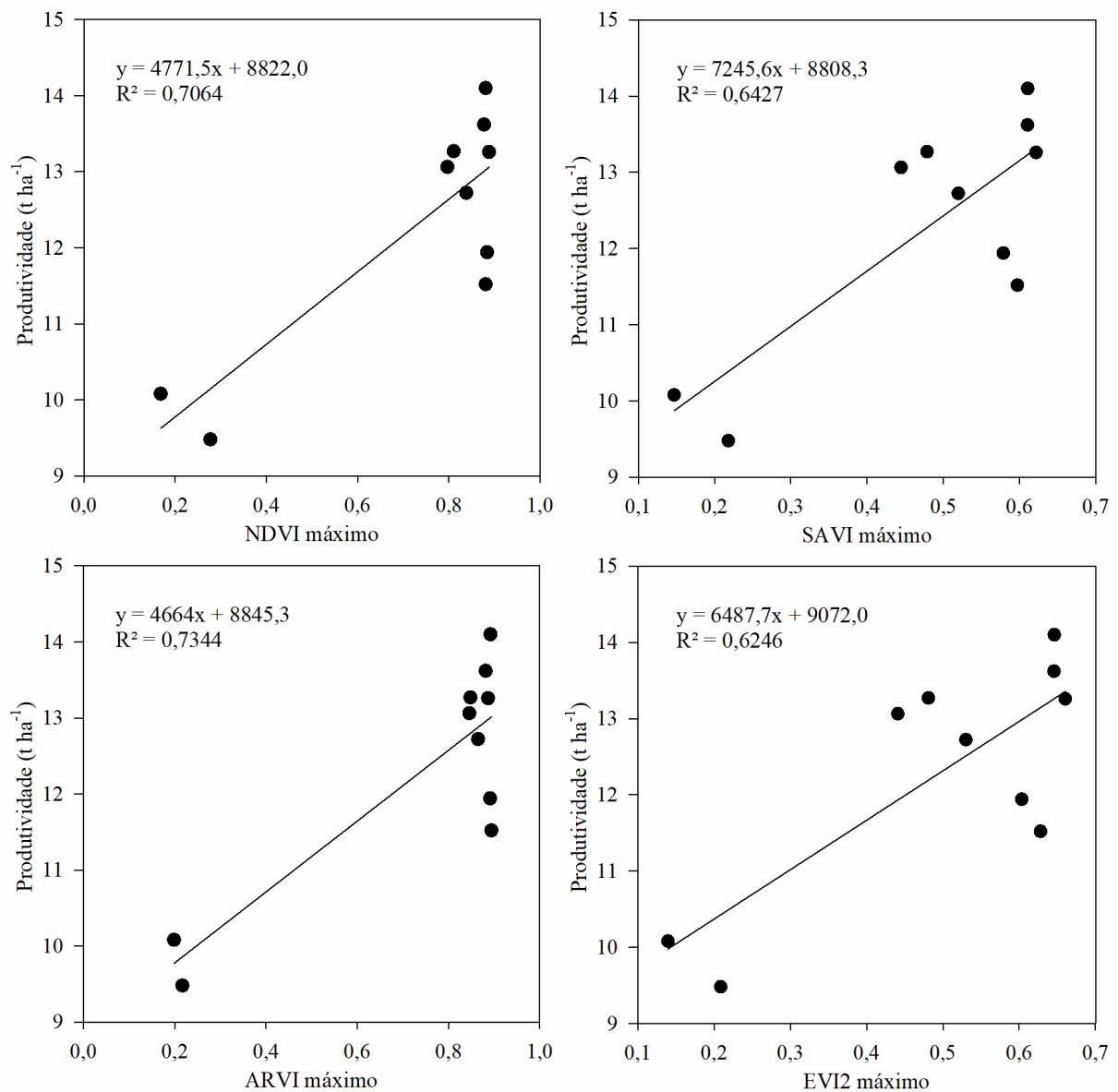
	Produtividade	
	Intensidade	Significância
NDVI Máx	0,20	0,59
NDVI Mín	-0,45	0,20
NDVI Méd	0,13	0,72
NDVI Soma	0,34	0,34
EVI2 Máx	-0,03	0,94
EVI2 Mín	-0,25	0,49
EVI2 Méd	0,37	0,30
EVI2 Soma	0,48	0,16
SAVI Máx	0,00	0,99
SAVI Mín	-0,26	0,47
SAVI Méd	0,36	0,30
SAVI Soma	0,48	0,16
ARVI Máx	0,33	0,35
ARVI Mín	-0,30	0,41
ARVI Méd	0,43	0,22
ARVI Soma	0,43	0,21

Nota – Intensidade: Valores acima de 0,5 apresentam uma intensidade maior na correlação entre os índices e a produtividade. Valores da significância: P superiores a 0,050, não há relação significativa entre as duas variáveis. Fonte: a autora (2022).

Após a realização da correlação de Pearson foi realizada a regressão linear da relação da produtividade com os índices NDVI, SAVI, ARVI e EVI2, para os índices que em cada estágio da cultura apresentaram correlação significativa.

A Figura 16 apresenta a regressão linear para os estádios V6 a V10 com os valores máximos dos índices de vegetação. Se observa que os índices que obtiveram maior coeficiente de determinação foram o ARVI com 0,73 e o NDVI com 0,70 seguidos do SAVI e EVI2 que apresentam respectivamente 0,64 e 0,62. Conforme mencionado anteriormente os valores máximos dos índices de vegetação, se comparados com os valores médios e mínimos, são significativos, porque o vigor da planta está diretamente relacionado à produtividade, como a cultura, nesses estádios vegetativos, ainda não está no seu ápice de vigor, com a área foliar ainda em desenvolvimento, não cobrindo todo o solo, a tendência é os maiores valores dos pixels se relacionarem melhor com a produtividade.

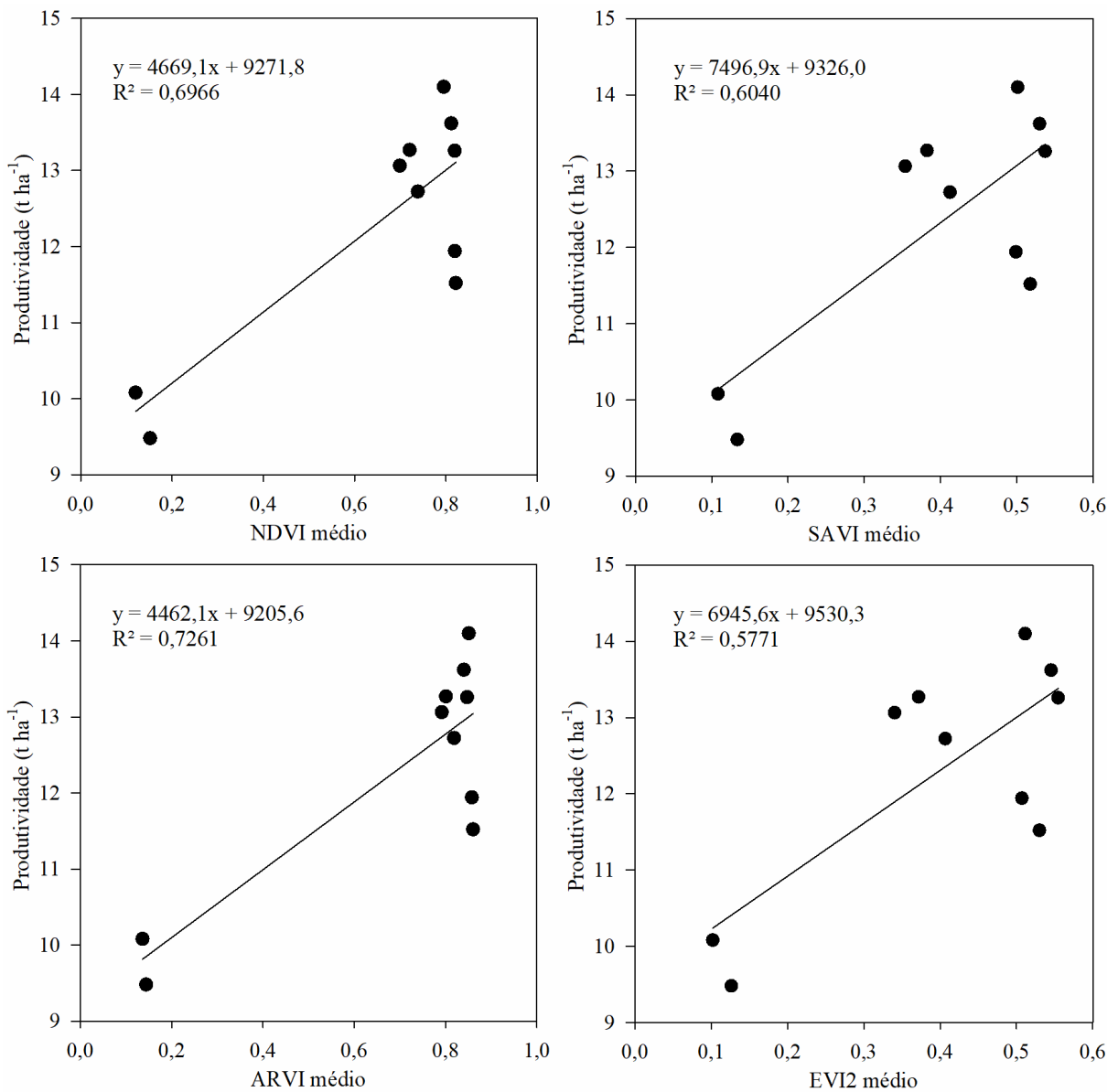
Figura 16 - Regressão linear da relação da produtividade com os índices de vegetação máximo do NDVI, SAVI, ARVI e EVI2 para áreas em estádios de V6 a V10



Fonte: a autora (2022).

A Figura 17 apresenta as regressões lineares dos índices com relação à produtividade para os valores médios. Os mesmos índices ARVI, NDVI, SAVI e EVI2, que apresentaram bons coeficientes de determinação para os valores máximos, obtiveram resultados satisfatórios para os valores médios, apresentando respectivamente valores de  $R^2$  0,73; 0,70; 0,60; e 0,58. Ao analisar o período que as áreas se encontravam em estádios de V6 a V10, durante o mês de outubro, na safra 2019/20 ocorreram volumes consideráveis de precipitação, o que pode ocasionar presença de nuvens nas imagens. Um dos grandes problemas dos levantamentos de imagens de satélite é a presença de nuvens, que terminam interferindo na aquisição de imagens.

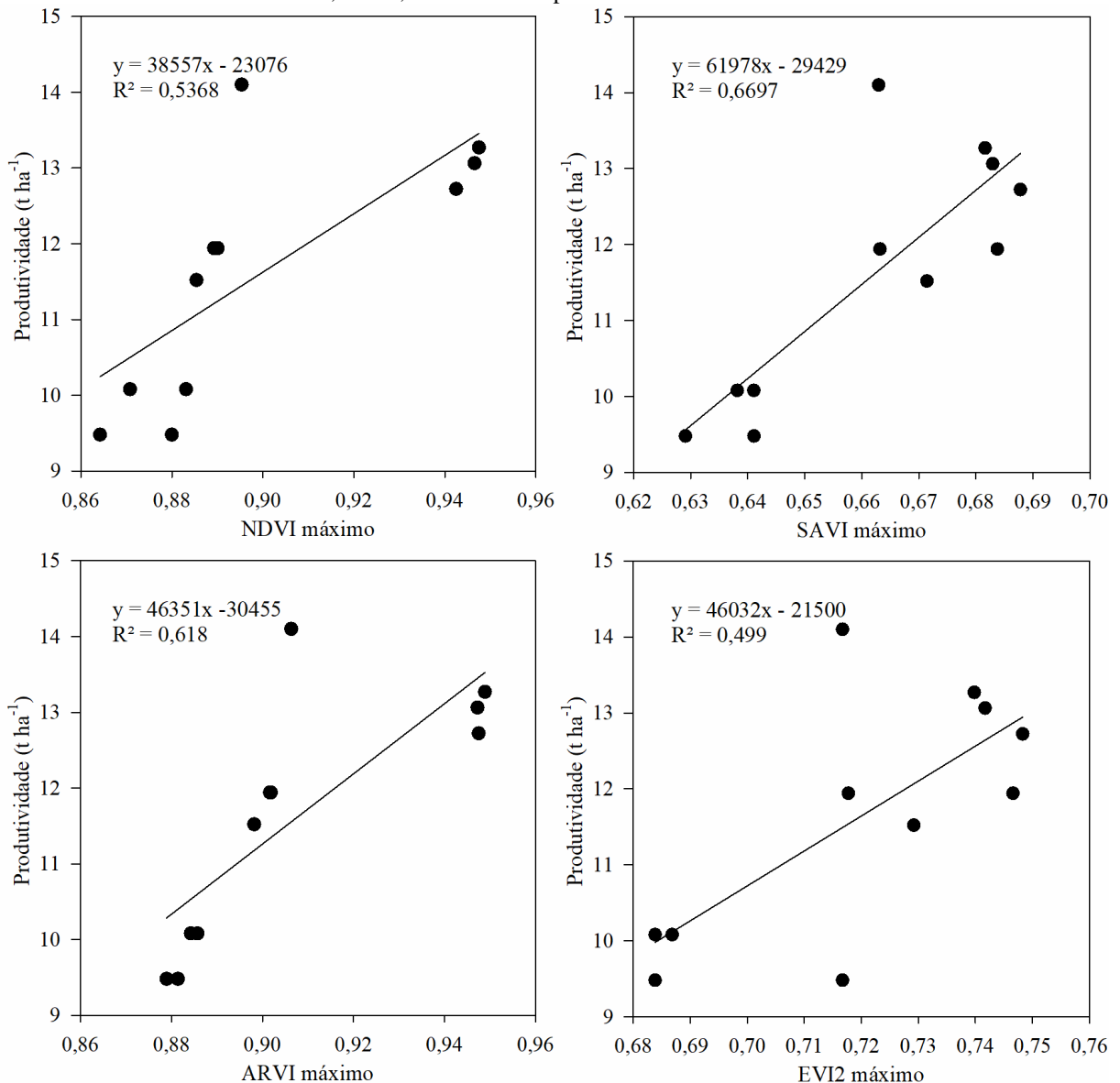
Figura 17 - Regressão linear da relação da produtividade com os índices de vegetação médio do NDVI, SAVI, ARVI e EVI2 para áreas em estádios de V6 a V10



Fonte: a autora (2022).

Nos estádios R1/R2, Figura 18, os maiores desempenhos do coeficiente de determinação foram o SAVI máximo com  $R^2$  0,67, ARVI máximo 0,62 seguidos do NDVI máximo 0,54 e EVI2 máximo 0,50. O desempenho dos valores máximos e não dos valores médios durante os estádios R1 e R2 ocorre devido a que nesse período a cultura apresenta seu ápice de vigor. Com isso os valores máximos dos índices se aproximam a 1, que é o indicativo de máximo vigor da cultura. Com relação ao SAVI e o ARVI apresentar maior coeficiente de determinação, podendo serem utilizados na estimativa de produtividade, ocorre devido as correções que esses índices realizam. Por mais que a cultura esteja com uma boa cobertura do solo, o milho é uma planta que apresenta folhas alternadas dísticas, nas áreas em estudos a cultura foi semeada com espaçamentos entre linhas de 0,45m o propicia a algumas partes do solo ficarem expostas, o que pode justificar o desempenho do SAVI. Com relação a desenvoltura do ARVI, na safra 2020/21 no período em que a cultura apresenta estádios R1/R2, em torno de novembro/dezembro, ocorreu volumes consideráveis de chuvas, o que ocasionou em períodos com nebulosidades.

Figura 18 - Regressão linear da relação da produtividade com os índices de vegetação máximo e médio do NDVI, SAVI, ARVI e EVI2 para áreas em estádios de R1/R2

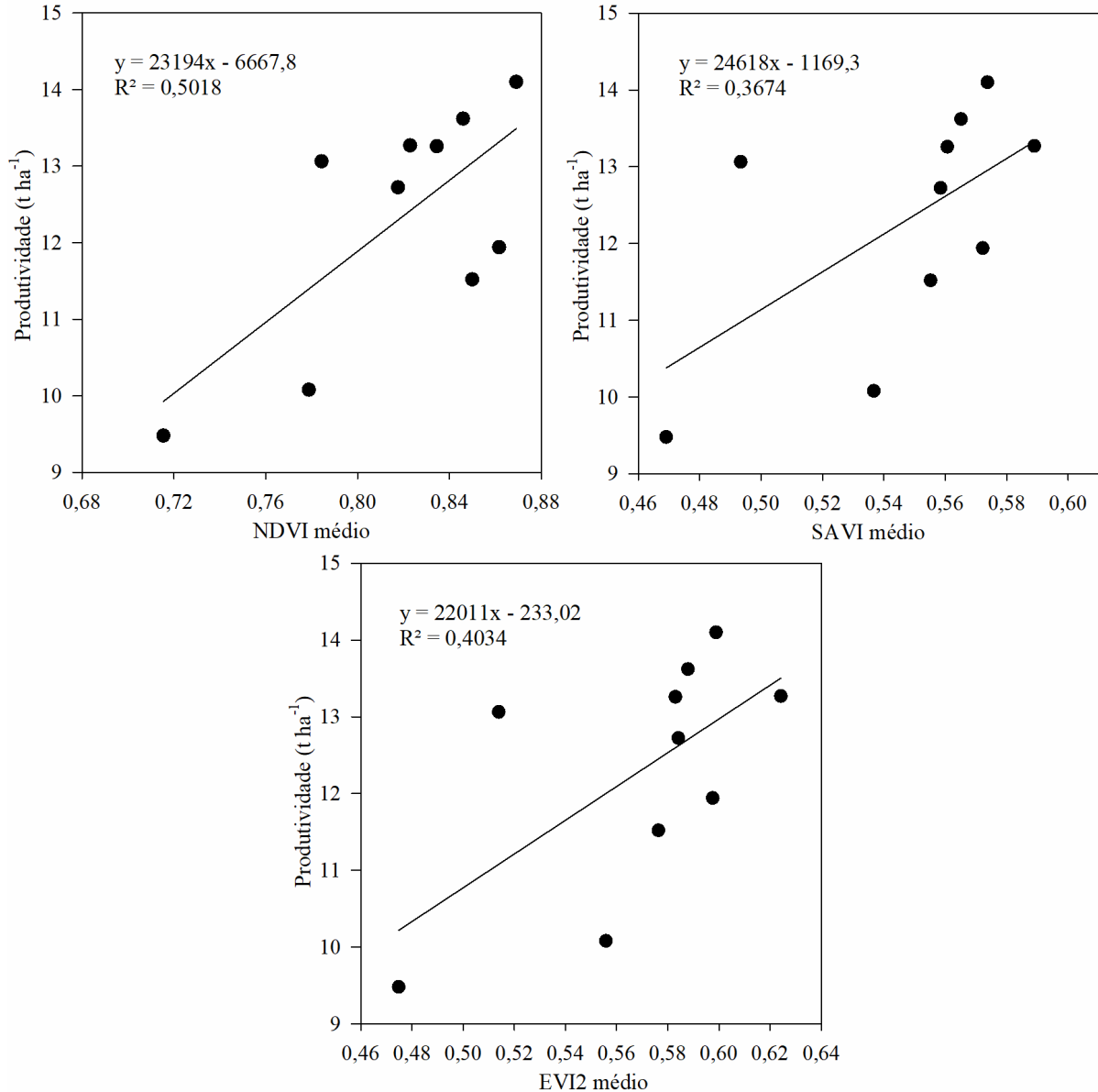


Fonte: a autora (2022).

