

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

SABRINA CASSIA FERNANDES

**ÍNDICES DE VEGETAÇÃO PARA DIAGNÓSTICO NUTRICIONAL DE
NITROGÊNIO NA CULTURA DO MILHO A PARTIR DE IMAGENS GERADAS POR
DRONE**

DISSERTAÇÃO

**PATO BRANCO
2023**

SABRINA CASSIA FERNANDES

**ÍNDICES DE VEGETAÇÃO PARA DIAGNÓSTICO NUTRICIONAL DE
NITROGÊNIO NA CULTURA DO MILHO A PARTIR DE IMAGENS GERADAS POR
DRONE**

**Vegetation Index for nutritional diagnosis of nitrogen in corn crop from images
generated by drone**

Dissertação apresentada como requisito parcial à
obtenção do título de Mestre em Agronomia - Área
de Concentração: Solos e Sistemas Integrados de
Produção Agropecuária da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. José Ricardo da Rocha
Campos

Co-Orientador: Prof. Dr. Alcir José Modolo

**PATO BRANCO
2023**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Atribuição – Uso Não Comercial (CC BY-NC) - Permite que outros remixem, adaptem e criem obras derivadas sobre a obra licenciada, sendo vedado o uso com fins comerciais. As novas obras devem conter menção ao autor nos créditos e também não podem ser usadas com fins comerciais. Porém as obras derivadas não precisam ser licenciadas sob os mesmos termos desta licença.



28/03/2023, 18:17

SABRINA CASSIA FERNANDES

Data de aprovação: 06 de Março de 2023

ÍNDICES DE VEGETAÇÃO PARA DIAGNÓSTICO NUTRICIONAL DE NITROGÊNIO NA CULTURA DO MILHO A PARTIR DE IMAGENS GERADAS POR DRONE

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre em Agronomia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Área de concentração: Solos E Sistemas Integrados De Produção Agropecuária.

Dr. Jose Ricardo Da Rocha Campos, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Adao Robson Elias, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Mayara Neves Santos Guedes, Doutorado - Universidade Federal do Pará (Ufpa)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 06/03/2023.

Dedico este trabalho à minha família, por todo o apoio, compreensão, incentivo e amor. Dedico também esse trabalho para a Sabrina de 10 anos atrás, aquela que já planejava o futuro e sonhava em fazer a diferença, tenho certeza que ela está muito orgulhosa da atual versão, do que conquistou e do que ainda vai conquistar.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gratidão a Deus que me abençoou e me protegeu durante toda essa jornada, ele que permitiu que eu estivesse aqui para realizar esse sonho.

Agradeço de todo o coração ao meu marido Luiz Roberto Lazarroto Júnior, meu companheiro e melhor amigo. Gratidão por ser meu maior incentivador e por acreditar em mim desde o começo. Obrigada por todo seu amor, incentivo, respeito e ajuda durante todo o processo, desde a implantação do experimento até aqui. Te amo.

Gratidão a minha família por todo o apoio, amor e incentivo, principalmente aos meus sogros Mari Lúcia Lazarotto e Nelson Leodir Martinelli que me deram o maior suporte para essa conquista.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. José Ricardo da Rocha Campos e co-orientador Prof. Dr. Alcir José Modolo, por acreditarem no meu potencial e me guiarem durante toda essa jornada, sempre com dedicação, paciência e compartilhando todo o conhecimento.

Agradeço também ao Prof. Dr. Adão Robson Elias por ter disponibilizado seu tempo para realizar os três sobrevoos com o drone e processamento das imagens para avaliação do experimento, sempre auxiliando e sanando todas as dúvidas durante a dissertação.

Gratidão aos técnicos da área experimental da UTFPR-PB por toda a ajuda fornecida na implantação do experimento.

Agradeço ao LABSOLOS da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Pato Branco, pela realização das análises foliares e análise de solo.

A coordenação do Programa de Pós- Graduação em Agronomia PPAG-PB, agradeço pela cooperação.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa deixo aqui minha enorme gratidão.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação Araucária de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Estado do Paraná (FA) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

A persistência é o caminho do êxito.
(CHAPLIN, 1997).

RESUMO

FERNANDES, Sabrina Cassia. **Índices de Vegetação Para Diagnóstico Nutricional de Nitrogênio na Cultura do Milho a Partir de Imagens Geradas por Drone.** 2023. 45 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Área de Concentração: Solos e Sistemas Integrados de Produção Agropecuária), Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Pato Branco, 2023.

No Brasil, em função das características edafoclimáticas, a cultura do milho apresenta elevado potencial produtivo, desde que sejam adotadas práticas adequadas de correção do solo e de adubação. Neste sentido, a adubação nitrogenada merece atenção especial, principalmente por que o fertilizante mais utilizado no Brasil é a ureia, cuja dinâmica no solo é complexa, podendo ocorrer perdas por volatilização. Para evitar perdas na produção, a melhor estratégia é o monitoramento da lavoura por meio de análises foliares que, apesar de onerar a produção não fornece um resultado imediato, o que, muitas vezes, não permite uma intervenção em tempo hábil. No presente trabalho, o objetivo foi diagnosticar deficiência nutricional de N na cultura do milho por meio de Índices de Vegetação (NDVI e VARI) gerados a partir de imagens geradas por drones. Foi utilizado o delineamento de blocos ao acaso com quatro tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos foram compostos por doses diferenciadas para a simulação da deficiência de nitrogênio (N), sendo (50, 100, 150, 200 e 250 kg de N ha⁻¹). As doses de N foram parceladas em três fases, plantio, estádios V₄ e V₆, respectivamente. Foram realizadas coletas para análise foliar dos teores de N, em três diferentes estágios fenológicos da cultura, V₄, V₈ e R₂. Antes de cada coleta eram realizados voos com VANT equipado com uma câmera multiespectral de alta resolução, a qual permite a geração de imagens e posteriormente os Índices de Vegetação (IV). Os voos foram realizados no horário do meio-dia, pois os ângulos dos raios de sol são mais verticais. As imagens foram processadas usando o software QGIS®, seguindo as equações de cada índice. Após a colheita do milho, avaliou-se as variáveis diâmetro de espigas (DE), número de fileiras de grãos por espiga (NGE), número de grãos por fileira (NGF), peso de mil grãos (PMG), comprimento de espigas (CME) e produtividade (PROD). Concluiu-se que os índices estudados (NDVI e VARI) podem ser utilizados para otimizar processos e aumentar a precisão e monitoramento nutricional da cultura, pois os mesmo se mostraram eficazes para detectar o estado nutricional da cultura durante todas as fases em que realizou-se as avaliações, V₄, V₈ e R₂. Já em relação aos principais componentes de rendimento constatou-se uma correlação positiva, onde o índice NDVI apresentou-se mais eficiente que o VARI para predição dos componentes de rendimento.