Quando a regressão linear é realizada para a área em R4, Figura 19, encontram-se os valores médios dos índices com coeficientes de determinação explicitando a relação com a produtividade para esse estágio da cultura. Os índices que apresentaram relação significativa com a produtividade foram o NDVI com  $R^2$  0,50 seguido do EVI2 médio com 0,40 e SAVI médio com valor de  $R^2$  0,37. Ao comparar esses coeficientes de determinação com os encontrados nos outros estádios, eles se apresentam com valores baixos. Isso ocorre porque em R4 a cultura já começa a partir para a parte final de maturação, onde o objetivo da planta é armazenar amido no grão e não mais manter o alto vigor das folhas. Esses valores comprovam o que Johnson (2014), Sakamoto et al. (2014) e Peralta et al. (2016) determinaram que o período

crítico para determinar a produtividade do milho é aproximadamente 20 dias antes e 20 dias depois do florescimento. Ao analisar o estágio R4 do milho nota-se que se encontra em torno de 28 dias após o florescimento, VT.

Figura 19 - Regressão linear da relação da produtividade com o NDVI médio para áreas em fenologia R4.



Fonte: a autora (2022).

Como não existe correlação do estágio R5 com a produtividade, não se realizou regressão linear para este estágio. Como explanado anteriormente a falta de correlação da produtividade com o estágio R5 ocorre devido o vigor da planta estar baixo, com o processo final de maturação, em que as folhas começam a senescer e a planta ao invés de refletir a banda do verde, passa a refletir a banda do vermelho.

Conforme apresentamos na figura 20 os índices NDVI, SAVI, ARVI e EVI2 apresentaram uma maior correlação com a produtividade nos estádios fenológicos V6 a V10, R1/R2 e R4. No estádio R5 os índices que apresentaram melhor desempenho foram o NDVI e o ARVI. Nos estádios R4 e R5 se observa que o valor das somas dos pixels de cada índice apresenta maior desempenho, isso ocorre devido aos processos fisiológicos de senescência que a planta inicia e conseqüente mudança no comportamento da curva espectral.

Figura 20 – Índices de Vegetação e a correlação com a produtividade.

Estádios	NDVI				SAVI				ARVI				EVI2			
	Máx	Méd	Min	Soma	Máx	Méd	Min	Soma	Máx	Méd	Min	Soma	Máx	Méd	Min	Soma
V6 a V10	●	●			●	●			●	●			●	●		
R1/R2	●	●			●				●	●			●			
R4				●				●					●			●
R5				●								●				

Nota: As marcações em cinza indicam os índices de vegetação e os respectivos estádios da cultura que apresentaram uma maior correlação com a produtividade.

Fonte: a autora (2022).

Ao analisar a significância dos dados com a produtividade se observa que nos estádios V6 a V10 e R1/R2 os valores máximo e médio de dos índices NDVI, SAVI, ARVI e EVI2 apresentam significância com a produtividade. Porém em R4 somente os índices NDVI, SAVI e EVI2 apresentam significância com a produtividade (Figura 21).

Figura 21 - – Índices de Vegetação e a relação significativa com a produtividade.

Estádios	NDVI				SAVI				ARVI				EVI2			
	Máx	Méd	Mini	Soma	Máx	Méd	Mini	Soma	Máx	Méd	Mini	Soma	Máx	Méd	Mini	Soma
V6 a V10	0,84	0,83		0,73	0,80	0,78		0,70	0,86	0,85		0,70	0,79	0,76		0,70
R1/R2	0,73	0,54			0,82	0,80			0,79	0,68			0,71	0,59		
R4		0,71				0,81								0,64		
R5																

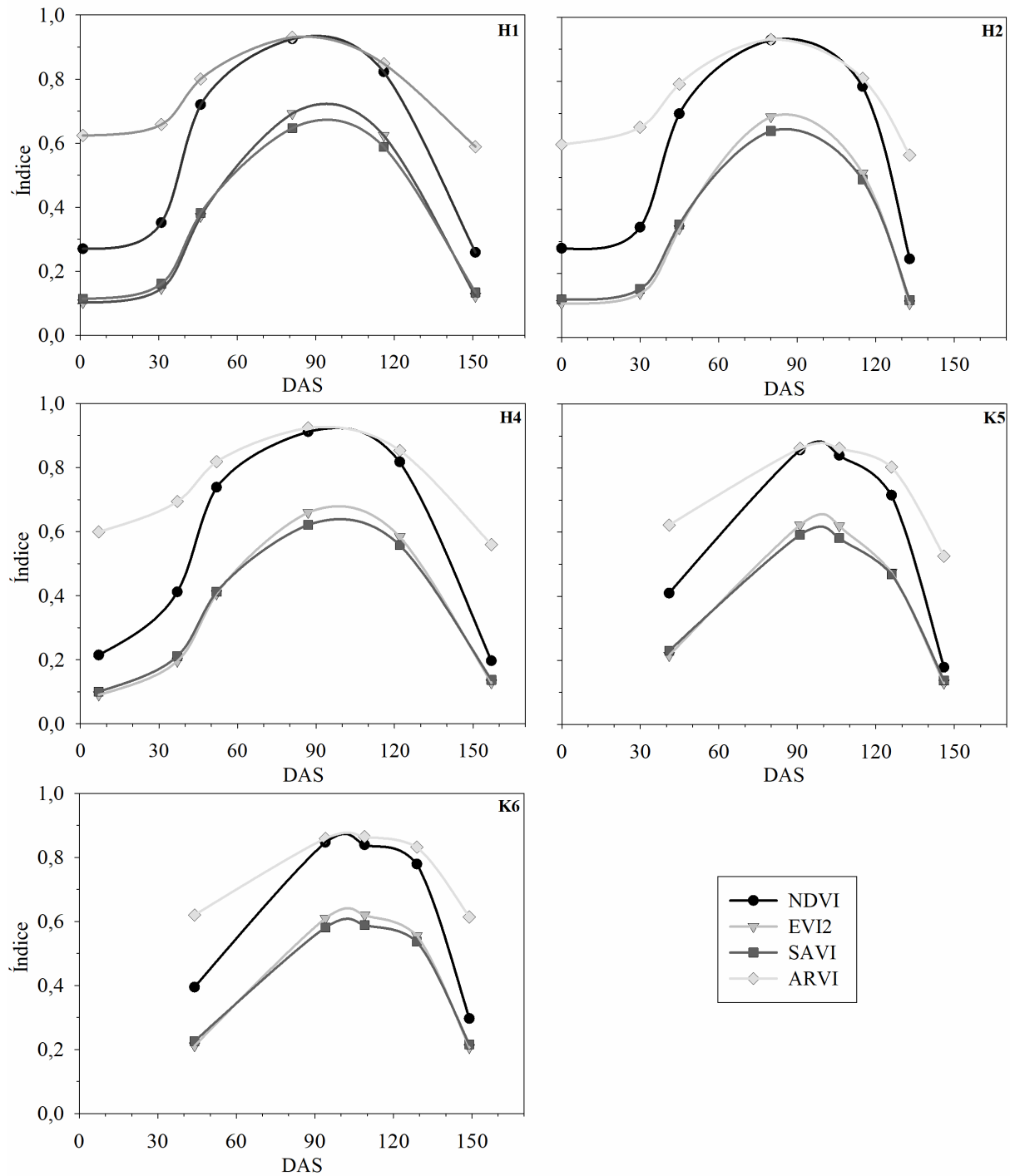
Nota: As marcações em cinza indicam os índices de vegetação e os respectivos estádios da cultura que apresentaram significância com a produtividade.

Fonte: a autora (2022).

Os índices NDVI, SAVI, ARVI e EVI2 apresentaram o comportamento descrito nas bibliografias, que no início do cultivo apresentam valores mais baixos devido à pouca área foliar da planta, chegando ao seu máximo quando o milho está fase reprodutiva e diminuindo conforme as folhas começam a senescer, conforme apresenta-se as Figuras 22 e 23. Somente as áreas K5 e K6 que apresentam resultados quando a cultura já se encontra na fase reprodutiva devido a quantidade de nuvens no início do cultivo para a safra 2020/21. O SAVI e o EVI2 para todas as áreas apresentaram valores menores se comparado ao NDVI e ARVI, decorrente de fatores de correção do solo que o SAVI apresenta e os fatores de correção solo e atmosfera do EVI2. Conforme JIANG (2008) descreve, o EVI apresenta uma sensibilidade em regiões de alta biomassa, minimizando os efeitos do solo e da atmosfera.



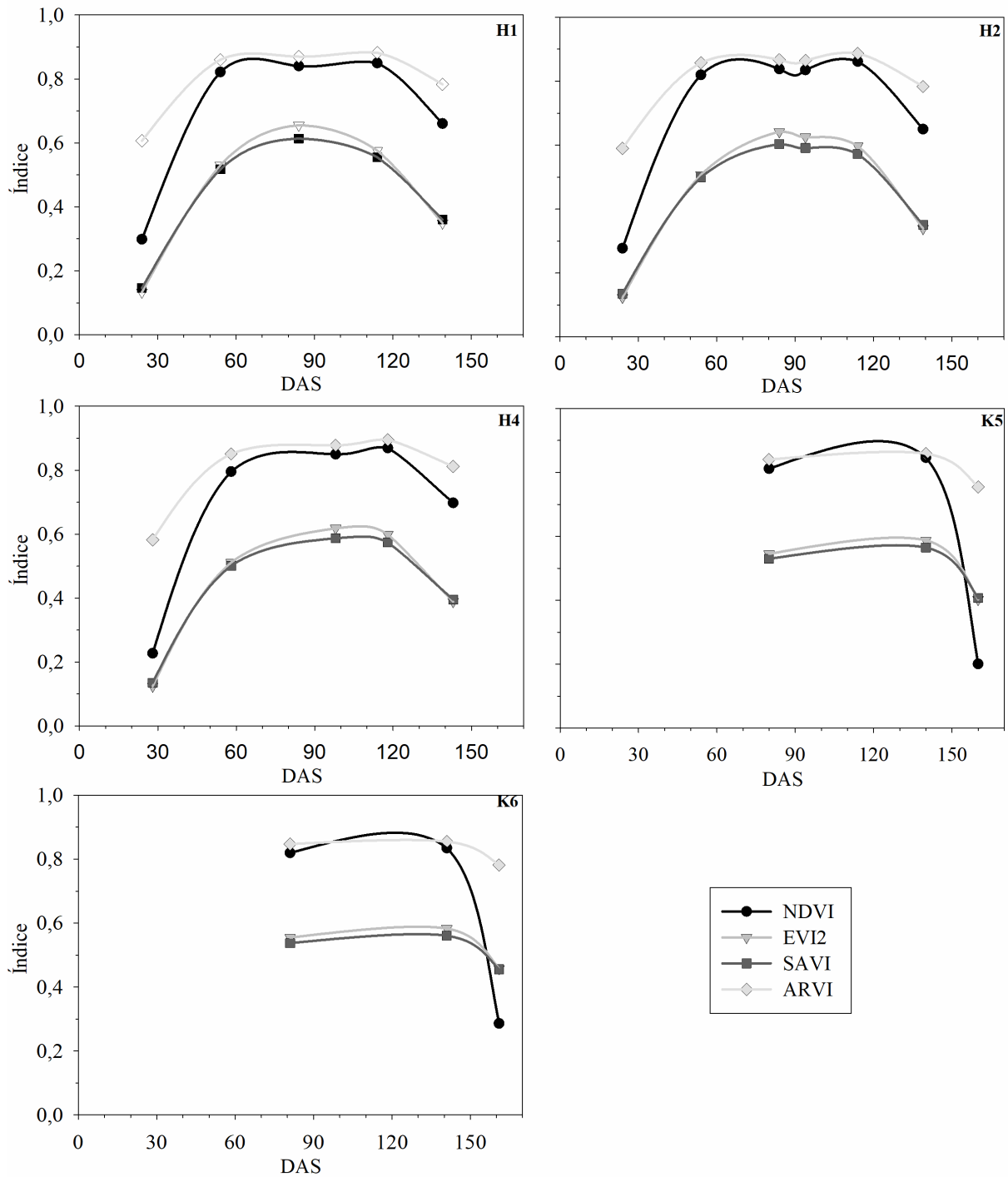
Figura 22 - Índices de vegetação NDVI, SAVI, ARVI e EVI2 para cada área estudada (H1, H2, H4, K5 e K6) da safra 2019/20



Nota – DAS: dias após a sementeira.

Fonte: a autora (2022).

Figura 23 - Índices de vegetação NDVI, EVI, SAVI e ARVI para cada área estudada (H1, H2, H4, K5 e K6) da safra 2020/21



Nota – DAS: dias após a sementeira.

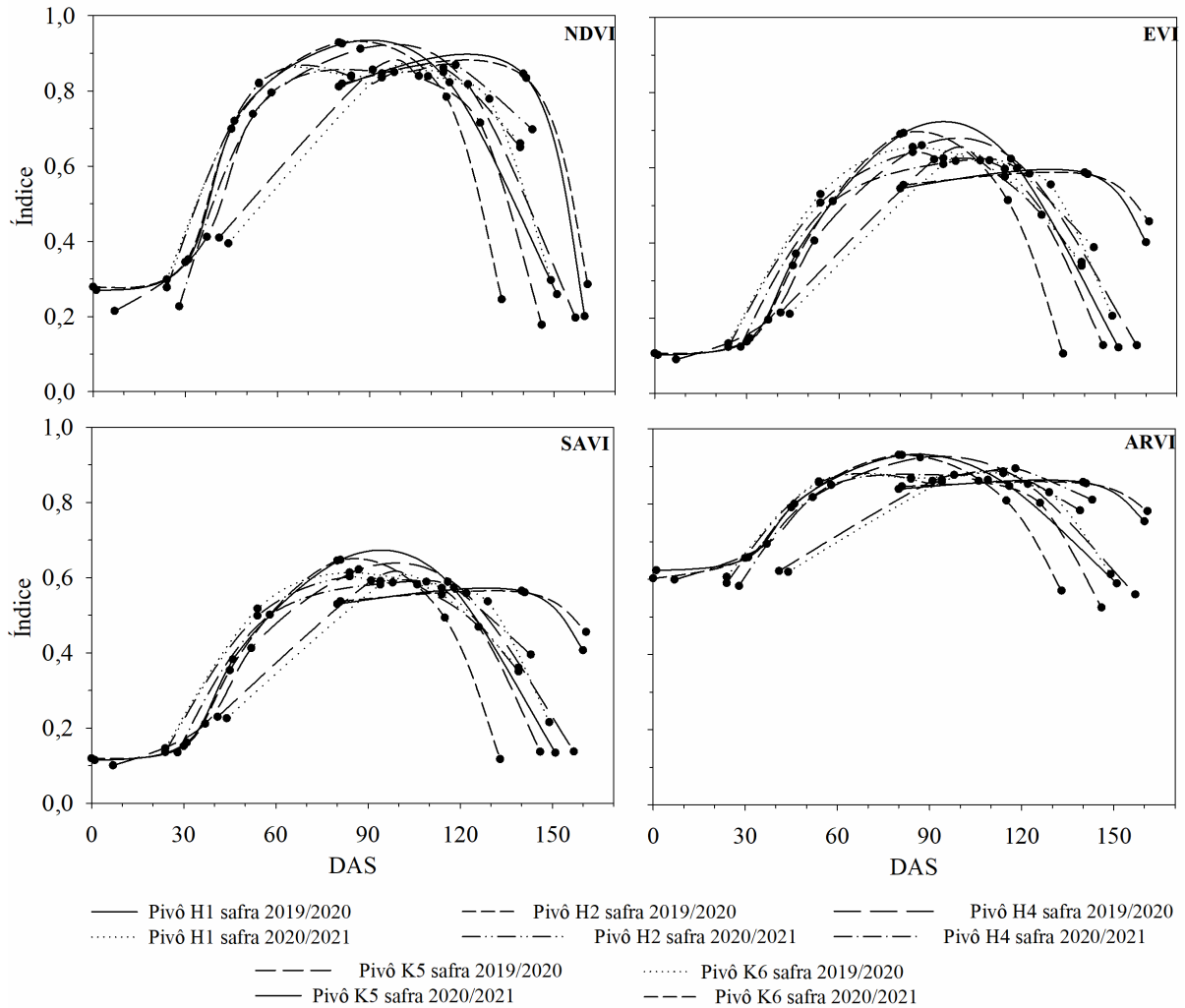
Fonte: a autora (2022).