Palavras-chave: Índices de Vegetação, nitrogênio, drone.

ABSTRACT

FERNANDES, Sabrina Cassia. **Vegetation Indexes for Nutritional Diagnosis of Nitrogen in Maize Crops Based on Drone-Generated Images**. 2023. 45 f. Dissertation (Masters in Agronomy) - Graduate Program in Agronomy (Concentration Area: Soils and Integrated Plant Production Systems), Federal University of Technology - Paraná (UTFPR). Pato Branco, 2023.

In Brazil, due to the edaphoclimatic characteristics, the corn crop has a high productive potential, provided that appropriate soil correction and fertilization practices are adopted. In this sense, nitrogen fertilization deserves special attention, mainly because the most used fertilizer in Brazil is urea, whose dynamics in the soil is complex, and losses due to volatilization may occur. To avoid losses in production, the best strategy is to monitor the crop through foliar analysis which, despite costing production, does not provide an immediate result, which often does not allow timely intervention. In the present work, the objective was to diagnose nutritional N deficiency in maize through Vegetation Indices (NDVI and VARI) generated from images generated by drones. A randomized block design with four treatments and four replications was used. The treatments consisted of different doses to simulate nitrogen (N) deficiency, being (50, 100, 150, 200 and 250 kg of N ha⁻¹). The N doses were divided into three phases, planting, V4 and V6 stages, respectively. Collections were carried out for foliar analysis of N levels, in three different phenological stages of the crop, V4, V8 and R2. Before each collection, flights were performed with a UAV equipped with a high-resolution multispectral camera, which allows the generation of images and subsequently the Vegetation Index (VI). The flights were carried out at noon, as the angles of the sun's rays are more vertical. The images were processed using the QGIS® software, following the equations of each index. After corn harvesting, the variables ear diameter (DE), number of rows of grains per ear (NGE), number of grains per row (NGF), thousand-grain weight (PMG), length of ears (CME) and productivity (PROD). It was concluded that the studied indices (NDVI and VARI) can be used to optimize processes and increase the accuracy and nutritional monitoring of the crop, as they proved to be effective in detecting the nutritional status of the crop during all phases in which it was carried out. the evaluations, V4, V8 and R2. In relation to the main components of income, a positive correlation was found, where the NDVI index was more efficient than the VARI for predicting the components of income.

Keywords: Vegetation Indices, nitrogen, drone.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 - Distribuição dos blocos e tratamentos dentro da área experimental localizada na UTFPR de Pato branco, 2023. **Error! Bookmark not defined.**
- Figura 2 - Relação entre o NDVI e as doses de nitrogênio (A), Relação entre o VARI e as doses de nitrogênio (B), Relação entre o Teor de nitrogênio foliar e o NDVI (C) e Relação entre o Teor de nitrogênio foliar e o VARI em estádios fisiológicos V₄ (quarta folha) do milho..... **Error! Bookmark not defined.**
- Figura 3 - Distribuição espacial de valores de NDVI (A) e Distribuição espacial de valores de VARI (B) obtida no estádio de desenvolvimento V₄.**Error! Bookmark not defined.**
- Figura 4 - Relação entre o NDVI e as doses de nitrogênio (A), Relação entre o VARI e as doses de nitrogênio (B), Relação entre o Teor de nitrogênio foliar e o NDVI (C) e Relação entre o Teor de nitrogênio foliar e o VARI em estádios fisiológicos V₈ (oitava folha) do milho..... **Error! Bookmark not defined.**
- Figura 5 - Distribuição espacial de valores de NDVI (A) e Distribuição espacial de valores de VARI (B) obtida no estádio de desenvolvimento V₈.**Error! Bookmark not defined.**
- Figura 6 - Relação entre o NDVI e as doses de nitrogênio (A), Relação entre o VARI e as doses de nitrogênio (B), Relação entre o Teor de nitrogênio foliar e o NDVI (C) e Relação entre o Teor de nitrogênio foliar e o VARI em estádios fisiológicos R₂ (Grão leitoso) do milho. **Error! Bookmark not defined.**
- Figura 7- Distribuição espacial de valores de NDVI (A) e Distribuição espacial de valores de VARI (B) obtida no estádio de desenvolvimento R₂.**Error! Bookmark not defined.**
- Figura 8 - Gráfico biplot do primeiro e segundo componentes principais do PCA com todas as observações de correlação entre as variáveis avaliadas, número de grão por fileira (NGF), comprimento de espiga (CME), número de grãos por espiga (NGE), peso de mil grãos (PMG), produtividade (PROD) e teor de nitrogênio foliar (NF) em relação aos índices de vegetação (NDVI e VARI).32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Resultados da análise do solo da área experimental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, na profundidade de 0 a 20 cm, Pato Branco, 2023.	19
Tabela 2 – Descrição dos tratamentos utilizados no experimento a campo em DBC com quatro repetições (UTFPR- Pato Branco, 2021/2022).....	20
Tabela 3- Tratos culturais realizados na cultura do milho durante a condução do experimento, (UTFPR- Pato Branco, 2021/2022).....	21
Tabela 4- Matriz de correlação entre as variáveis número de grãos por fileira (NGF), comprimento de espiga (CME), número de grãos por espiga (NGE), peso de mil grãos (PMG), produtividade (PROD) e teor de nitrogênio foliar (NF), nos estágios V4, V8 e R2.	33