Comparando o EVI com o SAVI, nota-se o que é descrito por JIAN (2008) que quando o EVI assume valores menores do que 0,5 os valores de SAVI são semelhantes, porém o SAVI torna-se menos sensível do que o EVI em regiões altamente vegetadas.

Com relação ao tipo de solo as áreas H apresentam solo mais argiloso e as áreas K apresentam solo franco arenoso, consegue-se realizar uma análise dos índices no início da implementação da cultura em que a área foliar não cobre totalmente o solo. Essa análise foi realizada na safra 2019/20 que apresentam valores desde o início da cultura para as áreas K. Nota-se que as áreas não apresentam diferenças nos índices NDVI e ARVI no início da cultura, que são os índices que não apresentam correção para o fator solo. Como Gago et al. (2015) explanaram o NDVI é sensível à sombra de cobertura vegetais e brilho do solo, com isso quando brilho do solo aumenta, o NDVI aumenta também, pois quando a vegetação apresenta densidade baixa a radiação vermelha aumenta significativamente e a radiação infravermelho próximo é reduzida. Os solos francos arenosos não apresentam tanto brilho se comparado aos solos arenosos, não apresentando diferenças nessa análise.

Ao comparar os índices NDVI, SAVI, ARVI e EVI2 de todos os pivôs, Figura 24 nota-se que eles apresentam a mesma tendência, para as duas safras, à medida que o milho se desenvolve aumenta a quantidade de clorofila nas plantas pois o número de folhas e a área foliar vai aumentando, assim como a densidade da vegetação que termina por cobrir todo o solo, deixando que este influencie nos resultados de índices como o NDVI e o ARVI, já que a radiação refletida pelo solo se torna muito baixa. Somente os índices das áreas K5 e K6 que o levantamento foi realizado mais tarde devido à quantidade de nuvens na região na safra 2020/21, não apresentando dados do início do desenvolvimento do milho.

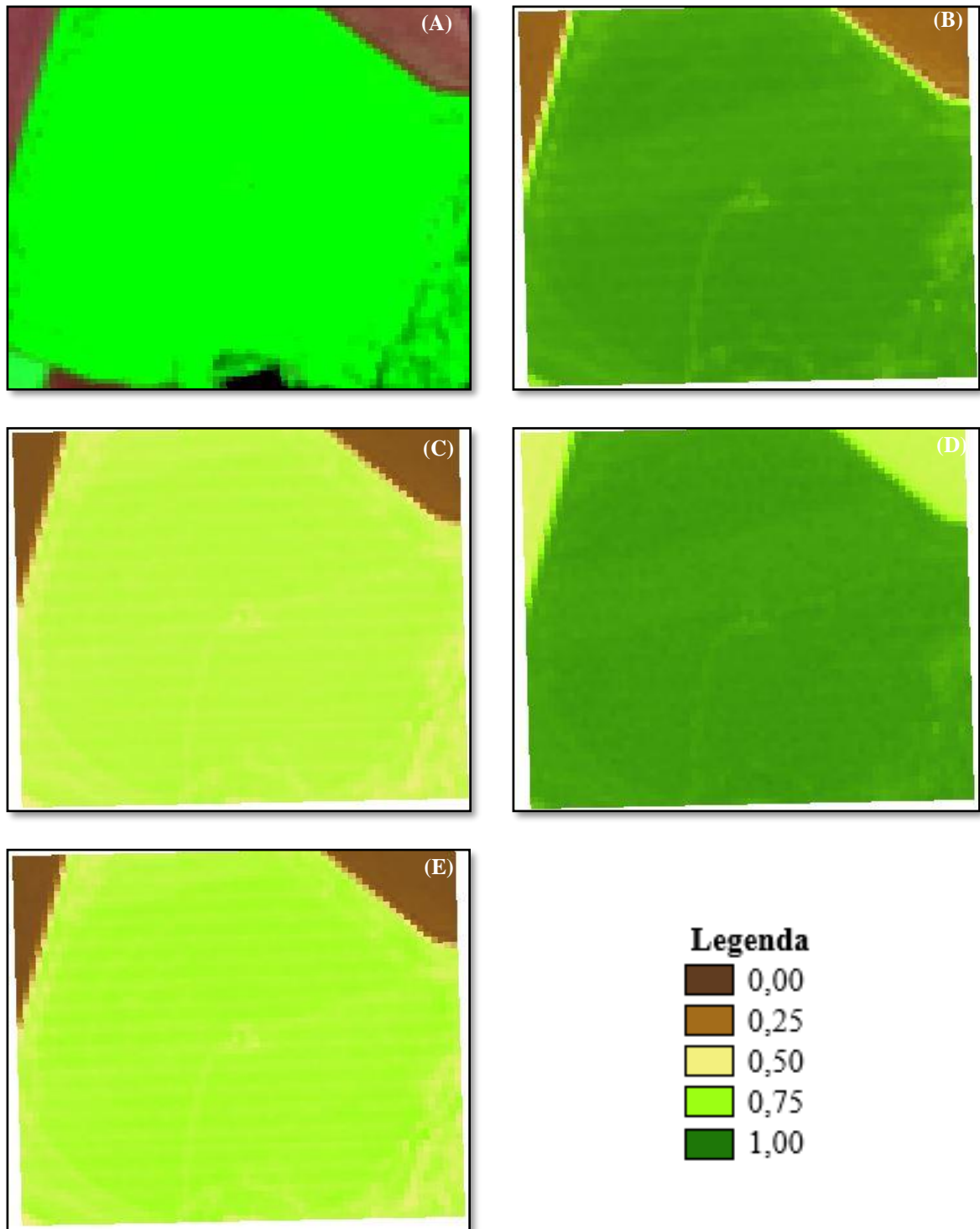
Figura 24 - Comparação dos índices de vegetação para a safra 2019/20 e 2020/21 nas 9 áreas em estudo



Nota – DAS: dias após a sementeira.  
Fonte: a autora (2022).

Foi realizada a comparação dos índices de vegetação NDVI, SAVI, ARVI e EVI2 das áreas H e K para as safras 2019/20 e 2020/21 quando a cultura está no estágio R1. Nas Figuras 25, 26 e 27 estão ilustradas as áreas de estudo nas imagens do dia 17/11/2019, respectivamente das áreas H1, H2 e H4 que estão na fenologia R1. Nota-se que o NDVI e o ARVI se demonstram com uma maior saturação se comparado ao SAVI e o EVI2, onde o NDVI e o ARVI estão com valores próximos a 1 enquanto o SAVI e o EVI2 estão em torno de 0,75 a 0,50. Na fase reprodutiva R1 o milho expressa o seu máximo vigor vegetativo, aumentando a reflectância da cultura levando a saturação de índices como o NDVI.

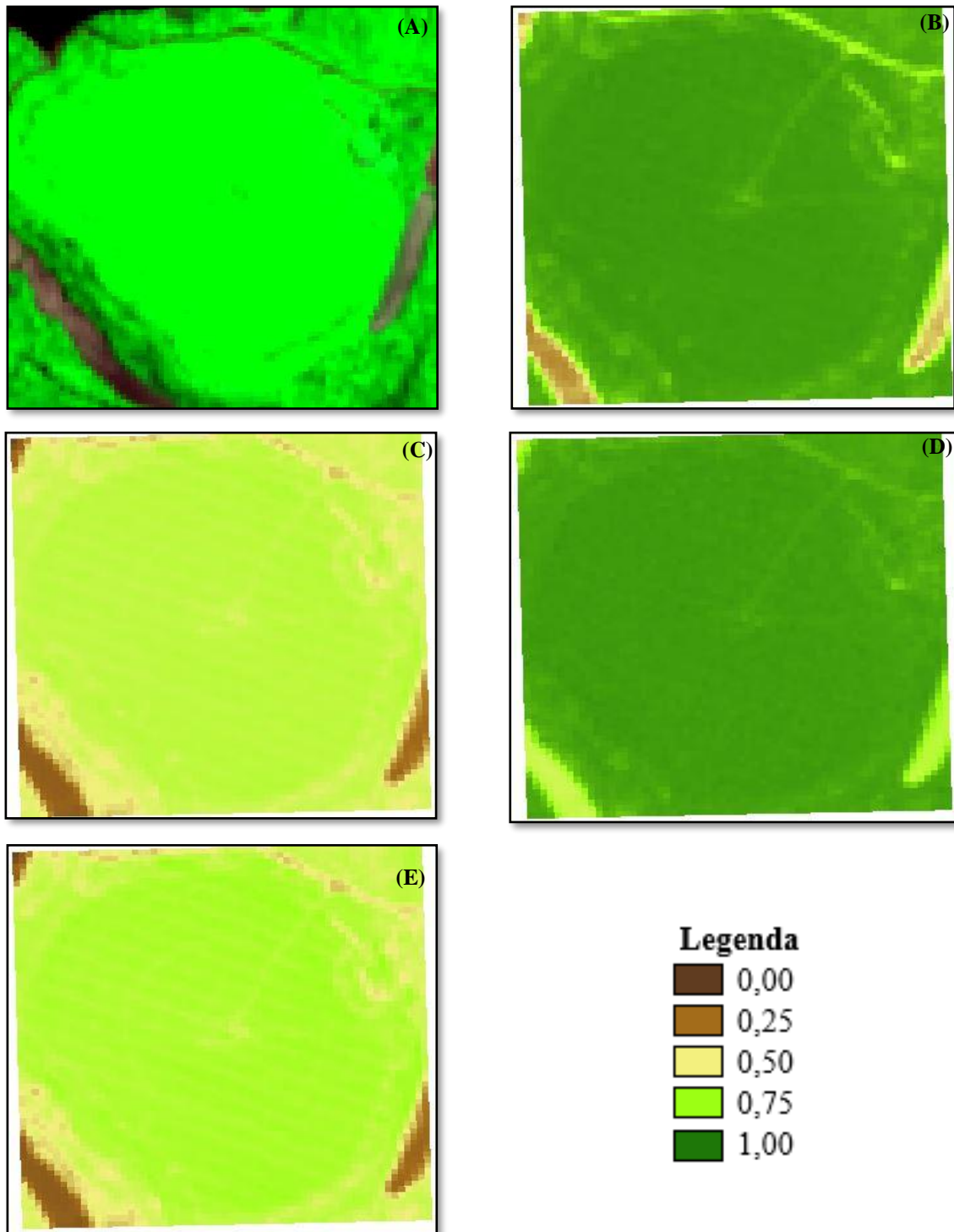
Figura 25 - Representação visual dos índices de vegetação da safra 2019/20 referente à área H1 no dia 17/11/2019



Nota - (A) Imagem original (composição colorida 4R3G2B); (B) NDVI; (C) SAVI; (D) ARVI; (E) EVI2. Estádio da cultura: R1.

Fonte: a autora (2022).

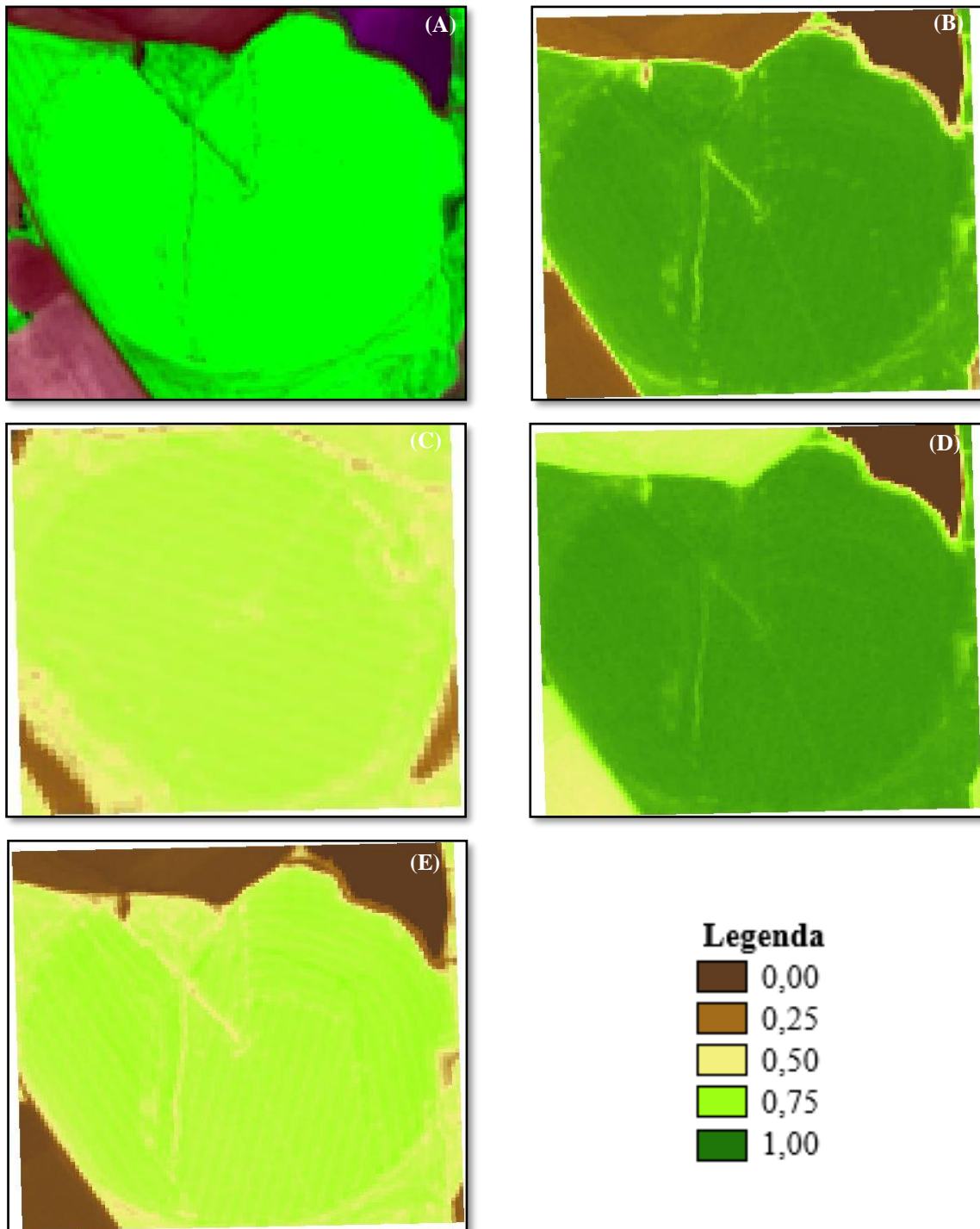
Figura 26 - Representação visual dos índices de vegetação da safra 2019/20 referente à área H2 no dia 17/11/2019



Nota - (A) Imagem original (composição colorida 4R3G2B); (B) NDVI; (C) SAVI; (D) ARVI; (E) EVI2. Estádio da cultura: R1.

Fonte: a autora (2022).

Figura 27 - Representação visual dos índices de vegetação da safra 2019/20 referente à área H4 no dia 17/11/2019



Nota - (A) Imagem original (composição colorida 4R3G2B); (B) NDVI; (C) SAVI; (D) ARVI; (E) EVI2. Estádio da cultura: R1.

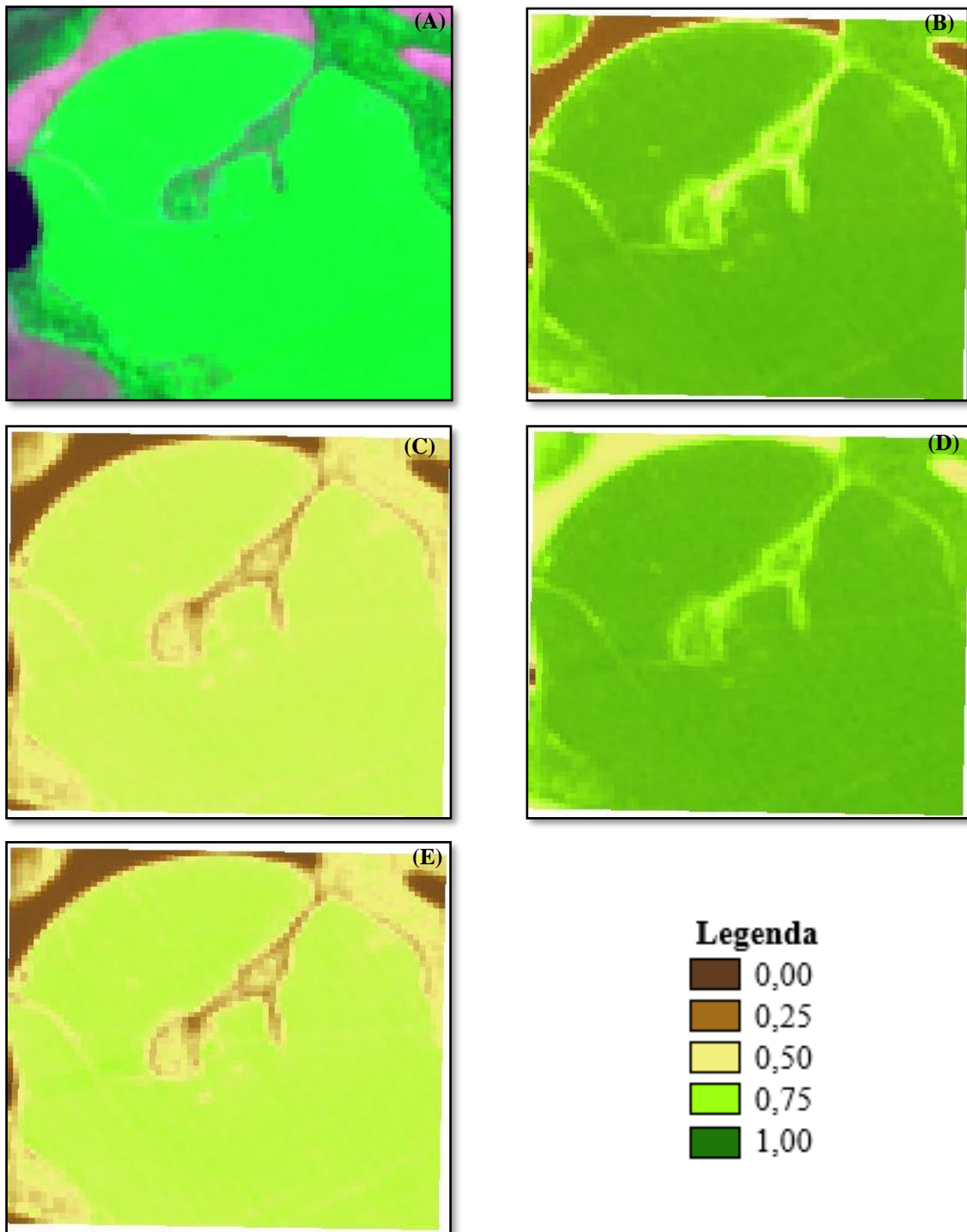
Fonte: a autora (2022).