LISTA DE ABREVIATURAS SIGLAS

ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
GIS	Geographic Information System
IV	Índices de Vegetação
N	Nitrogênio
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NIR	Faixa do infravermelho próximo
RGB	Red, Green, Blue
USDA	Departamento de Agricultura dos Estados Unidos
V ₄	Quarta folha
V ₈	Oitava folha
R ₂	Grão leitoso
VARI	Visible Atmospherically Resistant Index
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	Objetivos	10
1.1.1	Objetivo geral	10
1.1.2	Objetivos específicos.....	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1	Importância da cultura do milho e do monitoramento do seu estado nutricional..	11
2.2	Importância do Nitrogênio para as plantas	12
2.3	Agricultura de Precisão	14
2.4	Veículos Aéreos Não Tripuláveis (VANT)	15
2.5	Aplicabilidade dos Índices de Vegetação na agricultura	17
3	MATERIAL E MÉTODOS	19
3.1	Caracterização da área de estudo	19
3.2	Instalação e condução do experimento	19
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
4.1	Relação entre os teores de N e os Índices de vegetação no estágio V4 da cultura do milho.....	24
4.2	Relação entre os teores de N e os Índices de vegetação no estágio V8 da cultura do milh.....	26
4.3	Relação entre os teores de N e os Índices de vegetação no estágio R2 da cultura do milho.....	28
4.4	Relação entre os índices de vegetação e os componentes de rendimentos	31
5	CONCLUSÃO	34
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	35
	REFERÊNCIAS	36

1 INTRODUÇÃO

Originado do México, o milho (*Zea mays*) é cultivado em diversos países do mundo, fazendo parte da dieta humana e também de diversos animais. Segundo o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) (Fiesp, 2022), a produção mundial na safra 2021/2022 chegou a 1,22 bilhão de toneladas, onde a produção brasileira chegou a 116,0 milhões de toneladas. A cultura do milho passou a ser um produto fundamental para os produtores brasileiros, que buscam uma maior produtividade à cada safra, com menores custos de produção.

Para se manter competitivo e obter elevada produtividade, o agricultor precisa realizar um correto manejo da cultura, ficando atento a ataques de pragas, doenças, plantas daninhas, além de uma correta adubação, o que eleva os custos de produção. Especialmente em relação a adubação, o milho é altamente dependente do N, cuja principal molécula utilizada no Brasil, a ureia, apresenta dinâmica no solo altamente dependente das condições ambientais (MORTATE et al., 2018). Dependendo da condição do meio, este fertilizante por volatilizar ou lixiviar, não atingindo o seu objetivo principal.

Neste sentido, a agricultura de precisão trabalha com base nas tecnologias de informação que permitem a análise da variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos do solo, auxiliando na tomada de decisão quanto a práticas de manejo e correções de possíveis deficiências nutricionais (BERNARDI et al., 2015). Desta forma, uma das ferramentas tecnológicas que se destacam é o sensoriamento remoto (SR), amplamente usado em diversas aplicações. Atualmente, o SR tem incorporado novas tecnologias de sensores proximais e não orbitais, com capacidade de gerar dados com alta resolução espacial e com menor influência da atmosfera (OLIVEIRA et al., 2020).

Entre as ferramentas não orbitais, uma das mais recentes é o Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), o qual permite a geração de imagens de alta resolução, a qualquer momento durante o desenvolvimento da cultura e com menor interferência de fatores atmosféricos, o que melhora a precisão dos dados gerados. Esta ferramenta tem se tornado ainda mais viável em função dos avanços tecnológicos em processamento de dados que permitiu, entre outras, a geração de índices de vegetação que, nada mais são, do que indicadores do grau de sanidade vegetal (OLIVEIRA et al., 2020).

Os VANT's, passaram por grande popularização nos últimos 10 anos, são relativamente baratos, possuem tamanho pequeno, podendo ser transportados com certa facilidade para qualquer ambiente e podem ser manuseados com certa facilidade por qualquer operador (OLIVEIRA et al., 2020). Entretanto, o processamento das imagens e a geração de informações a partir dos dados é uma tarefa que necessita maior habilidade e conhecimento do operador.

Para realizar o monitoramento das culturas e definir seu estado de sanidade, são utilizados os Índices de Vegetação (IV) que são obtidos por meio de sensores acoplados aos VANTs. Esses IV são medições radiométricas, determinados por meio de combinações de valores de refletância em dois ou mais comprimento de onda, especialmente na região do infravermelho e visível (SILVA et al., 2020). Na faixa do infravermelho próximo (0,7-1,3 μm) as plantas saudáveis apresentam valores elevados de refletância, porém, no visível (0,4-0,7 μm), é onde ocorre maior absorção da radiação pelas folhas (BERNARDI et al., 2015).

O NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) é um índice que considera as informações na faixa do vermelho e do infravermelho próximo (NIR). Os valores do NDVI variam de -1 e 1 e são linearmente proporcionais aos teores de clorofila da biomassa (RODRIGUES; BARROS, 2019). Os valores de NDVI entre -1 e 0 correspondem a superfícies não vegetais, apresentando maior refletância na faixa do vermelho do que no NIR (infravermelho próximo). Entretanto, as plantas possuem uma refletância substancial no NIR e apresentam o NDVI entre 0.1 e 1, portanto, quanto maior for o valor do NDVI, maior será a capacidade fotossintética da vegetação. Quando a planta passa por algum estresse, as mesmas refletem menores quantidades de luz no NIR, porém, é o suficiente para reconhecer a mesma como um vegetal, possibilitando a diferenciação de plantas saudáveis e não saudáveis (PADOLFI; RAMALDES; SANTOS, 2018).

Com os recentes avanços tecnológicos, outra forma de se realizar o monitoramento agrícola através do IV é a utilização dos índices baseados no espectro do visível, operando na faixa do vermelho, verde e azul (sensores RGB). Um índice que opera no espectro do visível é o Visible Atmospherically Resistant Index (VARI) que, entre as suas vantagens, reduz os efeitos de possíveis interferências dos constituintes atmosféricos ao considerar a subtração da banda espectral referente a faixa do visível azul (Blue) (GITELSON et al., 2002), sendo utilizado para o monitoramento da cultura em todos seu estágio de desenvolvimento através do

espectro visível.

Portanto, a partir da aplicabilidade desses Índices de Vegetação (IV) é possível realizar o monitoramento de extensas áreas, detectando problemas na cultura (pragas, doenças e principalmente deficiências nutricionais) e permitindo uma tomada de decisão adequada que gere redução dos custos de produção e prevenção nas perdas de produtividade.

A partir da contextualização apresentada, tem se as seguintes hipóteses: a) a deficiência nutricional de N na cultura do milho poderá ser diagnosticada por meio de índices de vegetação gerados a partir de imagens de alta resolução captadas por VANTs; b) o diagnóstico nutricional realizado por meio de imagens não orbitais será mais prático, mais acessível e terá precisão semelhantes a métodos tradicionais.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Diagnosticar deficiência nutricional de N na cultura do milho por meio de Índices de Vegetação (NDVI e VARI) gerados a partir de imagens geradas por drones.

1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar o comportamento dos Índices de vegetação calculados a partir das imagens geradas em relação as doses de N e teor de nitrogênio foliar.
- Utilizar de Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) para monitorar o estado nutricional da cultura do milho em diferentes estádios de desenvolvimento;
- Avaliar os componentes de rendimento do milho em resposta a diferentes doses de N.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Importância da cultura do milho e do monitoramento do seu estado nutricional

O milho (*Zea mays*) pertence a família botânica poaceae, subfamília Panicoideae, gênero *Zea*, com origem no México. Essa cultura apresenta importância para diversos setores da cadeia produtiva, sendo o cereal mais produzido e consumido no mundo (ÁVILA et al., 2020).

Esse cereal apresenta grande importância econômica, sendo produzido em diversos países, principalmente no Brasil. Segundo o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) (Fiesp, 2022), a produção mundial na safra 2021/2022 chegou a 1,22 bilhão de toneladas, onde Brasil consolidou-se como o terceiro maior produtor, com uma produção de 116,0 milhões de toneladas, ficando atrás do Estados Unidos (382,9 milhões de toneladas) e China (272,6 milhões de toneladas). O total de milho produzido é utilizado em diversificados setores, como indústria, consumo in natura e alimentação animal (PARAGINSKI et al., 2015).

A utilização de novas tecnologias tem contribuindo para significativos aumentos produtivos no Brasil, mostrando que o setor agrícola vem se especializando (SOUZA et al., 2018). Estas novas tecnologias estão ligadas ao desenvolvimento de cultivares de alto potencial genético e transgênicos, sementes com maior vigor, correções do solo e controle químico de doenças (EMBRAPA, 2017). Atualmente, os híbridos de milho utilizados para plantio apresentam uma grande capacidade de extração de nutrientes do solo e uma alta exigência em fertilizantes (MACEDO et al., 2020), principalmente em nitrogenados (PORTELA et al., 2016).

O monitoramento da cultura durante seu ciclo, bem como a identificação de condições de estresse é a base da agricultura de precisão, pois os custos podem ser reduzidos quando relacionado com amostragens ou manejo para toda a área de cultivo. Dessa forma, a utilização correta dessa prática como ferramenta no controle, análise de dados e até mesmo no planejamento, detecta variações espaciais e temporais de fatores que estão afetando a produção, orientando assim, na tomada de decisão quanto a aplicação de insumos em áreas específicas do local de produção (RESENDE et al., 2020). Assim, através do monitoramento das áreas e estimativa de produção realizadas com a utilização de geotecnologias e sensoriamento remoto é

possível o alcance de métodos eficientes e de baixo custo (LEDA; GONÇALVES; LIMA, 2019).

Para um monitoramento eficiente é necessário o conhecimento da funcionalidade e configurações do equipamento utilizado. Existem variados equipamentos com diferentes formas de manuseio e configuração, onde os dados são obtidos por meio de sensores inseridos em bases orbitais, aéreas e terrestres.

2.2 Importância do Nitrogênio para as plantas

Na planta, o N é constituinte de aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos, clorofila e coenzimas e vitaminas, além de participar diretamente do crescimento, desenvolvimento e produtividade das culturas. A absorção do N pelas plantas ocorre na forma nítrica (NO_3^-) ou amoniacal (NH_4^+).

Os fertilizantes nitrogenados apresentam grande importância para o aumento da produção agrícola, porém existe dificuldade na definição de doses que sejam mais econômicas, principalmente na cultura do milho, quando espera-se altas produtividades (CAIRES; MILLA, 2016). O N apresenta-se como o principal responsável pelo aumento do teor de clorofila nas folhas do milho, sendo possível observar diferenças no teor de clorofila quando comparadas plantas adubadas com N e plantas não adubadas (RAMBO et al., 2010).

Desta forma, uma alternativa é a aplicação de N via foliar em complemento à adubação nitrogenada de cobertura para aumentar a produtividade do milho em função do aumento da taxa de enchimento de grãos e ampliação do período fotossintético efetivo (MAHMOODI et al., 2011). A adubação nitrogenada deve atender a demanda da cultura, principalmente nos momentos mais críticos (SIMÃO et al., 2018).

O N está presente na molécula de clorofila e ligado diretamente com a fotossíntese. A deficiência desse nutriente faz com que a planta não utilize a luz do sol como fonte de energia e, dessa forma, interferindo nas funções essenciais da planta como na absorção de nutriente (REIS et al., 2006). A falta de N na cultura do milho acarreta o amarelecimento das folhas mais velhas, seguida de clorose generalizada, perda foliar e conseqüentemente reduzindo o rendimento de grão (REPKE et al., 2013)

Uma alternativa para detectar deficiência de N é realizar a determinação de teores foliares de N, porém se mostra uma técnica complexa, pois é necessário

realizar várias amostragens e análises para determinar esse elemento, contudo, existe a possibilidade da detecção indireta do N contido nas folhas, sendo por meio da avaliação do teor da clorofila que apresentam-se como um meio eficiente (REIS et al., 2006).

Um meio indireto de identificação do teor de clorofila é a utilização de sensores que medem e avaliam a atividade da vegetação na faixa do visível e no infravermelho próximo por meio dos Índices de Vegetação (IV). A cor verde saudável é apresentada como uma resposta espectral, sendo determinada pelo teor de clorofila que é refletido no espectro do visível (luz verde, azul e vermelha) (PADOLFI et al., 2018). Porém, através do infravermelho próximo é possível verificar com maior eficiência as respostas das plantas quanto a estresse nutricional e indicadores fisiológicos (PADOLFI et al., 2018). Desta forma, através da determinação da clorofila obtida pelos IV, é possível identificar deficiência nutricional de N nas plantas presentes no campo, contribuindo para a realização da adubação necessária.