Nas Figuras 28 e 29 estão as áreas de estudo nas imagens do dia 19/11/2019 para as áreas K5 e K6 que estavam no estágio R1. Verifica-se a mesma relação encontrada nas áreas H, em que o NDVI e o ARVI estão saturados se comparado com o SAVI e EVI2, que

apresentam mais detalhes relacionados a área cultivada. Ao analisar, por exemplo, a área K6, Figura 31, consegue-se observar mais nitidamente nas imagens do SAVI e do EVI2 a presença de uma área mais clara, onde se encontra uma área vegetada, em que apresenta uma sanga. Na área K5, Figura 30, devido a essa área vegetada ser maior, foi eliminada na hora de realizar a análise dos índices de vegetação do pivô.



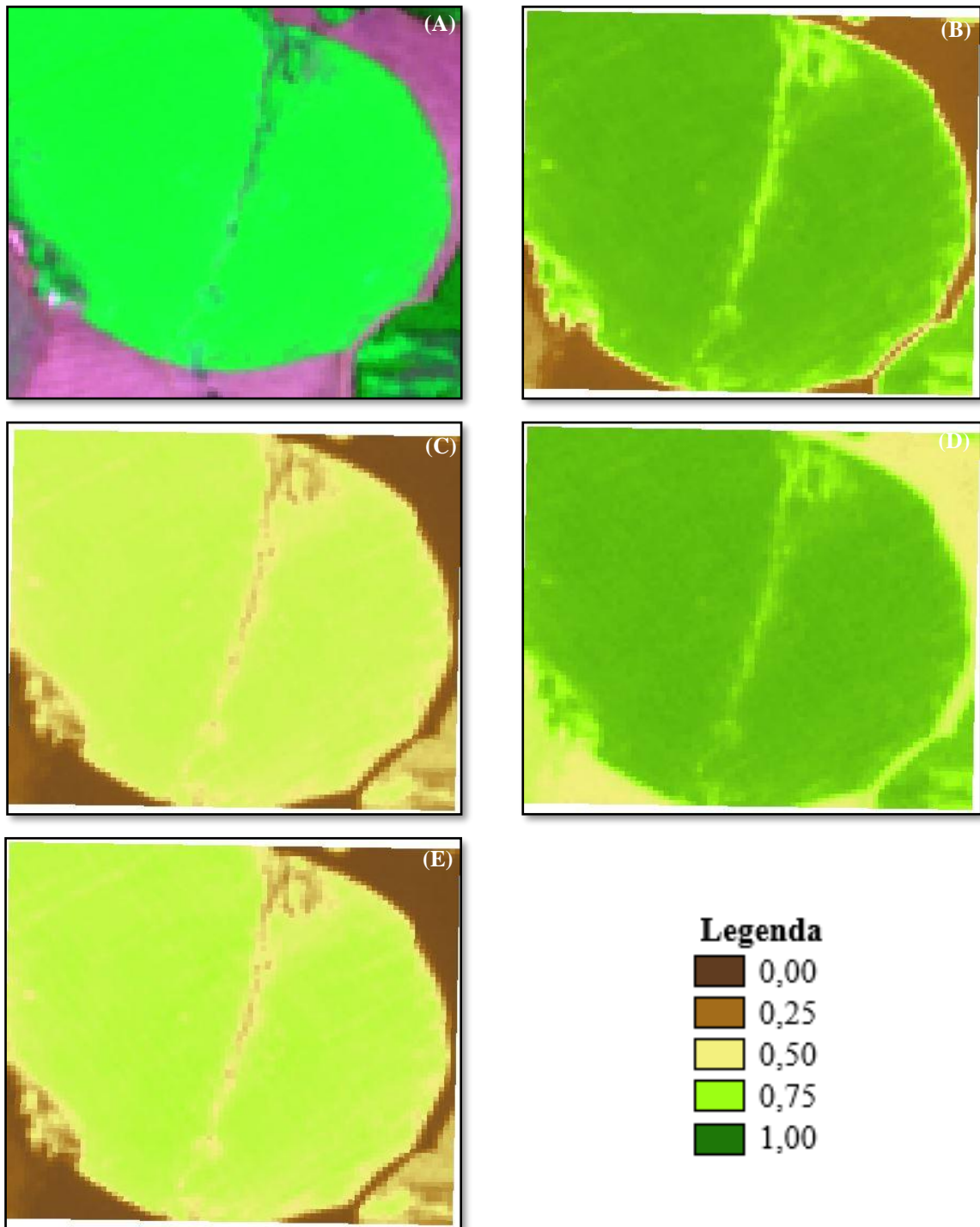
Figura 28 - Representação visual dos índices de vegetação da safra 2019/20 referente à área K5 no dia 19/11/2019



Nota - (A) Imagem original (composição colorida 4R3G2B); (B) NDVI; (C) SAVI; (D) ARVI; (E) EVI2. Estádio da cultura: R1.

Fonte: a autora (2022).

Figura 29 - Representação visual dos índices de vegetação da safra 2019/20 referente à área K6 no dia 19/11/2019



Nota - (A) Imagem original (composição colorida 4R3G2B); (B) NDVI; (C) SAVI; (D) ARVI; (E) EVI2. Estádio da cultura: R1.

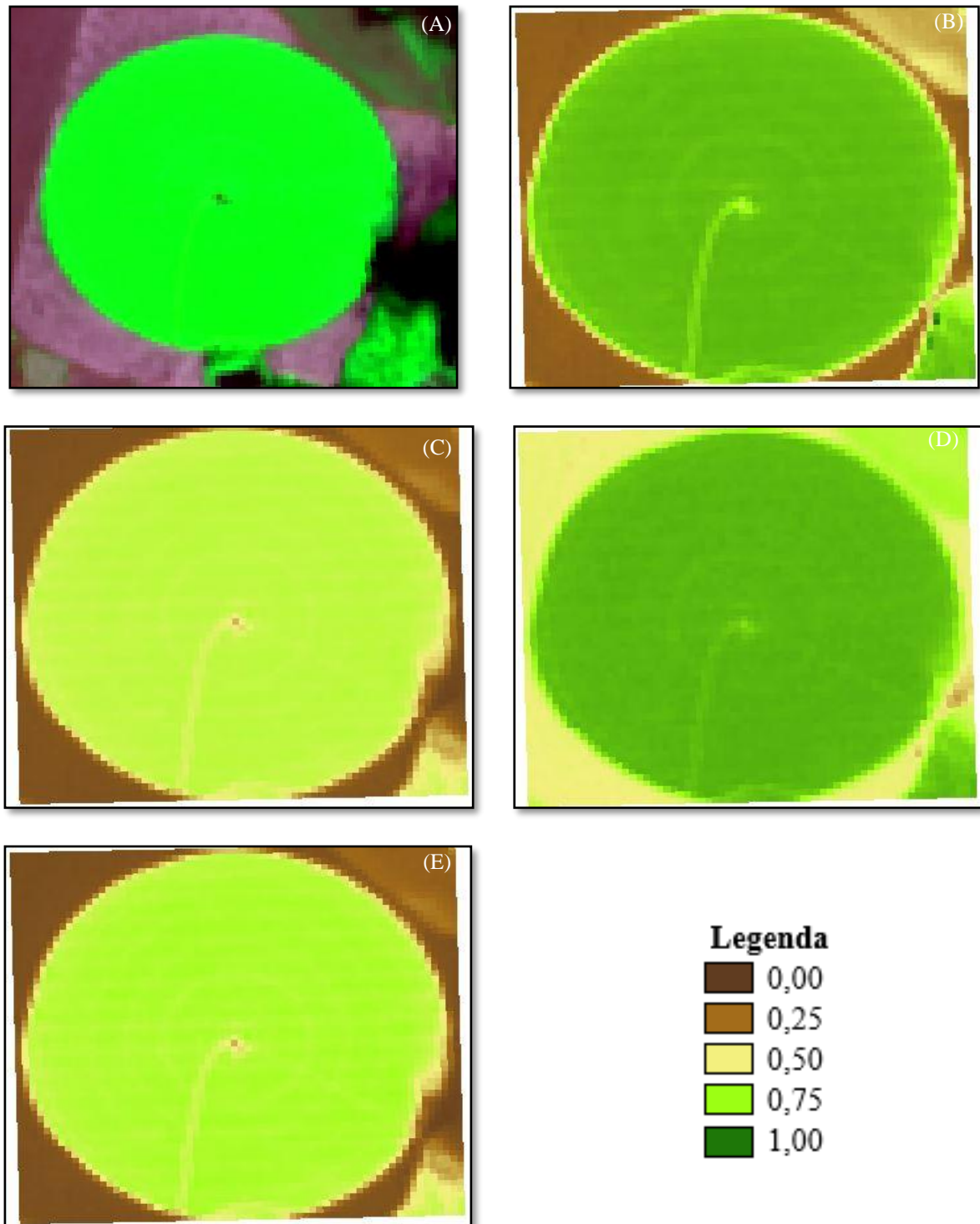
Fonte: a autora (2022).

As Figuras 30, 31 e 32 ilustram os índices de vegetação para a data 21/11/2020 referente à safra 2020/21 das áreas H1 e H2, a cultura nesse período apresenta estágio R1. Para a área H4 utilizou-se a imagem do dia 01/12/2020, em que a área apresentava estágio R2. Não foi possível

utilizar a mesma data da imagem para H4, devido à presença de uma nuvem densa em cima da área. Nota-se a mesma relação encontrada na safra 2019/20, em que o SAVI e o EVI2 demonstram mais detalhes se comparado ao NDVI e ARVI quando a cultura está representando o máximo vigor. O NDVI e o ARVI apresentam valores entre 0,75 e 1 enquanto o SAVI e o EVI2 apresentam valores entre 0,25 e 0,75.

Se observa nos índices NDVI e ARVI uma maior riqueza de detalhes se comparado ao SAVI e o EVI2, onde se identifica alguns lances do pivô. Isso está associado às características dos índices, em que o EVI2 minimiza os efeitos tanto do solo como da atmosfera, enquanto o SAVI somente minimiza os efeitos do solo.

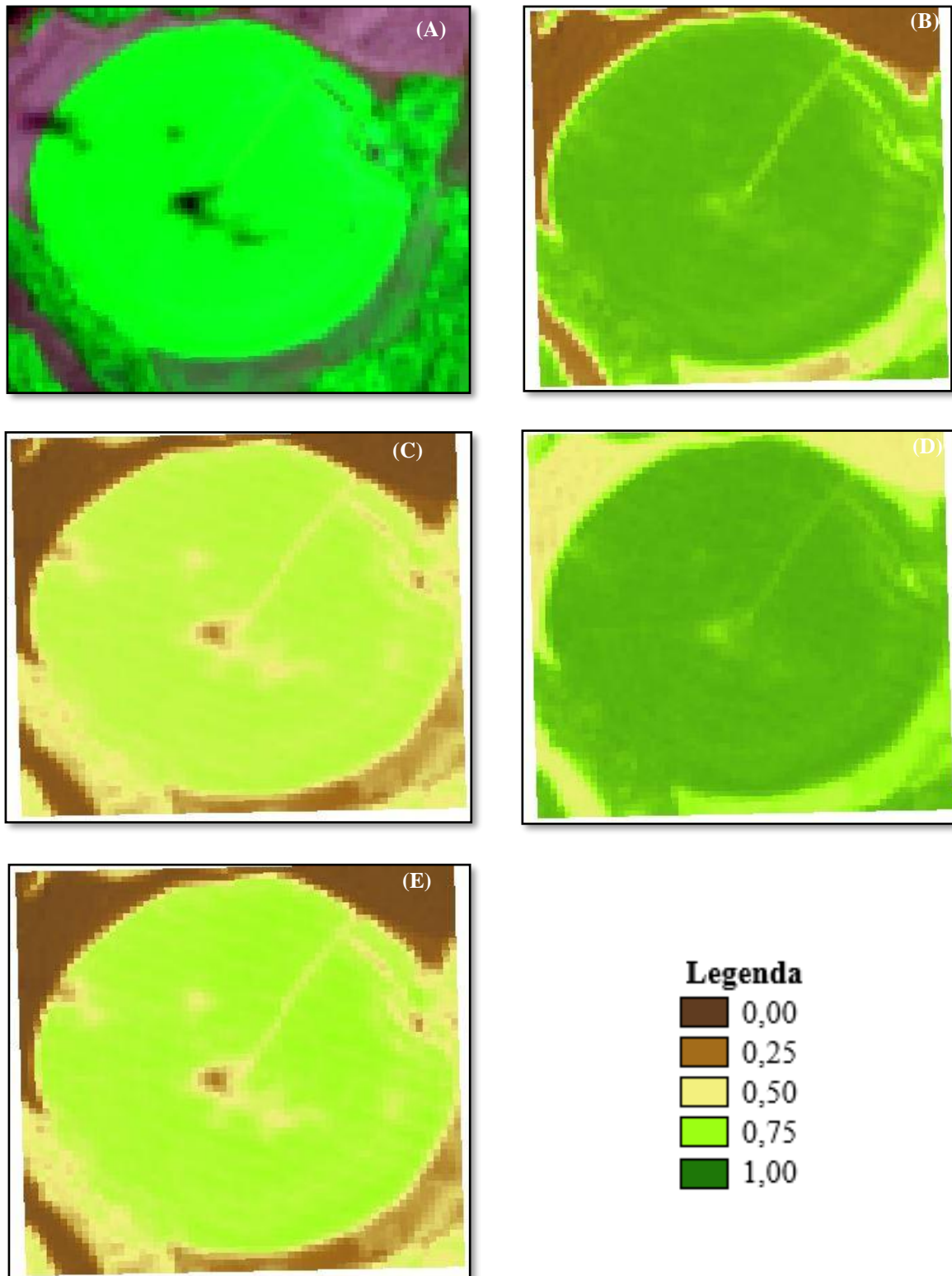
Figura 30 - Representação visual dos índices de vegetação da safra 2020/21 referente à área H1 no dia 21/11/2020



Nota - (A) Imagem original (composição colorida 4R3G2B); (B) NDVI; (C) SAVI; (D) ARVI; (E) EVI2. Estádio da cultura: R1.

Fonte: a autora (2022).

Figura 31 - Representação visual dos índices de vegetação da safra 2020/21 referente à área H2 no dia 21/11/2020

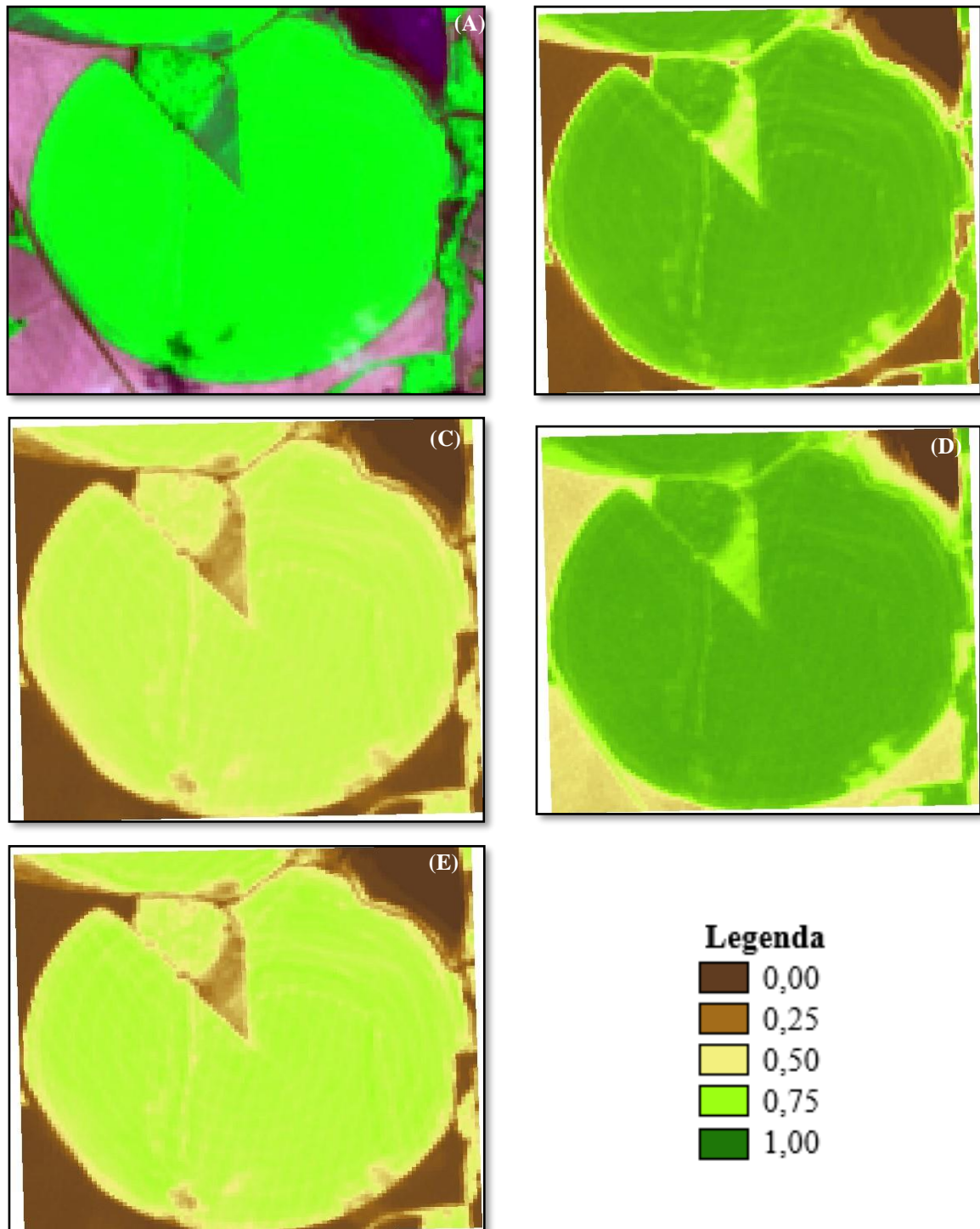


Nota - (A) Imagem original (composição colorida 4R3G2B); (B) NDVI; (C) SAVI; (D) ARVI; (E) EVI2. Estádio da cultura: R1.