No Brasil, a fonte nitrogenada mais utilizada é a ureia, por conter maior concentração de N por quilograma do produto (N- 45%) (GALINDO et al., 2018), e apresenta baixo custo quando comparado a outros fertilizantes nitrogenados (SILVA et al., 2017). Porém, quando aplicada em superfície, apresenta maior facilidade de ser perdida por processo de volatilização da amônia (NH_3) que é medida pela atividade da enzima urease (SILVA et al., 2017). A volatilização da ureia é maior em condições de elevada temperatura, ausência de precipitação imediatamente depois da aplicação do fertilizante e pela alta taxa de evaporação da água do solo. Desta forma, as perdas do N aplicado via ureia podem atingir até 80% (MARTHA JUNIOR et al., 2009).

A adubação nitrogenada na cultura do milho é dividida em, pelo menos, duas etapas, onde primeiramente uma parte da dose total de N é aplicado na semeadura, e quando a planta apresentar estágio V_4 até V_8 é realizado a aplicação do restante da dose N, sendo definido como segunda etapa (MORTATE et al., 2018). Porém, quando aplicado ele não é totalmente absorvido pelas plantas, parte dele é perdido, principalmente por processos de volatilização, lixiviação, erosão e desnitrificação (ÁVILA et al., 2020). Desta forma, o manejo da adubação de N deve ser considerada uma das práticas mais importantes a ser realizada, para obter uma produtividade positiva do milho (BERNARDES; ORIOLI JÚNIOR, 2020).

2.3 Agricultura de Precisão

A agricultura nos últimos anos tem passado por diversas modificações, transformando-se em uma atividade que exige cada vez mais o gerenciamento de seus processos produtivos (FILHO; CUNHA, 2016). Desta forma, surge a Agricultura de Precisão (AP) para facilitar as técnicas de cultivo, tornando-se um conceito totalmente novo entre os agricultores. AP é definida como um conjunto de técnicas que juntas permitem realizar um manejo localizado e eficiente nos cultivos, possibilitando a otimização dos insumos agrícolas utilizados na produção, usando técnicas que buscam melhorar o rendimento da cultura (LAMPARELLI, 2016).

Agricultura de Precisão se tornou uma ferramenta da agricultura que garante padronização com eficiência na área de cultivo, assim otimizando a produção e diminuindo variações no plantio (OLIVEIRA et al., 2020). Recentemente, essa tecnologia disponível no mercado está sendo adotada por diversos produtores, maximizando o cultivo e tornando suas áreas mais eficientes e produtivas (OLIVEIRA, et al., 2020). Portanto a AP permite um planejamento mais elaborado e eficiente do manejo de nutrientes, doenças, pragas e plantas daninhas, através da utilização de coordenadas georreferenciadas que delimitam a área de cultivo.

Dentro da AP existem várias ferramentas tecnológicas, dentre elas, encontra-se o Sensoriamento Remoto (SR), sendo muito utilizado em diversas aplicações, pois o mesmo é capaz de gerar dados em alta resolução espacial através de sensores proximais. O SR obtém dados da superfície terrestre pela captação e registro da energia refletida pela própria superfície, o qual ocorre sem contato físico entre o alvo de estudo e os sensores (PEREIRA; SILVA; PAMBOUKIAN, 2016). A energia que é emitida pela radiação solar atinge a superfície terrestre e parte da mesma é refletida pelo alvo a qual é captada e registrada pelos sensores.

A análise da imagem ocorre em função do comportamento espectral que o determinado objeto em estudo apresenta em cada comprimento de onda. Assim os sensores remotos captam e registram na forma de imagens a energia que é emitida ou refletida pelos objetos da superfície terrestre, sendo muito utilizado principalmente na agricultura, pois a radiação que é refletida pelas plantas apresentam informações sobre seu estado fisiológico e assim podendo ser observada com a utilização de diferentes sensores e permitindo um monitoramento eficiente da cultura.

O SR é utilizado para diferentes finalidades, destacando os estudos sobre a

vegetação, por meio dos Índices de Vegetação (IV), que foram desenvolvidos para auxiliar na avaliação e detecção de parâmetros biofísicos das plantas, sendo relacionados com a diferença da refletância entre as bandas do espectro (PEREIRA; SILVA; PAMBOUKIAN, 2016).

Portanto o sensoriamento remoto vem ganhando espaço dentro da agricultura, facilitando o monitoramento e manejo das culturas, onde os sensores utilizados podem ser facilmente acoplados a Veículos Aéreos Não Tripulados.

2.4 Veículos Aéreos Não Tripuláveis (VANT)

A utilização do sensoriamento remoto tem crescido no meio agrícola, principalmente em relação ao monitoramento por meio da utilização de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) ou drones como são popularmente conhecidos. A Agência Nacional de Aviação Civil - ANAC, define VANT como Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA), não tripuladas e utilizadas para fins comerciais, institucionais e experimentais, não sendo utilizada em atividades recreativas (ANAC, 2017). Em estágio avançado de desenvolvimento, a sua aplicação em áreas de agricultura se tornou facilitada, devido ao seu tamanho reduzido, baixo custo e pela eficiência no monitoramento da lavoura (OLIVEIRA et al., 2020).

Segundo Rodrigues (2016), o desenvolvimento do VANT foi possível devido a junção de conceitos de um aereomodelo, uma câmera, um GPS e um sistema inercial. Este sistema consegue realizar a delimitação de uma determinada área, de forma prévia e autônoma, na realização de uma cobertura aerofotogramétrica, onde o usuário define o tamanho representado por um pixel na área de interesse. Por apresentar elevada capacidade de realizar voos estáveis, os VANT's estão se tornando uma ótima solução para aplicação em sensoriamento remoto, pois são equipados com câmeras de alta resolução e software robustos para captura de imagens e facilidade no desenvolvimento das atividades de rotina (PADOLFI; RAMALDES; SANTOS, 2018).

A operação do VANT utiliza uma plataforma aérea de levantamento fotogramétrica, podendo ser operada manualmente, semiautônoma ou totalmente autônoma. Apresenta sistema de GPS (Global Position System) que fornece a posição central de cada fotografia, uma câmera fotográfica digital com infravermelho ou comum e também um IMU (Inertial Measurement Unit), composto por um

acelerômetro, giroscópio, bússola, altímetro, uma pequena CPU e um sistema remoto com link de rádio permitindo o controle humano (SILVA et al., 2014).