Fonte: a autora (2022).



Figura 32 - Representação visual dos índices de vegetação da safra 2020/21 referente à área H4 no dia 01/12/2020



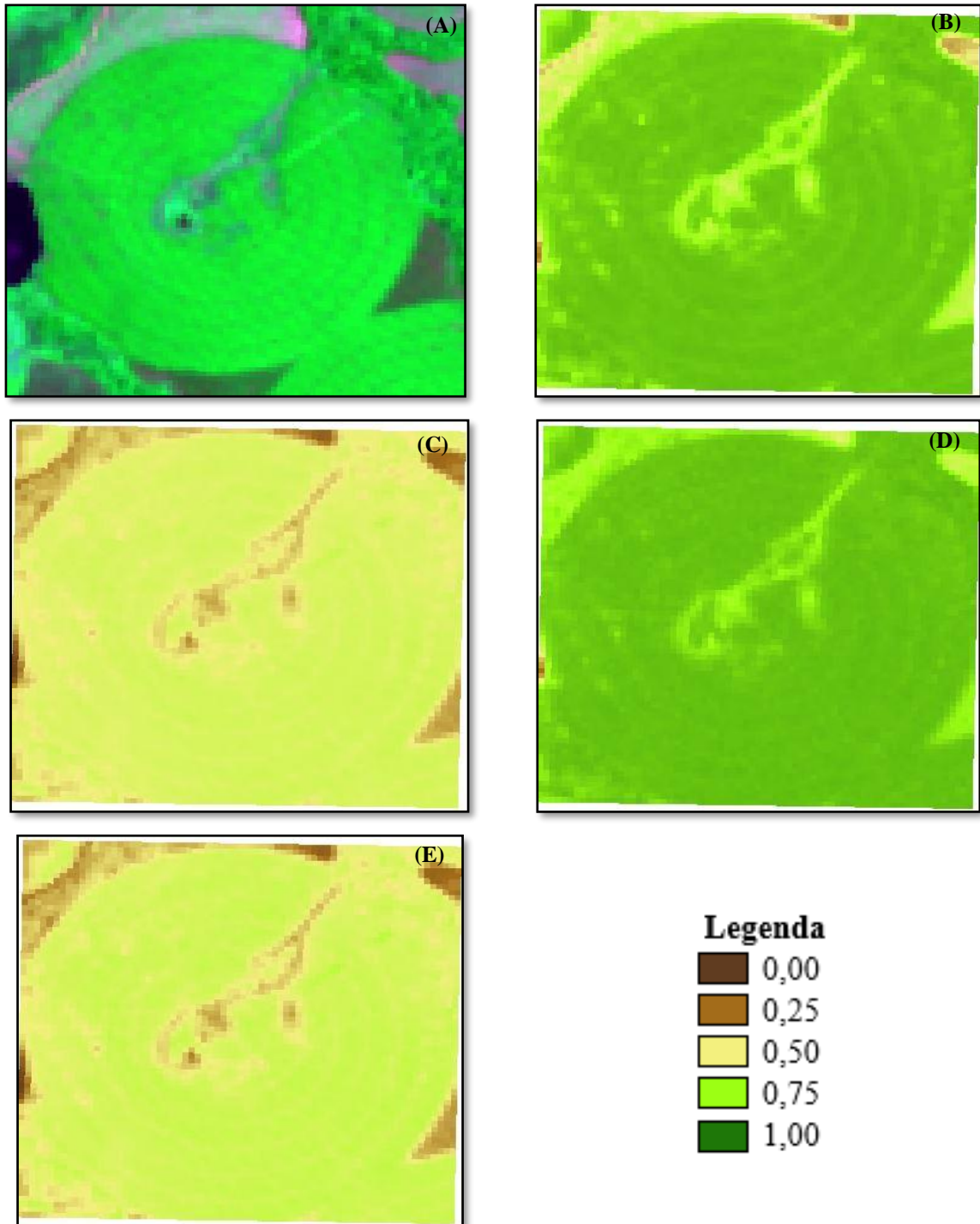
Nota - (A) Imagem original (composição colorida 4R3G2B); (B) NDVI; (C) SAVI; (D) ARVI; (E) EVI2. Estádio da cultura: R2.

Fonte: a autora (2022).

Nas imagens das Figuras 33 e 34 se apresenta os índices de vegetação para as áreas K5 e K6, onde se obteve imagem do estágio reprodutivo somente quando a cultura se apresenta em R4, para a safra 2020/21. Durante essa safra a região apresentou muita nebulosidade,

dificultando a aquisição de imagens. Se observa que nesse estágio o NDVI e o ARVI demonstram algumas diferenças na lavoura, principalmente na parte que tem uma vegetação com sanga, onde não está com alta saturação. Comparando o NDVI com o ARVI, o primeiro demonstra um maior detalhamento da área vegetada e o ARVI uma maior saturação. Porém mesmo assim o SAVI e o EVI2 são os que apresentam uma maior riqueza de detalhes, facilitando a identificação de mudanças dentro e fora da área.

Figura 33 - Representação visual dos índices de vegetação da safra 2020/21 referente à área K5 no dia 18/12/2020

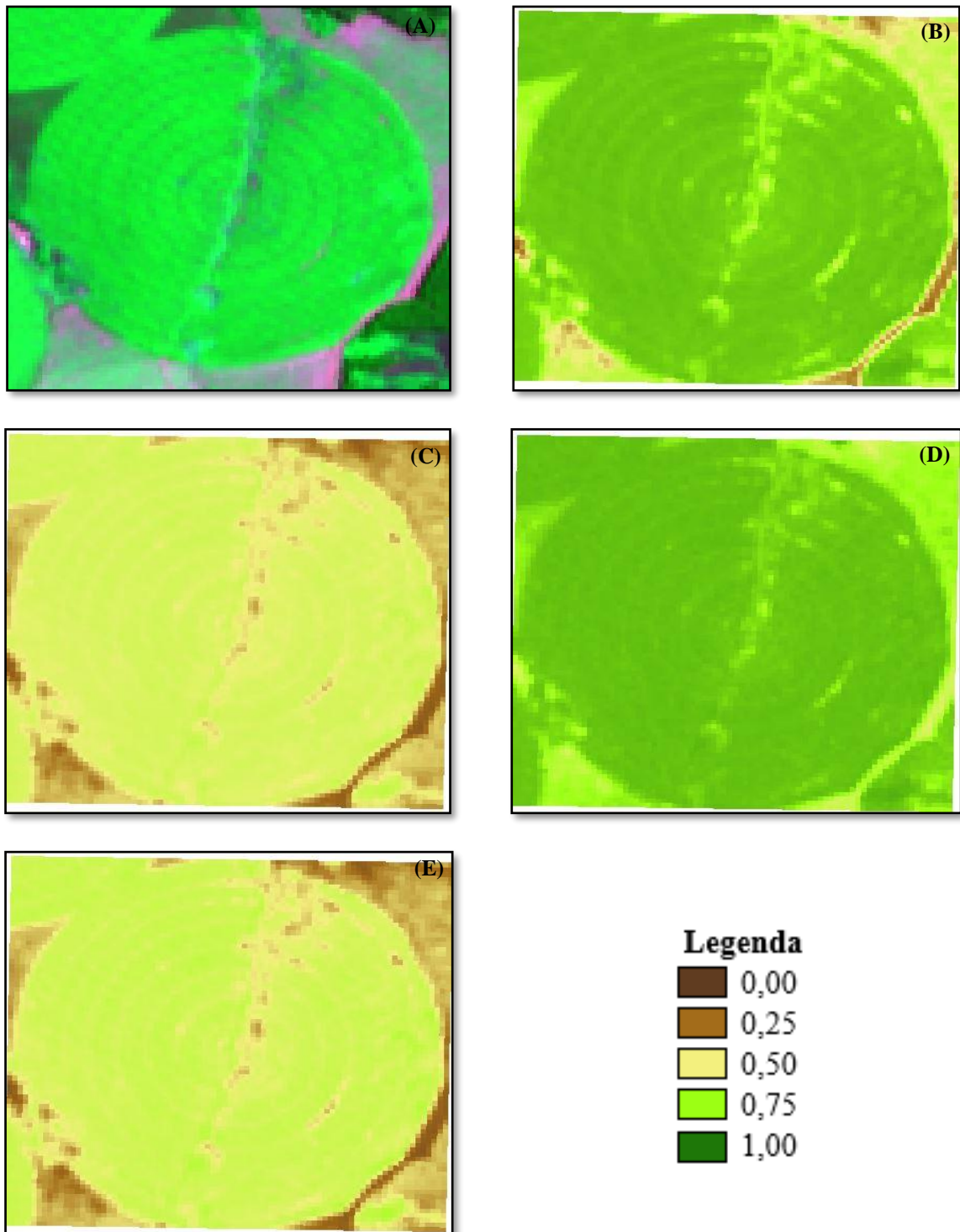


Nota - (A) Imagem original (composição colorida 4R3G2B); (B) NDVI; (C) SAVI; (D) ARVI; (E) EVI2. Estádio da cultura: R4.

Fonte: a autora (2022).



Figura 34 - Representação visual dos índices de vegetação da safra 2020/21 referente à área K6 no dia 18/12/2020.



Nota - (A) Imagem original (composição colorida 4R3G2B); (B) NDVI; (C) SAVI; (D) ARVI; (E) EVI2. Estádio da cultura: R4.

Fonte: a autora (2022).

A Figura 35 expressa a comparação dos índices de vegetação de todas as áreas analisadas, e relaciona com o tipo de solo. Nas áreas H1, H2 e H4 os solos são argilosos e nas áreas K5 e K6 são solos franco arenoso. A análise foi realizada para a safra 2019/20, pois é a

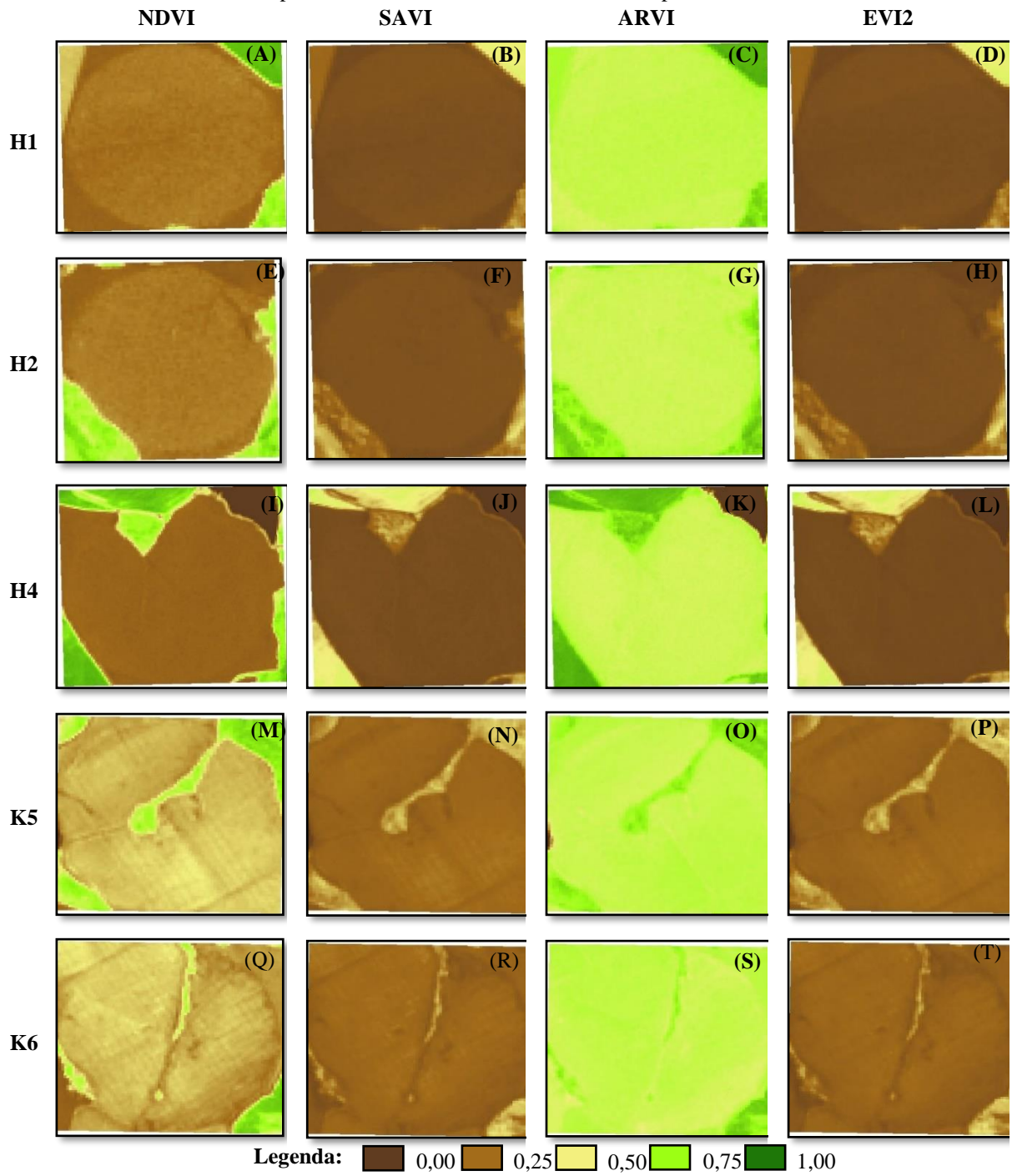
que apresenta imagens de todos os pivôs no início do desenvolvimento da cultura, de V0 a V5. As áreas H1, H2 e H4 são de quando a cultura está no estágio V0 e as áreas K5 e K5 nos estágios V4 e V5, respectivamente.

Ao analisar as imagens não foi possível discriminar diferenças significativas. Porém para o NDVI, se observou que nas áreas K5 e K6 os valores foram maiores para esse índice se comparado com as áreas H1, H2 e H4, mas essa diferença pode estar ocorrendo devido às áreas K estarem entre 4 a 5 folhas, enquanto as H o solo estar totalmente exposto.

O SAVI e o EVI2 são os que resultaram em menores valores de pixel, o que demonstra a boa atuação deles quando o solo está exposto.

O ARVI é o índice que apresenta maiores valores, o que pode estar relacionado ao solo estar exposto, e a correção que ele realiza reduzido os efeitos da atmosfera, dessa forma, estar influenciando nos resultados devido a não ter presença de plantas de milho para as áreas H ou mínima cobertura do dossel pela cultura nas áreas K.

Figura 35 - Representação visual dos índices de vegetação da safra 2019/20 referentes às áreas H1, H2, H4, K5 e K6 para análise dos resultados em diferentes tipos de solo



Fonte: a autora (2022).

## 5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Devido à dificuldade de aquisições de dados a campo para realizar a estimativa da produtividade, os resultados encontrados no presente trabalho indicam que a utilização de imagens de satélite é uma boa alternativa para obtenção de estimativas de produtividade.

Para áreas em estágio V6 a V10, o ARVI foi o que apresentou maior relação com a produtividade, esse índice minimiza os efeitos da atmosfera, e para as safras pesquisadas ocorreram períodos de alta nebulosidade, o que pode ser um indicativo do alto desempenho do índice. No estágio R1/R2 encontrou-se a melhor relação para o índice SAVI e para o estágio R4 o NDVI. O EVI2 também apareceu com uma boa desenvoltura na relação com a produtividade nesses três estágios.

Analisando no âmbito geral o SAVI e o EVI2 apresentam uma boa desenvoltura para serem utilizados na estimativa de produtividade de áreas com milho, principalmente em áreas que podem apresentar incidência de nebulosidade em períodos críticos para avaliação e influência do solo.

Devido ao arranjo das folhas de milho e o espaçamento do cultivo, algumas partes do solo ficam expostas mesmo quando a cultura está no seu máximo de área foliar, com isso o SAVI consegue minimizar esses efeitos, gerando dados mais precisos de produtividade. O EVI2 tem uma excelente performance também, apresentando uma maior riqueza de detalhes nas áreas se comparado aos demais índices, apresentando boa desenvoltura para os estágios V6 a V10; R1/R2 e R4.

A avaliação de produtividade para o estágio R5 é inviável, pois a cultura começa a diminuir o seu vigor vegetativo, pois está em processo de finalização final, ocasionando em nenhuma relação dos índices de vegetação com a produtividade.

No presente trabalho não se obteve diferenças nos índices de vegetação ao comparar solos argilosos com solos franco arenosos. Isso pode ter sido ocasionado devido aos solos francos arenosos não serem tão brilhosos se comparados aos solos arenosos e também devido a não ser realizada uma avaliação quando todas as áreas apresentavam estágio V0.

Recomenda-se considerar para estudos futuros:

- Que sejam utilizadas um maior número de áreas do Estado do Rio Grande do Sul ou até mesmo do país ou de mais safras para conseguir um maior número de imagens que possam ser adquiridas durante a fase vegetativa para uma melhor avaliação durante esta fase para uma melhor validação dos dados encontrados.

- A realização de estudos comparativos em áreas de sequeiro e irrigada para conseguir um melhor ajuste da equação da produtividade;
- Considerar diferentes tipos de solo com o intuito de avaliar a influência na geração dos índices de vegetação;

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABID - Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem. **Contribuição da CSEI-Abimaq com estimativas sobre a área irrigada no Brasil**. Item, n, 122-123, 2020.

AKITSU, T.; NASAHARA, K. N.; HIROSE, Y.; IJIMA, O.; KUME, A. Quantum sensors for accurate and stable long-term photosynthetically active radiation observations. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 237–238, p. 171–183, 2017.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L., SENTELHAS, P. C., GONÇALVES, J. L. M., SPAROVEK, G. KÖPPEN'S climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014.

ANA - Agência Nacional de Águas. **Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil**. 2º Ed. - Brasília - DF, 2019.

ANA - Agência Nacional de Águas. **Uso da água na agricultura irrigada**. Atlas Irrigação, 2º edição. Brasília - DF, 2021.

ANDRADE, F. H.; UHART, S. A.; CIRILO, A. G. Temperature effects radiation use efficiency in maize. **Field Crops Research**, v. 32, p. 17-25, 1993.

ANDRADE, F. H.; UHART, S. A.; FRUGONE, M. Intercepted radiation at flowering and kernel number in maize: shade versus plant density effects. **Crop Science**, v. 33, p. 482-485, 1993a.

ARAÚJO, J.; VETTORAZZI, C. A.; MOLIN, J P. Estimativa da produtividade e determinação de zonas de manejo, em culturas de grãos, por meio de videográfica aérea multiespectral. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 27, n. 3, p. 437-447, 2004.

ASSIS, J. P.; NETO, D. D.; REICHARDT, K.; MANFRON, P. A.; MARTIN, T. N.; BONNECARRÈRE, R. A. G. Dados Climáticos simulados e produtividade potencial do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 5, p. 731-737, 2006.

ATZBERGER, C. Advances in remote sensing of agriculture: context description, existing operational monitoring systems and major information needs. **Remote Sensing**, v. 5, p. 949-981, 2013.

BASTIAANSEN, W. G. M.; ALI, S. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin, Pakistan. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.94, p.321-340, 2003.

BERGAMASCHI, H.; WHEELER, T. R.; CHALLINOR, A. J.; COMIRAN F.; HECKLER, B. M. M. Maize yield and rainfall on different spatial and temporal scales in Southern Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, p. 603-613, 2007.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; BERGONCI, J. I.; BIANCHI, C. A. M.; MULLER, A. G.; COMIRAN, F.; HECKLER, B. M. M. Water supply in the critical period of maize and the grain production. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, p.831-839, 2004.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; COMIRAN, F.; BERGONCI, J. I.; MULLER, A. G.; FRANÇA, S.; SANTOS, A. O.; RADIN, B.; BIANCHI, C. A. M.; PEREIRA, P.G. Water deficit and yield in maize crops. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, p. 243-249, 2006.

BERGONCI, J.I.; BERGAMASCHI, H.; SANTOS, A.O.; FRANÇA, S.; RADIN, B. Eficiência da irrigação em rendimento de grãos e matéria seca de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, p. 949-956, 2001.

BORATTO, I. M. P.; GOMIDE, R. L. **Aplicação dos índices de vegetação NDVI, SAVI e IAF na caracterização da cobertura vegetativa da região Norte de Minas Gerais**. In Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, p. 8, 2013.

BRANDÃO, Z, N. **Estimativa da produtividade e estado nutricional da cultura do algodão irrigado via técnicas de sensoriamento remoto**. Tese de doutorado - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, p. 152, 2009.

CAMPOS, I.; NEALE, C. M. U.; SUYKER, A. E.; ARKEBAUER, J. GONÇALVES, I. Z. Reflectance-based crop coefficients REDUX: For operational evapotranspiration estimates in the age of high producing hybrid varieties. **Agricultural Water Management**, v. 187, p. 140-153, 2017.

CAMPOS, I.; NEALE, C. M. U.; SUYKER, A. E.; ARKEBAUER, J. GONÇALVES, I. Z. Water productivity and crop yield: A simplified remote sensing driven operational approach. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 249, p. 501-511, 2018.

CARNEIRO, F. M. **Sensores de dossel no monitoramento da variabilidade das culturas da soja e do amendoim**. Tese de doutorado - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2018.

CECHI, L. **Monitoramento do requerimento hídrico e rendimento de soja e milho via combinação de modelo de balanço hídrico do solo e sensoriamento remoto**. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Santa Maria, 2019.

CERUTTI, D. H. H. **Combinação de imagens multi-espectrais e modelo de balanço hídrico para predição de rendimentos da soja no sul do Brasil**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de tecnologia, Pós-Graduação em Ciência da Computação, RS, 2019.

CHAVEZ, P. S. **Image-Based Atmospheric Corrections - Revisited and Improved Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, [Falls Church, Va.] American Society of Photogrammetry, 62, 1025-1036, 1996.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: safra 2017/2018**. v.5, n.11 (Décimo primeiro levantamento), 2018.

CONGEDO, L. **Documentação do Semi-Automatic Classification Plugin**. 2017. Disponível em: [https://semiautomaticclassificationmanual-v5.readthedocs.io/pt\\_BR/latest/index.html](https://semiautomaticclassificationmanual-v5.readthedocs.io/pt_BR/latest/index.html).

CRUZ, M. A. S.; SOUZA, A. M. B.; JESUS, J. S. Avaliação da cobertura vegetal por meio dos Índices de Vegetação SR, NDVI, SAVI e EVI na bacia do rio Japarutuba-Mirim em Sergipe. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Curitiba, Brasil. São José dos Campos: INPE, p. 1357-1365, 2011.

DEJONGE, K. C.; ASCOUGH, I. I.; ANDALES, A. A.; HASEN, N. C.; GARCIA, L. A.; ARABI, M. Improving evapotranspiration simulations in the CERES-Maize model under limited irrigation. **Agricultural Water Management**, v.115, p.92–103, 2012.

DOURADO-NETO, D.; TERUEL, D. A.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D. R.; FRIZZONE, J. A.; BACCHI, O. O. S. Principles of crop modelling and simulation. I. Uses of mathematical models in agricultural science. **Scientia Agricola**, v.55, p. 46-50, 1998.

DRUSCH, M.; DEL BELLO, U.; CARLIER, S.; COLIN, O.; FERNANDEZ, V.; GASCON, F.; HOERSCH, B.; ISOLA, C.; LABERINTI, P.; MARTIMORT, P.; MEYGRET, A.; SPOTO, F.; SY, O.; MARCHESE, F.; BARGELLINI, P. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment* 120; 25-36, 2012.

EUROPEAN SPACE AGENCY. **SENTINEL-2 User Handbook - ESA Standard Document**, Noordwijk, NL, 2015. Disponível em: [https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2\\_User\\_Handbook](https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook).

FANCELLI, A. L.; DOURADO-NETO, O. D. **Produção de milho**. Guaíba: Agropecuária, p. 360, 2000.

FANCELLI, A. L. **Plantas Alimentícias: guia para aula, estudo e discussão**. Piracicaba: USP/ESALQ, p. 131, 1986.

FAO - FAOSTAT: **Food and agriculture data**, 2018. Available from: <http://www.fao.org/faostat/en/>.

FORMAGGIO, A. R.; SANCHES, I. D. **Sensoriamento remoto em agricultura**. São Paulo, oficina de textos, 2017.

GAGO, J.; DOUTHE, C.; COOPMAN, R.E.; GALLEGO, P.P.; RIBAS-CARBO, M.; FLEXAS, J.; ESCALONA, J.; MEDRANO; H. UAVs challenge to assess water stress for sustainable agriculture. **Agricultural Water Management**, v. 153, p. 9-19, 2015.

GOWARD, S. N., HUENNRICH, K. F., Vegetation canopy PAR absorptance and the normalized difference vegetation index: An assessment using the SAIL model. **Remote Sensing of Environment**, v. 39, p. 119-140, 1992.

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



HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, n. 25, p. 295-309, 1988.

JACKSON, R.D., Huete, A. R. Interpreting vegetation indices. **Journal of Preventive Veterinary Medicine**, v.11, p.185-200, 1991.

JENSEN JR. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese, p. 598, 2009.

JIANG, Z; HUETE, A. F; DIDAN, K; MIURA, T. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 10, p. 3833-3845, 2008.

JIANG, Z; HUETE, A. R; YOUNGWOOK, K; KAMEL, D. 2-band enhanced vegetation index without a blue band and its application to AVHRR data, **Remote sensing and modeling of Ecosystems for sustainability** v. 6679, p. 1-10, 2007.

JIN, X.; KUMAR, L.; LI, Z.; FENG, H.; XU, X.; YANG, G.; WANG, J. A review of data assimilation of remote sensing and crop models. **European Journal of Agronomy**, v. 92, p. 141-152, 2018.

JOHNSON, D. M. An assessment of pre- and within-season remotely sensed variables for forecasting corn and soybean yields in the United States. **Remote Sensing of Environment**, v. 141, p. 116-128, 2014.

JOHNSON, D. M.; MUELLER, R. The 2009 cropland data layer. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 76, p. 1201-1205, 2010.

KAUFMAN, Y. J.; TANRÉ, D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 30, p. 261-270, 1992.

LORENZZETTI J. A. **PRINCÍPIOS FÍSICOS DE SENSORIAMENTO REMOTE**. São Paulo: Blucher, p. 293, 2015.

MARQUES, F. J. M. **Utilidade agrônômica dos índices NDVI e NDWI obtidos por imagens dos satélites Sentinel-2: estudos de caso nas culturas de Trigo, Brócolo e Arroz**. Dissertação de mestrado - Universidade de Évora, p. 91, 2018.

MARTINS, J. D.; BOHRZ, I. S.; TURA, E. F.; FREDRICH, M.; VERONEZ, R. P.; KUNZ, G. A. Levantamento da área irrigada por pivô central no estado do Rio Grande do Sul, **Irriga**, v. 21, n. 2, p. 300-311, 2016.

MATSUSHITA, B.; YANG, W.; CHEN, J.; ONDA, Y.; QIU, G. Sensitivity of the Enhanced Vegetation Index (EVI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Topographic Effects: A Case Study in High-Density Cypress Forest. **Sensors**, v. 7, n. 11 p.2636-2651, 2007.

MATZENAUER, R. **Modelos agrometeorológicos para estimativa do rendimento de milho, em função da disponibilidade hídrica no Estado do Rio Grande do Sul**. Tese de doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, p. 172, 1994.

MENDES, A, A, T, **Irrigação: tecnologia e produtividade**, In: Simpósio Internacional De Fruticultura Irrigada, Jales, São Paulo. 1998.

MILANI, L.; SOUZA, E. G.; URIBE-OPAZO, M. A.; GABRIEL FILHO, A.; JOHANN, J. A.; PEREIRA J. O. Unidades de manejo a partir de dados de produtividade. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 28, n. 1, p. 591-598, 2006.

MOLIN J. P.; Amaral L, R, Colaço A. F. **Agricultura de precisão**. Oficina de Textos: São Paulo, p, 119-153, 2015.

Moreno, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul. Secretaria da agricultura**, Porto Alegre, p. 42, 1961.

MYNENI, R. B.; WILLIAMS, D. L. On the relationship between fAPAR and NDVI. **Remote Sensing of Environment**, v. 49, p. 200-211, 1994

NARVAEZ FY, REINA G, TORRES- TORRITI M, KANTOR G, CHEEIN F. A. A Survey of Ranging and Imaging Techniques for Precision Agriculture Phenotyping. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, v. 22, n. 6 2428-2439. 2017

NAVARRO, G.; CABALLERO, I.; SILVA, G.; PARRA, P.-C.; VÁZQUEZ, Á.; CALDEIRA, R. Evaluation of forest fire on Madeira Island using Sentinel-2A MSI imagery. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 58, p. 97-106, 2017

OLIVEIRA, M. F. **Modelo de predição de produtividade da cultura do milho por meio de NDVI em arranjos espaciais. Dissertação de mestrado** – Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, p. 44, 2017.

OLIVEIRA, R. F. **Estimativa da produtividade do algodoeiro a partir de índices de vegetação derivados de imagens orbitais de alta resolução espacial**. Dissertação de mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

OTEGUI, M. E.; BONHMME, R. Grain yield componentes in maize. I. Ear growth and kernel set. **Field Crops Research**, v. 56, p. 247-256, 1998.

PAULA, S. C.; VEDOVATO, L. B.; SILVA, G. B. S.; VICENTE, L. E. **Comparação entre os índices espectrais EVI e EVI 2 para discriminação de pastagens plantadas e naturais**. VII Congresso Interinstitucional de Iniciação Científica – CIIC. Campinas, São Paulo, p. 8, 2013.

PERALTA, N.; ASSEFA, Y.; DU, J.; BARDEN, C. J.; CIAMPITTI, I. A. Mid-season high-resolution satellite imagery for forecasting site-specific corn yield. **Remote Sensing**, v. 8, n. 10, p. 1-16, 2016.

PEREIRA, L. S.; CORDERY, I.; IACOVIDES, I. Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. **Agricultural Water Management**, v. 108, p. 39-51, 2012.

PONZONI, F, J.; SHIMABUKURO, Y, E.; KUPLISH, T, M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2º ed, São Paulo: Oficina de textos, p. 160, 2012.

PRASAD, A.; CHAI, L.; SINGH, R.; KAFATOS, M. Crop yield estimation model for Iowa using remote sensing and surface parameters. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 8, p. 26-33, 2006.

RITCHIE, S. W.; HANWAY, J. J.; BENSON, G. O. How a corn plant develops. Iowa: Special Bulletin, n. 48. 1993.

ROSA, R. **Introdução ao Sensoriamento Remoto**, Uberlândia: EDUFU, p. 264, 2003.

ROUSE I. W.; HAAS R. H.; SCHELL J. A.; DEERING D. W.; HARLAN J. C. **Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation**, NASA/GSFC Type III Final Report, Greenbelt, MD, p. 371, 1974

SAKAMOTO, T; GITELSON, A. A; ARKEBAUER, R., T. J. Near real-time prediction of U.S. corn yields based on time-series MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 147, p. 219-231, 2014.

SANGOI, L.; SILVA, P. G F.; ARGENTA. G.; RAMBO, I. **Ecofisiologia da cultura do milho para altos rendimentos**. Lages: Graphel, p. 87, 2010.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM RURAL. Agricultura de precisão: conceitos/Serviço Nacional de Aprendizagem Rural. – Brasília: Senar, 2019.

SCHWALBERT, R. A.; AMADO, T. J. C.; NIETO, L.; VALERA, S.; CORASSA, G. M.; HORBE, T. N.; RICE, C. W.; PERALTA, N. R.; CIAMPITTI, I. A. Forecasting maize yield at field scale based on high-resolution satellite imagery. **Biosystems Engineering**, v. 171, p. 179-192, 2018.

SEELAN, S. K.; LAGUETTE, S.; CASADY, G. M.; SEIELSTAD, G. A. Remote sensing applications for precision agriculture: A learning community approach. **Remote Sensing of Environment**, v. 88, n. 1-2, p. 157-169, 2003.

SETTI, A. A.; LIMA, J. E. F. W.; CHAVES, A. G. M.; PEREIRA, A. I. C. **Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos**, Brasília, DF: Agência Nacional de Energia Elétrica; Agência Nacional de Águas, 2001.

SHIRATSUCHI L. S.; BRANDÃO Z. N.; VICENTE L. E.; VICTORIA, D. C.; DUCATI, J. R.; OLIVEIRA, R. P.; VILELA, M. F. **Sensoriamento Remoto: conceitos básicos e aplicações na Agricultura de Precisão**. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y.; Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar. Brasília: EMBRAPA, 2014, c. 4, p. 58-73, 2014.

TAN, C.; SAMANTA, A.; JIN, X.; TONG, L.; MA, C.; GUO, W.; KNYAZIKHIN, Y.; MYNENI, R. B. Using hyperspectral vegetation indices to estimate the fraction of photosynthetically active radiation absorbed by corn canopies. **International Journal of Remote Sensing**, v. 34, p. 8789-8802, 2013.

TARAZONA, Y.; MANTAS, V. M.; PEREIRA, A. J. S. C. Improving tropical deforestation detection through using photosynthetic vegetation time series – (PVts- $\beta$ ). **Ecological Indicators**, v. 94, p. 367-379, 2018.

USDA - United States Department of Agriculture. World Agriculture Production. 2018. Available from: <<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf>>.

VARELLA, C. A. A.; MEDEIROS, R.; GLERIANI, J. M. Agricultura de Precisão e Sensoriamento Remoto. In: SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. **Cana de açúcar: bioenergia, açúcar e etanol: 58 tecnologias e perspectivas**. 2ed.rev e ampl. Viçosa, MG: Os editors, 2011. Cap. 9, p. 258.

VILLALBA E. O. H. **Nutritional status of corn evaluated by optical spectroscopy in Paraguay**. Tese de doutorado - Universidade Federal de Santa Maria, p. 132, 2012.