Os VANTs ou drones, como são popularmente conhecidos, devido sua forma estrutural podem ser classificados em duas classes, multirotores e asa fixa. Os drones multirotores apresentam um subconjunto de hélices com asas rotativas, contendo um ou vários rotores, são similares a helicópteros, podendo ficar estáticos no ar e operam em baixa velocidade. Sua bateria apresenta uma duração de 24 a 27 minutos, possuindo uma menor autonomia de voo. Os drones de asa fixa, por sua vez, apresentam os mesmos princípios dos aviões tradicionais. Suas asas são estáticas, o que lhe confere maior sustentação e um menor gasto energético em função da aerodinâmica. Trabalham em coberturas de maiores distâncias e podem atingir grandes velocidades: tem maior economia de bateria, permanece maior tempo no ar e tem maior aplicabilidade em mapeamentos de áreas extensas (KNEIPP, 2018).

A utilização do drone segue algumas etapas na agricultura: i) planejamento de voo, ii) voo com sobreposição, iii) obtenção das imagens georreferenciadas, iv) processamento das imagens, v) geração de mosaico, vi) análise em uma ferramenta GIS e, pôr fim, vii) geração do relatório (OLIVEIRA et al., 2020).

De forma mais detalhada, é necessário definir a área a ser mapeada em um software, gerando um plano de voo que orienta o equipamento na área. O posicionamento do drone é realizado em local seguro, atendendo os limites estabelecidos pela ANAC até receber o comando para iniciar a operação. Após o procedimento inicial é acionado os rotores e piloto automático do equipamento para que o mesmo possa sair do solo. Assim o drone consegue realizar toda a operação na área pré-estabelecida no software, capturando todas as imagens necessárias e ao término do trabalho retorna ao ponto de saída, no piloto automático (ASSAIANTE; CAVICHIOLI, 2020)

São dois os principais tipos de câmeras utilizadas nos VANTs: a RGB e a modificada. As câmeras de espectro visível, conhecidas como RGB que significa red (vermelho), green (verde) e blue (azul), funcionam com essas três bandas do espectro de luz que são visível a visão humana. Já, as câmeras modificadas, ao invés de ser RGB, tornam-se NGR (NIR, Green, Red) ou seja, trabalham nas faixas espectrais verde, vermelho e infravermelho próximo (NIR), com um único sistema de lente (BORRA-SERRANO et al., 2015).

2.5 Aplicabilidade dos Índices de Vegetação na agricultura

Os índices de vegetação são gerados a partir de dados obtidos por sensores remotos, que constituem uma importante ferramenta para o monitoramento de alterações naturais ou antrópicas no uso de uma determinada área (LIMA et al., 2013). Os índices de vegetação (IV) são combinações matemáticas de diferentes bandas espectrais, utilizados para identificação de estresse pela cultura, monitorando e quantificando as condições reais da vegetação. Os cálculos dos índices de vegetação são realizados a partir de combinações matemáticas dos valores da refletância, sendo esses associados às características fisiográficas da vegetação (PEZZOPANE et al., 2019).

A combinação aritmética entre duas ou mais bandas, geram um índice de vegetação que irá destacar algum componente de interesse (PADOLFI; RAMALDES; SANTOS, 2018). Os IV utilizam propriedades espectrais das regiões do visível e do infravermelho próximo com o objetivo de analisar a vegetação (BERGER et al., 2019) e através da análise das folhas ou qualquer outro componente fotossinteticamente ativo é possível obter uma resposta da sanidade e desenvolvimento da planta.

Os IV possibilitam estimar, de forma indireta, os teores de clorofila presente nas células da planta, a partir da avaliação dos aspectos fotoquímicos relacionados com a atividade fotossintética da mesma (MICHELON et al., 2019). Através dos dados de IV que são obtidos pela técnica do Sensoriamento Remoto, é possível detectar diferenças de reflectância, que ocorrem devido a algum estresse nutricional sofrido pela planta em função da degradação da clorofila presente em seu tecido (PADOLFI; RAMALDES; SANTOS, 2018).

O NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) é um dos índices mais utilizados (SHIRATSUCHI et al., 2014) por apresentar forte correlação linear com o desenvolvimento da cultura e por ser mais indicado para análises temporais, sendo muito prático para o monitoramento agrícola (RODRIGUES; BARROS, 2019). O índice NDVI é calculado utilizando a reflectância do NIR (infravermelho próximo) e do vermelho, trabalhando então na faixa do infravermelho e do visível.

Esse processo ocorre a partir da radiação emitida pelo sol, onde as plantas fotossinteticamente ativas, absorvem a radiação solar na região do vermelho, ao mesmo tempo que refletem a radiação na região do infravermelho. A quantidade de radiação absorvida na região do vermelho e a quantidade refletida no infravermelho

variam de acordo com o estado fisiológico da folha (saudável, com estresse ou morta). Quando a planta encontra-se com algum tipo de estresse, as mesmas refletem menor quantidade de luz na região do NIR, porém é suficiente para o reconhecimento da mesma, podendo diferenciar uma saudável de uma não saudável (PADOLFI; RAMALDES; SANTOS, 2018).

Os valores atribuídos ao NDVI variam de -1 a 1, apresentando a vantagem de ser linearmente mais proporcional à biomassa (RODRIGUES; BARROS, 2019). Porém, a aquisição de sensores multiespectrais que trabalhem na faixa do infravermelho e do visível ainda representa um alto custo. Em função disso, passou-se a utilizar, para o monitoramento da vegetação, as câmeras RGB de alta resolução que trabalham na faixa do visível e, a partir delas foi possível desenvolver vários IV's (COSTA; NUNES; AMPATZIDIS, 2020).

As câmeras RGB apresentam-se como uma ferramenta de grande importância na agricultura. Os sensores RGB trabalham na região cujo comprimento de onda varia de 0,4 μm a 0,7 μm (faixa do espectro que é visível ao olho humano) e permite a identificação de plantas saudáveis ou não saudáveis. Esses sensores apresentam capacidade de capturar as imagens no espectro do visível, são mais simples de manusear e podem ser transportados a bordo de VANT, com menor custo (SAMPAIO et al., 2020). Um índice gerado a partir da utilização de sensores RGB é o Visible Atmospherically Resistant Index (VARI), que leva em consideração as faixas do visível (vermelho, verde e azul).

O VARI leva em consideração os efeitos da atmosfera, reduzindo os efeitos dos constituintes atmosféricos que possam causar algum tipo de interferência, sendo possível ao considerar a subtração da banda espectral referente a faixa do azul (Blue) (GITELSON et al., 2002). Desta forma, o VARI se torna um índice interessante para estimar a fração da vegetação verde, a partir do espectro do visível, podendo ser utilizado para analisar a cultura em todos seus estádios de desenvolvimento (ANDRADE et al., 2019).

Desta forma, os IV's apresentam grande importância no estudo da vegetação, para a aquisição de informação do estado em que se encontra a planta no campo, detectando problemas de sanidade da mesma e até mesmo seu estado nutricional.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área de estudo

O presente trabalho foi realizado na área experimental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná-UTFPR, situada no município de Pato Branco, região sudoeste do Paraná em um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico típico (Embrapa, 2018) com uma textura muito argilosa (83,50% argila, 1,40% areia, 15,10% silte). As coordenadas da localização são 26°16'36"S e 52°1'20" W, com altitude média de 750 m.

Antes da semeadura, foi realizado uma análise de solo da área experimental na profundidade de 0 a 20 cm (Tabela 1) e, em seguida, realizou-se as devidas correções de acordo com o Manual de Adubação e Calagem para o Estado do Paraná (SBCS, 2017).

Tabela 1- Resultados da análise do solo da área experimental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, na profundidade de 0 a 20 cm, Pato Branco, 2023.

pH	M.O.	P	K	Ca	Mg
CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³
5,10	40,21	19,68	0,45	4,40	2,20

H+Al	Al	Índice	SB	T	V
cmol _c dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³	SMP	cmol _c dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³	(%)
6,69	0	5,60	7,05	13,74	51,31

¹ Metodologia: M.O por digestão úmida; P, K extraídos com solução de Mehlich – I; pH em CaCl₂+ 1:2,5 Ca, Mg e Al trocáveis extraídos com KCl 1 mol L⁻¹.

O clima de Pato Branco é subtropical úmido, apresentando chuvas bem distribuídas durante todo o período do ano, sem estação de seca definida e, de acordo com a classificação de Koppen, identifica-se como um clima do tipo Cfa (SCARIOTTO et al., 2013) com precipitação média anual de 1200 a 1600 mm, onde a temperatura média no inverno apresenta-se inferior a 10°C e no verão acima de 22°C (IAPAR, 2021).

3.2 Instalação e condução do experimento

A semeadura do milho híbrido FERROZ VIP 3 foi realizada no dia 27 de outubro de 2021 com espaçamento de 0,33 m entre sementes e com densidade de 60.000 plantas ha⁻¹. As sementes já haviam sido, previamente, tratadas com fungicida e inseticida. Utilizou-se o delineamento em blocos ao acaso (DBC) em esquema

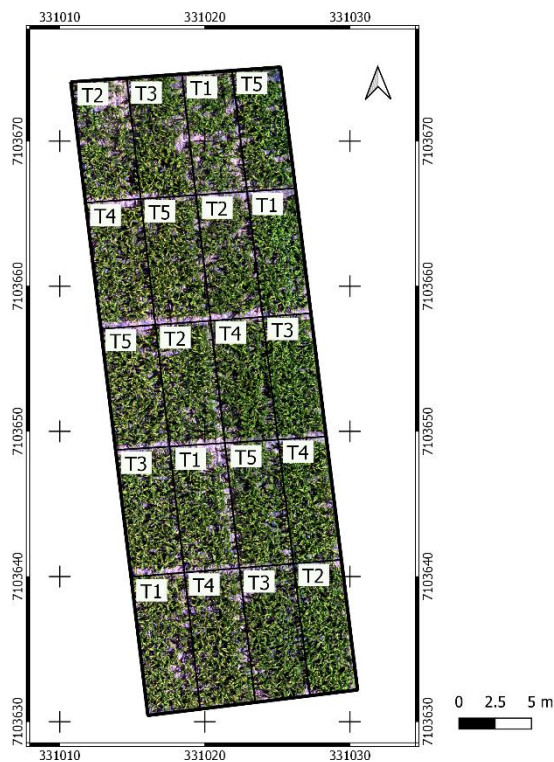
fatorial (5 x 4), totalizando 20 parcelas (Figura 1). Cada parcela apresentava 8 linhas com espaçamento de 0,45 m e 8 m de comprimento, totalizando 28,8 m² por parcela. A área total do experimento apresentava 765,6 m². Foram realizados 5 tratamentos com doses distintas de: i) 50 kg de N ha⁻¹, ii) 100 kg de N ha⁻¹, iii) 150 kg de N ha⁻¹, iv) 200 kg de N ha⁻¹, v) 250 kg de N ha⁻¹. Cada tratamento com 4 repetições cada (Tabela 2).

Tabela 2 – Descrição dos tratamentos utilizados no experimento a campo em DBC com quatro repetições (UTFPR- Pato Branco, 2021/2022).

Tratamento	Adubação de cobertura
T1	50 kg de N ha ⁻¹
T2	100 kg de N ha ⁻¹
T3	150 kg de N ha ⁻¹
T4	200 kg de N ha ⁻¹
T5	250 kg de N ha ⁻¹

Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 1 - Distribuição dos blocos e tratamentos dentro da área experimental localizada na UTFPR de Pato branco, 2021.



Fonte: Autoria própria (2022)

Durante a condução do trabalho, realizou-se os tratos culturais de acordo com a necessidade da cultura, como o controle de pragas, doenças e plantas daninhas, conforme descrito na Tabela 3.

Tabela 3- Tratos culturais realizados na cultura do milho durante a condução do experimento, (UTFPR- Pato Branco, 2021/2022).