WREGGE, M, S; STEINMETZ, S; JÚNIO, C, R; ALMEIDA, I, R. Atlas Climático da Região Sul do Brasil. 2º edição, Embrapa, Brasília, DF, 2012.

YIN, X. **Quantifying the effects of temperature and photoperiod on phenological development to flowering in rice**. Tese de doutorado - Wageningen Agricultural University, Wageningen. p. 173, 1996.

ZANZARINI, F. V.; PISSARRA, T. C. T.; BRANDÃO, F. J. C.; TEIXEIRA, D. B. Correlação espacial do índice de vegetação (NDVI) de imagem Landsat / ETM + com atributos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 6, p. 608–614, 2013.

ZERBATO, C.; ROSALEN, D. L.; FURLANI C. E. A.; DEGHAID J.; VOLTARELLI, M. A. Agronomic characteristics associated with the normalized difference vegetation index (NDVI) in the peanut crop. **Australian Journal of Crop Science**, v. 10, p. 758-764, 2016.

ZHANG, B.; LIU, Y.; XU, D.; ZHAO, N.; LEI, B.; ROSA, R. D.; PAREDES, P.; PAÇO, T. A.; PEREIRA, I. s. The dual crop coefficient approach to estimate and partitioning evapotranspiration of the winter wheat–summer maize crop sequence in North China Plain. **Irrigation Science**, v. 31, n. 6, p. 1303-1316, 2013.

ZIPPER, S. C.; QIU, J.; KUCHARIK, C. J. Drought effects on US maize and soybean production: spatiotemporal patterns and historical changes. **Environmental Research Letters**, v. 11, n. 9, p. 1-11, 2016.

## REFERÊNCIAS QUE USEI PARA FORMAÇÃO DO MEU CONHECIMENTO PARA ESCREVER A DISSERTAÇÃO

ALMEIDA, M. B. F.; SIMÕES, M.; FERRAZ, R. P. D. **Aplicação de sensoriamento remoto no estudo dos níveis de degradação de pastagens**. In: Tullio, L. Aplicações e princípios do sensoriamento remoto. Atena Editora, c. 2, p. 11-21, 2019.

ANDRADE, A. B. S. **Utilização dos índices NDWI e MNDWI na detecção de corpos hídricos em imagens Sentinel-2 na Bacia Hidrográfica do Rio Traipu – Alagoas**. Trabalho de conclusão de curso - Universidade Federal de Alagoas, Rio Largos – AL, p. 35, 2019.

BASNYAT, P.; MCCONKEY, B.; LAFOND, G.; MOULIN, A.; PELCAT, Y. Optimal time for remote sensing to relate to crop grain yield on the Canadian prairies. **Canadian Journal Plant Science**, p. 97-103, 2004.

BERNARDI, A. C. C, NAIME, J. M, RESENDE, A. V, BASSOI, L. H, INAMASU, R. Y. **Agricultura de precisão: Resultados de um novo olhar**. Embrapa. Brasília, DF, p. 596, 2014.

CAVIGLIA, O. P.; MELCHIORI, R. J. M.; SADRAS, V. O. Nitrogen utilization efficiency in maize as affected by hybrid and N rate in late-sown crops. **Field Crops Research**, v. 168, p. 27-37, 2014.

CRUZ-BLANCO, M.; LORITE, I. J.; SANTOS, C. An innovative remote sensing based reference evapotranspiration method to support irrigate ion water management under semi-arid conditions. **Agricultural Water Management**, v. 131, p. 135-145, 2014.

HASSAN, M. A.; YANG, M.; RASHEED, A.; YANG, G.; REYNOLDS, M.; XIA, X.; XIAO, Y.; HE, Z. A rapid monitoring of NDVI across the wheat growth cycle for grain yield prediction using a multi-spectral UAV platform. **Plant Science**, v. 282, p. 95-103, 2019.

HÜTSCH, B. W.; SCHUBERT, S. Maize harvest index and water use efficiency can be improved by inhibition of gibberellin biosynthesis. **Journal of Agronomy and Crop Science** v. 204, p.209-218, 2018.

JIN, L.; ZHANG, L.; WYLIE, B. Analysis of Dynamic Thresholds for the Normalized Difference Water Index. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 75, n. 11, p.1307-1317, 2009.

JUNGES, A. H.; FONTANA, D. C.; ANZANELLO, F.; BREMM, C. Normalizes difference vegetation index obtained by ground-based remote sensing to characterize vine cycle in Rio Grande do Sul. Brazil, **Ciência e Agrotecnologia**, v. 41, n. 5, p. 543-553, 2017.

PERES, G. G. **Uso de imagens do Sentinel 2 na estimativa de parâmetros biofísicos da vegetação em áreas de Mata Atlântica**. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de São Carlos. São carlos – SP, p. 142, 2018.

RICHETTI, J.; BOOTE, K. J.; HOOGENBOOM, G.; JUDGE, J.; JOHANN, J. A.; URIBE-OPAZO, M. A. Remotely sensed vegetation index and LAI for parameter determination of the

CSM-CROPGRO-Soybean model when in situ data are not available. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.79, p.110-115, 2019.

SANTI, A. L.; AMADO, T. J. C.; EITELWEIN, M. T.; CHERUBIN, M. R.; DA SILVA, R. F.; DA ROS, C. O. Definição de zonas de produtividade em áreas manejadas com agricultura de precisão. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 8, n. 3, p. 510-515, 2013.

WALSH, O.; KLATT, A.; SOLIE, J.; GODSEY, C.; RAUN, W. Use of soil moisture data for refined Green Seeker sensor based nitrogen recommendations in winter wheat (*Triticum aestivum* L.). **Precision Agriculture**, v. 14, p. 343-356, 2012.

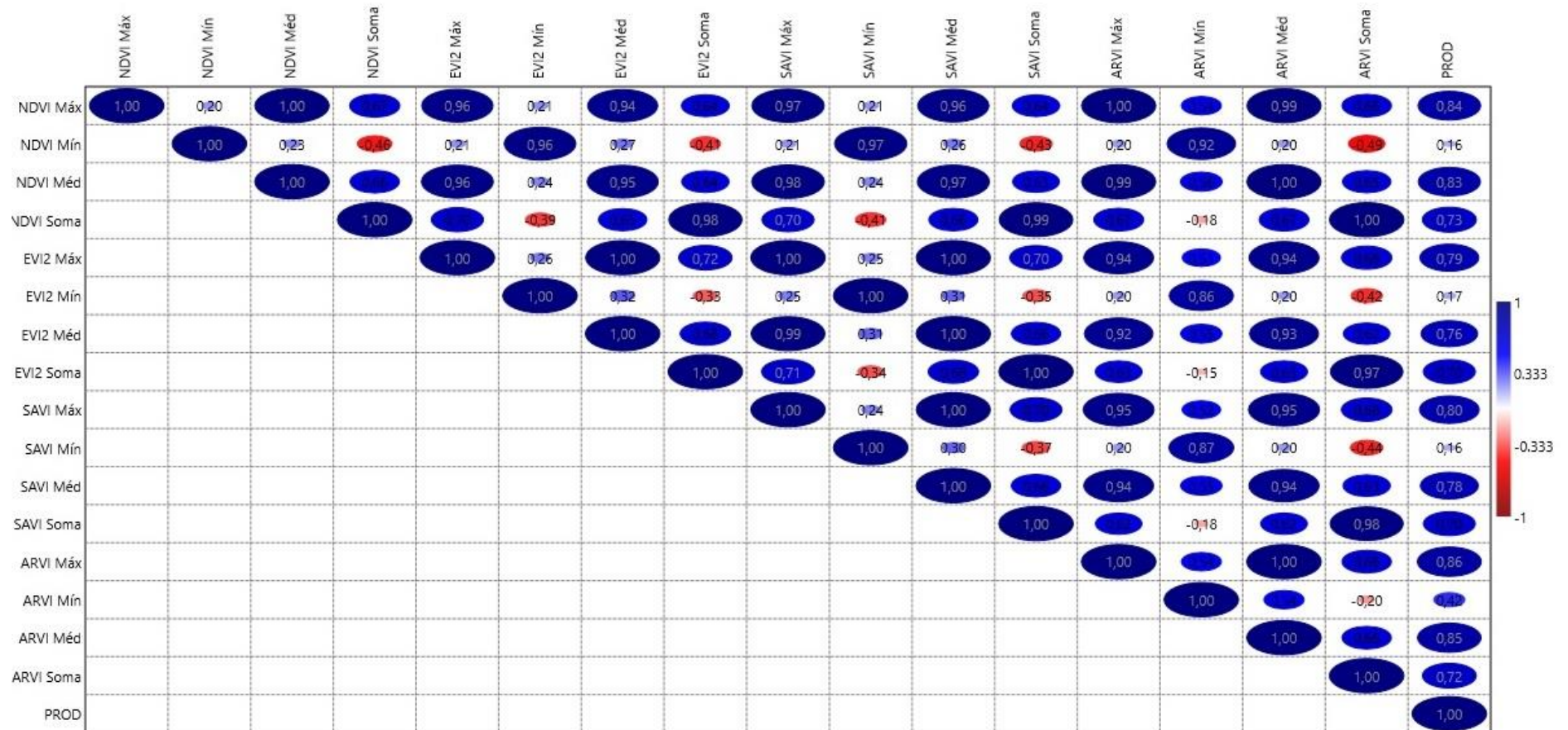
## 6 ANEXOS

Anexo 1 - Correlação de Pearson das áreas nos estádios V6 a V10

	NDVI Máx	NDVI Mín	NDVI Méd	NDVI Soma	EVI2 Máx	EVI2 Mín	EVI2 Méd	EVI2 Soma	SAVI Máx	SAVI Mín	SAVI Méd	SAVI Soma	ARVI Máx	ARVI Mín	ARVI Méd	ARVI Soma	PROD
NDVI Máx		0,57	0,00	0,03	0,00	0,55	0,00	0,05	0,00	0,56	0,00	0,05	0,00	0,11	0,00	0,04	0,00
NDVI Mín	0,20		0,52	0,18	0,55	0,00	0,46	0,24	0,56	0,00	0,47	0,21	0,58	0,00	0,58	0,15	0,66
NDVI Méd	1,00	0,23		0,04	0,00	0,50	0,00	0,05	0,00	0,51	0,00	0,05	0,00	0,09	0,00	0,04	0,00
NDVI Soma	0,67	-0,46	0,66		0,02	0,26	0,04	0,00	0,02	0,24	0,04	0,00	0,03	0,62	0,03	0,00	0,02
EVI2 Máx	0,96	0,21	0,97	0,70		0,47	0,00	0,02	0,00	0,48	0,00	0,02	0,00	0,13	0,00	0,03	0,01
EVI2 Mín	0,21	0,96	0,24	-0,39	0,26		0,37	0,36	0,48	0,00	0,39	0,32	0,58	0,00	0,57	0,23	0,63
EVI2 Méd	0,94	0,27	0,95	0,65	1,00	0,32		0,03	0,00	0,38	0,00	0,04	0,00	0,10	0,00	0,05	0,01
EVI2 Soma	0,64	-0,41	0,64	0,98	0,72	-0,33	0,68		0,02	0,33	0,03	0,00	0,05	0,67	0,05	0,00	0,02
SAVI Máx	0,97	0,21	0,98	0,70	1,00	0,25	0,99	0,71		0,50	0,00	0,03	0,00	0,13	0,00	0,03	0,01
SAVI Mín	0,21	0,97	0,24	-0,41	0,25	1,00	0,31	-0,34	0,24		0,40	0,29	0,59	0,00	0,58	0,21	0,65
SAVI Méd	0,96	0,26	0,97	0,66	1,00	0,31	1,00	0,68	1,00	0,30		0,04	0,00	0,10	0,00	0,05	0,01
SAVI Soma	0,64	-0,43	0,63	0,99	0,70	-0,35	0,66	1,00	0,70	-0,37	0,66		0,05	0,63	0,05	0,00	0,03
ARVI Máx	1,00	0,20	0,99	0,67	0,94	0,20	0,92	0,63	0,95	0,20	0,94	0,62		0,11	0,00	0,04	0,00
ARVI Mín	0,54	0,92	0,56	-0,18	0,51	0,86	0,55	-0,15	0,52	0,87	0,55	-0,18	0,54		0,11	0,57	0,23
ARVI Méd	0,99	0,20	1,00	0,67	0,94	0,20	0,93	0,63	0,95	0,20	0,94	0,62	1,00	0,54		0,04	0,00
ARVI Soma	0,66	-0,49	0,65	1,00	0,68	-0,42	0,62	0,97	0,68	-0,44	0,63	0,98	0,66	-0,20	0,66		0,02
PROD	0,84	0,16	0,83	0,73	0,79	0,17	0,76	0,70	0,80	0,16	0,78	0,70	0,86	0,42	0,85	0,72	

Nota - Valores da significância: P superiores a 0,050, não há relação significativa entre as duas variáveis. Fonte: a autora (2022).

## Anexo 2 - Intensidade da correlação de Pearson para os dados das áreas quando em estágio V6 a V10



Nota - Valores acima de 0,5 apresentam uma intensidade maior na correlação entre os índices e a produtividade. Fonte: a autora (2022).

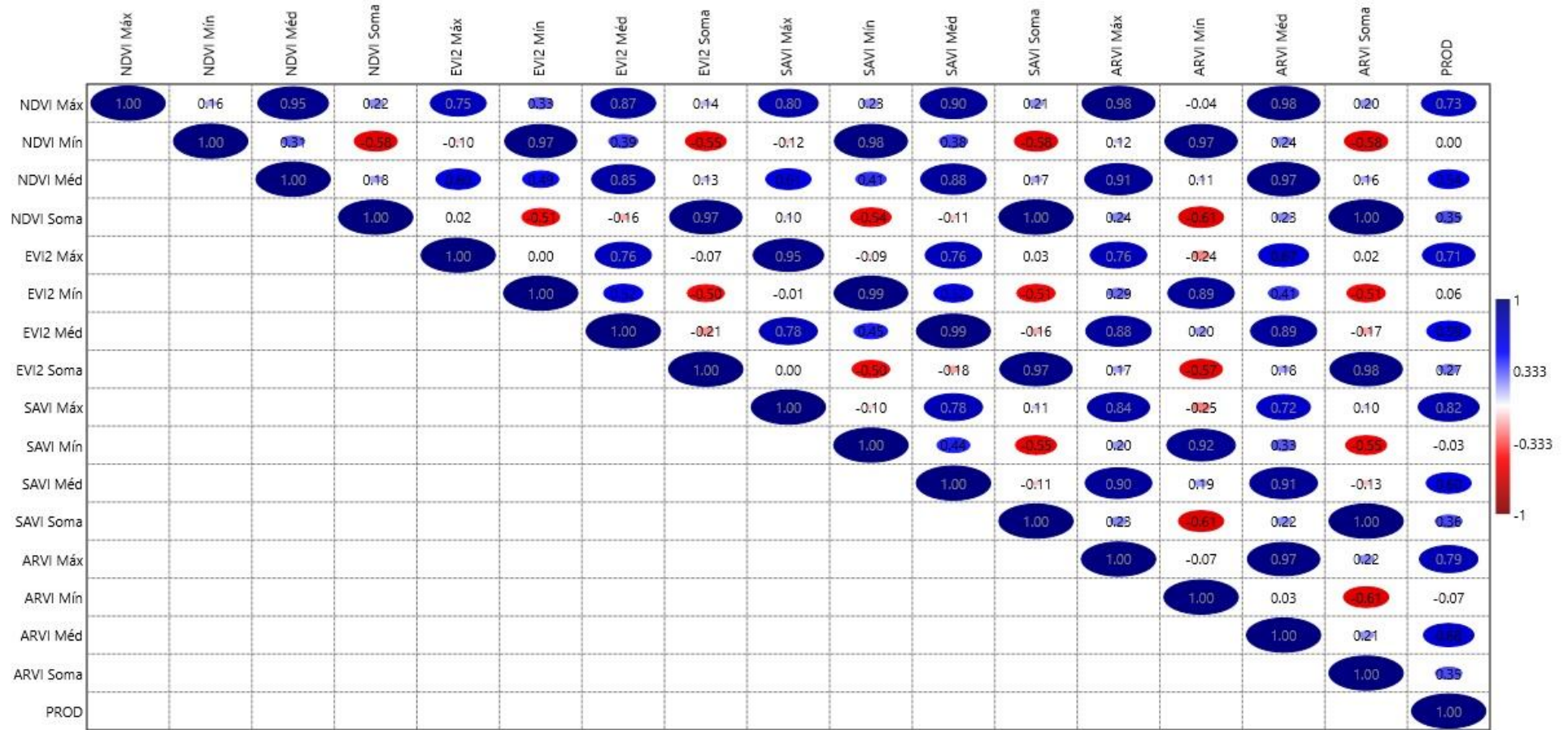


## Anexo 3 - Correlação de Pearson das áreas em estádio R1/R2

	NDVI Máx	NDVI Mín	NDVI Méd	NDVI Soma	EVI2 Máx	EVI2 Mín	EVI2 Méd	EVI2 Soma	SAVI Máx	SAVI Mín	SAVI Méd	SAVI Soma	ARVI Máx	ARVI Mín	ARVI Méd	ARVI Soma	PROD
NDVI Máx		0,64	0,07	0,51	0,01	0,32	0,00	0,69	0,00	0,49	0,00	0,53	0,00	0,92	0,00	0,55	0,01
NDVI Mín	0,16		0,35	0,06	0,76	0,00	0,24	0,08	0,73	0,00	0,25	0,06	0,72	0,01	0,48	0,06	1,00
NDVI Méd	0,95	0,31		0,60	0,05	0,13	0,00	0,71	0,05	0,21	0,00	0,62	0,00	0,76	0,00	0,64	0,08
NDVI Soma	0,22	-0,58	0,18		0,95	0,11	0,64	0,00	0,76	0,09	0,75	0,00	0,48	0,05	0,50	0,00	0,29
EVI2 Máx	0,75	-0,10	0,60	0,02		1,00	0,01	0,83	0,09	0,79	0,01	0,94	0,01	0,48	0,02	0,96	0,02
EVI2 Mín	0,33	0,97	0,49	-0,51	0,00		0,10	0,12	0,98	0,00	0,10	0,11	0,39	0,00	0,21	0,11	0,87
EVI2 Méd	0,87	0,39	0,85	-0,16	0,76	0,52		0,55	0,00	0,16	0,00	0,64	0,00	0,55	0,00	0,61	0,06
EVI2 Soma	0,14	-0,55	0,13	0,97	-0,07	-0,50	-0,21		0,99	0,11	0,60	0,00	0,61	0,07	0,60	0,00	0,42
SAVI Máx	0,80	-0,12	0,61	0,10	0,95	-0,01	0,78	0,00		0,76	0,00	0,75	0,00	0,46	0,01	0,77	0,00
SAVI Mín	0,23	0,98	0,41	-0,54	-0,09	0,99	0,45	-0,50	-0,10		0,18	0,08	0,56	0,56	0,33	0,08	0,94
SAVI Méd	0,90	0,38	0,88	-0,11	0,76	0,52	0,99	-0,18	0,78	0,44		0,74	0,00	0,58	0,99	0,71	0,05
SAVI Soma	0,21	-0,58	0,17	1,00	0,03	-0,51	-0,16	0,97	0,11	-0,55	-0,11		0,49	0,05	0,52	0,00	0,28
ARVI Máx	0,98	0,12	0,91	0,24	0,76	0,29	0,88	0,17	0,84	0,20	0,90	0,23		0,84	0,00	0,51	0,00
ARVI Mín	-0,04	0,97	0,11	-0,61	-0,24	0,89	0,20	-0,57	-0,25	0,92	0,19	-0,61	-0,07		0,92	0,05	0,83
ARVI Méd	0,98	0,24	0,97	0,23	0,67	0,41	0,89	0,18	0,72	0,33	0,91	0,22	0,97	0,03		0,54	0,02
ARVI Soma	0,20	-0,58	0,16	1,00	0,02	-0,51	-0,17	0,98	0,10	-0,55	-0,13	1,00	0,22	-0,61	0,21		0,29
PROD	0,73	0,00	0,54	0,35	0,71	0,06	0,59	0,27	0,82	-0,03	0,60	0,36	0,79	-0,07	0,68	0,35	

Nota - Valores da significância: P superiores a 0,050, não há relação significativa entre as duas variáveis. Fonte: a autora (2022).

Anexo 4 - Intensidade da correlação de Pearson para os dados das áreas quando em estágio R1/R2



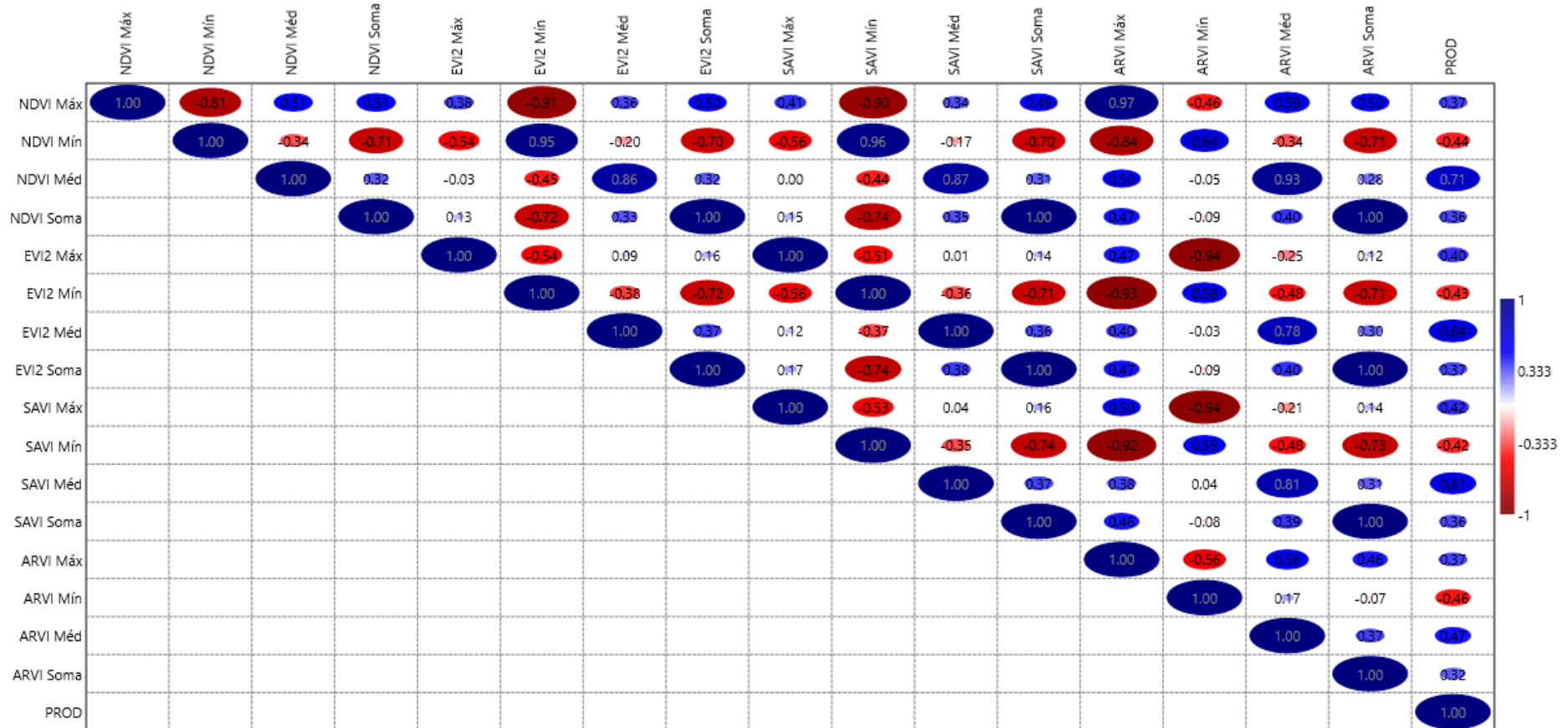
Nota - Valores acima de 0,5 apresentam uma intensidade maior na correlação entre os índices e a produtividade. Fonte: a autora (2022).

## Anexo 5 - Correlação de Pearson das áreas em estádio R4

	NDVI Máx	NDVI Mín	NDVI Méd	NDVI Soma	EVI2 Máx	EVI2 Mín	EVI2 Méd	EVI2 Soma	SAVI Máx	SAVI Mín	SAVI Méd	SAVI Soma	ARVI Máx	ARVI Mín	ARVI Méd	ARVI Soma	PROD
NDVI Máx		0,00	0,14	0,13	0,27	0,00	0,30	0,14	0,24	0,00	0,33	0,15	0,04	0,18	0,07	0,14	0,29
NDVI Mín	-0,81		0,33	0,02	0,11	0,18	0,59	0,02	0,09	0,11	0,63	0,03	0,00	0,05	0,34	0,02	0,20
NDVI Méd	0,51	-0,34		0,37	0,93	0,19	0,00	0,36	1,00	0,20	0,00	0,38	0,14	0,89	0,00	0,44	0,02
NDVI Soma	0,51	-0,71	0,32		0,71	0,02	0,35	0,00	0,68	0,01	0,32	0,00	0,17	0,81	0,25	0,00	0,30
EVI2 Máx	0,38	-0,54	-0,03	0,13		0,11	0,80	0,67	0,00	0,13	0,97	0,69	0,17	0,68	0,49	0,73	0,25
EVI2 Mín	-0,91	0,95	-0,45	-0,72	-0,54		0,28	0,02	0,09	0,00	0,31	0,02	0,96	0,08	0,16	0,02	0,21
EVI2 Méd	0,36	-0,20	0,86	0,33	0,09	-0,38		0,29	0,75	0,29	0,00	0,31	0,25	0,94	0,01	0,40	0,05
EVI2 Soma	0,50	-0,70	0,32	1,00	0,16	-0,72	0,37		0,63	0,01	0,27	0,00	0,17	0,80	0,25	0,00	0,30
SAVI Máx	0,41	-0,56	0,00	0,15	1,00	-0,56	0,12	0,17		0,11	0,91	0,66	0,14	0,53	0,55	0,70	0,23
SAVI Mín	-0,90	0,96	-0,44	-0,74	-0,51	1,00	-0,37	-0,74	-0,53		0,32	0,02	0,00	0,10	0,16	0,02	0,22
SAVI Méd	0,34	-0,17	0,87	0,35	0,01	-0,36	1,00	0,38	0,04	-0,35		0,29	0,28	0,90	0,00	0,38	0,06
SAVI Soma	0,49	-0,70	0,31	1,00	0,14	-0,71	0,36	1,00	0,16	-0,74	0,37		0,18	0,82	0,26	0,00	0,31
ARVI Máx	0,97	-0,84	0,50	0,47	0,47	-0,93	0,40	0,47	0,50	-0,92	0,38	0,46		0,09	0,10	0,18	0,29
ARVI Mín	-0,46	0,64	-0,05	-0,09	-0,94	0,58	-0,03	-0,09	-0,94	0,55	0,04	-0,08	-0,56		0,64	0,84	0,18
ARVI Méd	0,59	-0,34	0,93	0,40	-0,25	-0,48	0,78	0,40	-0,21	-0,48	0,81	0,39	0,56	0,17		0,29	0,17
ARVI Soma	0,50	-0,71	0,28	1,00	0,12	-0,71	0,30	1,00	0,14	-0,73	0,31	1,00	0,46	-0,07	0,37		0,37
PROD	0,37	-0,44	0,71	0,36	0,40	-0,43	0,64	0,37	0,42	-0,42	0,61	0,36	0,37	-0,46	0,47	0,32	

Nota - Valores da significância: P superiores a 0,050, não há relação significativa entre as duas variáveis. Fonte: a autora (2022).

Anexo 6 - Intensidade da correlação de Pearson para os dados das áreas quando em estádio R4



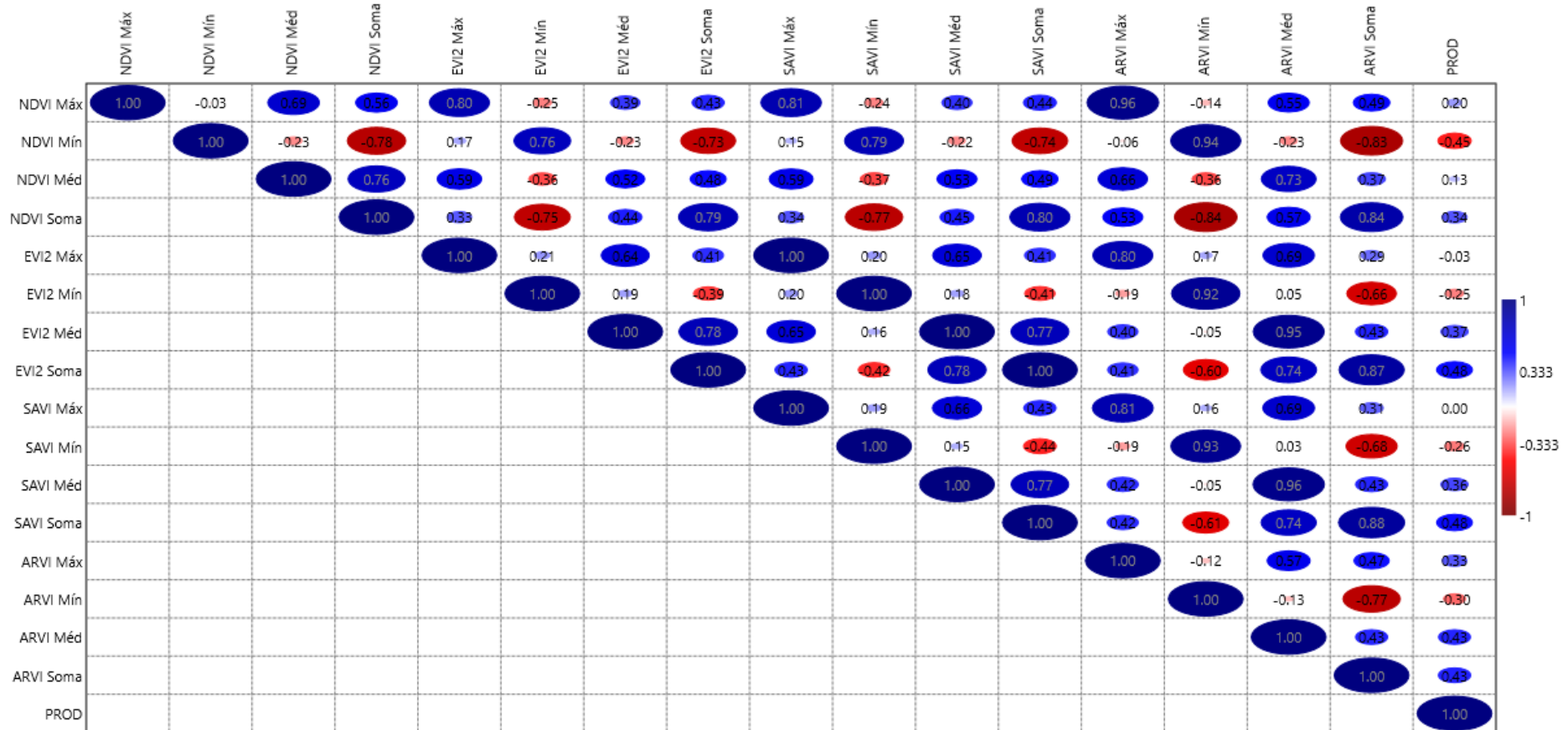
Nota - Valores acima de 0,5 apresentam uma intensidade maior na correlação entre os índices e a produtividade. Fonte: a autora (2022).

## Anexo 7 - Correlação de Pearson das áreas em estádio R5.

	NDVI Máx	NDVI Mín	NDVI Méd	NDVI Soma	EVI2 Máx	EVI2 Mín	EVI2 Méd	EVI2 Soma	SAVI Máx	SAVI Mín	SAVI Méd	SAVI Soma	ARVI Máx	ARVI Mín	ARVI Méd	ARVI Soma	PROD
NDVI Máx		0,93	0,03	0,10	0,01	0,49	0,26	0,22	0,00	0,50	0,25	0,20	0,13	0,71	0,10	0,15	0,59
NDVI Mín	-0,03		0,53	0,01	0,64	0,01	0,52	0,02	0,68	0,01	0,53	0,01	0,88	0,63	0,52	0,00	0,20
NDVI Méd	0,69	-0,23		0,01	0,07	0,31	0,13	0,16	0,07	0,30	0,11	0,15	0,04	0,30	0,02	0,30	0,72
NDVI Soma	0,56	-0,78	0,76		0,36	0,01	0,20	0,01	0,34	0,01	0,19	0,01	0,11	0,00	0,08	0,00	0,34
EVI2 Máx	0,80	0,17	0,59	0,33		0,57	0,05	0,24	0,00	0,58	0,04	0,24	0,01	0,64	0,03	0,42	0,94
EVI2 Mín	-0,25	0,76	-0,36	-0,75	0,21		0,61	0,27	0,59	0,00	0,61	0,24	0,60	0,00	0,89	0,04	0,49
EVI2 Méd	0,39	-0,23	0,52	0,44	0,64	0,19		0,01	0,04	0,67	0,00	0,01	0,25	0,90	0,28	0,21	0,30
EVI2 Soma	0,43	-0,73	0,48	0,79	0,41	-0,39	0,78		0,21	0,23	0,01	0,00	0,24	0,07	0,01	0,00	0,16
SAVI Máx	0,81	0,15	0,59	0,34	1,00	0,20	0,65	0,43		0,60	0,04	0,21	0,00	0,66	0,03	0,38	0,99
SAVI Mín	-0,24	0,79	-0,37	-0,77	0,20	1,00	0,16	-0,42	0,19		0,67	0,21	0,60	0,81	0,95	0,03	0,47
SAVI Méd	0,40	-0,22	0,53	0,45	0,65	0,18	1,00	0,78	0,66	0,15		0,01	0,23	0,90	0,17	0,22	0,30
SAVI Soma	0,44	-0,74	0,49	0,80	0,41	-0,41	0,77	1,00	0,43	-0,44	0,77		0,23	0,06	0,01	0,00	0,16
ARVI Máx	0,96	-0,06	0,66	0,53	0,80	-0,19	0,40	0,41	0,81	-0,19	0,42	0,42		0,75	0,08	0,17	0,35
ARVI Mín	-0,14	0,94	-0,36	-0,84	0,17	0,92	-0,05	-0,60	0,16	0,93	-0,05	-0,61	-0,12		0,73	0,01	0,41
ARVI Méd	0,55	-0,23	0,73	0,57	0,69	0,05	0,95	0,74	0,69	0,03	0,96	0,74	0,57	-0,13		0,22	0,22
ARVI Soma	0,49	-0,83	0,37	0,84	0,29	-0,66	0,43	0,87	0,31	-0,68	0,43	0,88	0,47	-0,77	0,43		0,21
PROD	0,20	-0,45	0,13	0,34	-0,03	-0,25	0,37	0,48	0,00	-0,26	0,36	0,48	0,33	-0,30	0,43	0,43	

Nota - Valores da significância: P superiores a 0,050, não há relação significativa entre as duas variáveis. Fonte: a autora (2022).

Anexo 8 - Intensidade da correlação de Pearson para os dados das áreas quando em estágio R5.



Nota - Valores acima de 0,5 apresentam uma intensidade maior na correlação entre os índices e a produtividade. Fonte: a autora (2022).