Datas	Descrição	Dose recomendada
08/11/2021	Aplicação de Lambda-Cialotrina para controle de <i>Dichelops melacanthus</i> e <i>Dalbulus maidis</i>	300 ml por ha ⁻¹ e 700 ml por ha ⁻¹
16/11/2021	Aplicação de Glifosato para controle de plantas daninhas <i>Conyza spp.</i> , <i>Sida rhombifolia</i> .	4 Litros por ha ⁻¹
22/11/2021	Aplicação Lambda-Cialotrina e Bifentrina+Carbosulfato para controle de <i>Dichelops melacanthus</i> e <i>Dalbulus maidis</i>	300 ml por ha ⁻¹ e 700 ml por ha ⁻¹
22/11/2021	Aplicação de Glifosato para controle de plantas daninhas, <i>Conyza spp.</i> , <i>Sida rhombifolia</i> .	4 Litros por ha ⁻¹
03/12/2021	Aplicação de Lambda-Cialotrina e Bifentrina+Carbosulfato para controle de <i>Dichelops melacanthus</i> e <i>Dalbulus maidis</i>	300 ml por ha ⁻¹ e 700 ml por ha ⁻¹
21/12/2021	Aplicação de Lambda-Cialotrina e Bifentrina+Carbosulfato para controle de <i>Dichelops melacanthus</i> e <i>Dalbulus maidis</i>	300 ml por ha ⁻¹ e 700 ml por ha ⁻¹
12/01/2022	Aplicação de Lambda-Cialotrina e Bifentrina+Carbosulfato para controle de <i>Dichelops melacanthus</i> e <i>Dalbulus maidis</i>	300 ml por ha ⁻¹ e 700 ml por ha ⁻¹
01/02/2022	Aplicação de Lambda-Cialotrina e Bifentrina+Carbosulfato para controle de <i>Dichelops melacanthus</i> e <i>Dalbulus maidis</i>	300 ml por ha ⁻¹ e 700 ml por ha ⁻¹

Fonte: Autoria própria (2022)

As doses de N foram parceladas em três fases, plantio, estágio V₄ (quarta folha) e V₆ (sexta folha). Para cada parcela foi realizado o cálculo proporcional à dosagem utilizada por hectare, e distribuído uniformemente sobre a superfície de toda a área da parcela de forma manual.

Quando a cultura atingiu os estádios V₄ (quarta folha), V₈ (oitava folha) e R₂ (grão leitoso), foram realizados os sobrevoos com VANT para obtenção das imagens, a partir das quais foram gerados os índices de vegetação. Os voos foram realizados

em horários ajustados de acordo com as condições climáticas local, evitando-se dias com chuva, vento forte e muitas nuvens.

A distância de cada sobrevoo foi de 50 m acima do nível do solo. A temperatura variou entre os dias de cada sobrevoo marcando TMED de 23,7°C (1° sobrevoo), 26,6°C (2° sobrevoo) e 24,7° C (3° sobrevoo) (IAPAR, 2021) e não houve presença de precipitação nos dias de avaliação. Havia poucas nuvens e, desta forma, não ocorreu interferência na radiação incidente sobre as plantas e a velocidade do vento estava adequada para a realização dos sobrevoos.

Para realização dos sobrevoos foi utilizado um VANT Phantom 3®, DJI Phantom 3 Standard, com câmera de 2.7K HD. As imagens obtidas foram processadas usando o software QGIS®, seguindo as equações para cada estudo e obtendo os índices NDVI e VARI.

A equação 1 foi utilizada para calcular o Índice por Diferença Normalizada (NDVI) (ROUSE et al., 1974) que considera a radiação refletida pelo alvo na faixa do Infravermelho próximo (NIR) e vermelho (RED). Já a equação 2 é utilizada para calcular o Índice Resistente à Atmosfera na Região Visível (VARI) (GITELSON et al., 2002) que é gerado a partir da reflectância de radiação na faixa do verde (GREEN), vermelho (RED) e azul (BLUE) (MOKARRAM et al., 2016).

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad (1)$$

Em que:

- NDVI –Índice de vegetação por diferença normalizada;
- NIR – Reflectância na banda do infravermelho próximo;
- Red – Reflectância na banda do vermelho.

$$VARI = \frac{(GREEN-RED)}{GREEN+RED-BLUE} \quad (2)$$

Em que:

- VARI – Índice de vegetação com resistência atmosférica ao visível;
- R – Reflectância na banda do vermelho;
- G – Reflectância na banda do verde;
- B – Reflectância na banda do azul.

Os valores dos Índices de vegetação foram obtidos através de uma média,

onde realizou-se a coleta dos valores de 10 pontos dentro da imagem, com o auxílio da ferramenta calculadora raster presente no software QGIS[®] que nos permite coletar vários valores de IV a partir da imagem que foi gerada. Assim após coletar cada valor de IV (NDVI e VARI) de acordo com cada dose de N testado foi realizado uma média que representou cada tratamento para ambos os IV testados.

Após a geração das imagens com o VANT, foram realizadas coletas para análise foliar dos teores de N, em três diferentes estádios fenológicos da cultura, V₄ (quarta folha), V₈ (oitava folha) e R₂ (grão leitoso). As folhas coletadas foram armazenadas em sacos de papel, separadas por tratamento e levadas a estufa de circulação de ar a 40 °C para secagem do material por 30 dias. Após o prazo de secagem, as folhas passaram pelo processo de trituração para a realização das análises de N no laboratório da própria instituição. A análise de determinação N foi realizada pelo método de Kjeldahl (1883).

A colheita foi realizada manualmente, no estádio R₆, momento em que o milho apresentou sua maturação fisiológica e ponto de colheita. Para a coleta dos dados foram coletadas dez espigas aleatórias de cada parcela, utilizando apenas as 4 linhas centrais, descartando-se 2 linhas da mesma em cada extremidade.

As variáveis analisadas foram: i) diâmetro de espigas (DE) (utilizando um paquímetro para medir o centro das espigas); ii) número de fileiras por espiga (NFE); iii) número de grãos por fileira (NGF) e iv) número de grãos por espiga (NGE); v) peso de mil grãos (PMG) (Determinado pela contagem manual de 500 grãos, pesagem e correção da umidade para 13%, onde através da regra de três simples, extrapolou-se este peso para mil grãos); vi) comprimento de espigas; vii) produtividade (PROD) (obtido pela pesagem dos grãos colhidos em cinco plantas dentro de cada parcela, e extrapolado a produtividade em Kg ha⁻¹, após correção da umidade para 13%), assim, como descrito e realizado por Araújo (2016).

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância pelo teste F a 5% de significância. Quando significativa, realizou-se análises de regressão com o auxílio do software GENES (CRUZ, 2006). Como critério para a escolha dos modelos de regressão, selecionaram-se os modelos que apresentaram maior significância dos parâmetros de regressão até 5% de significância pelo teste t. As análises de componentes principais foram realizadas com o auxílio do programa R de domínio público (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2018).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

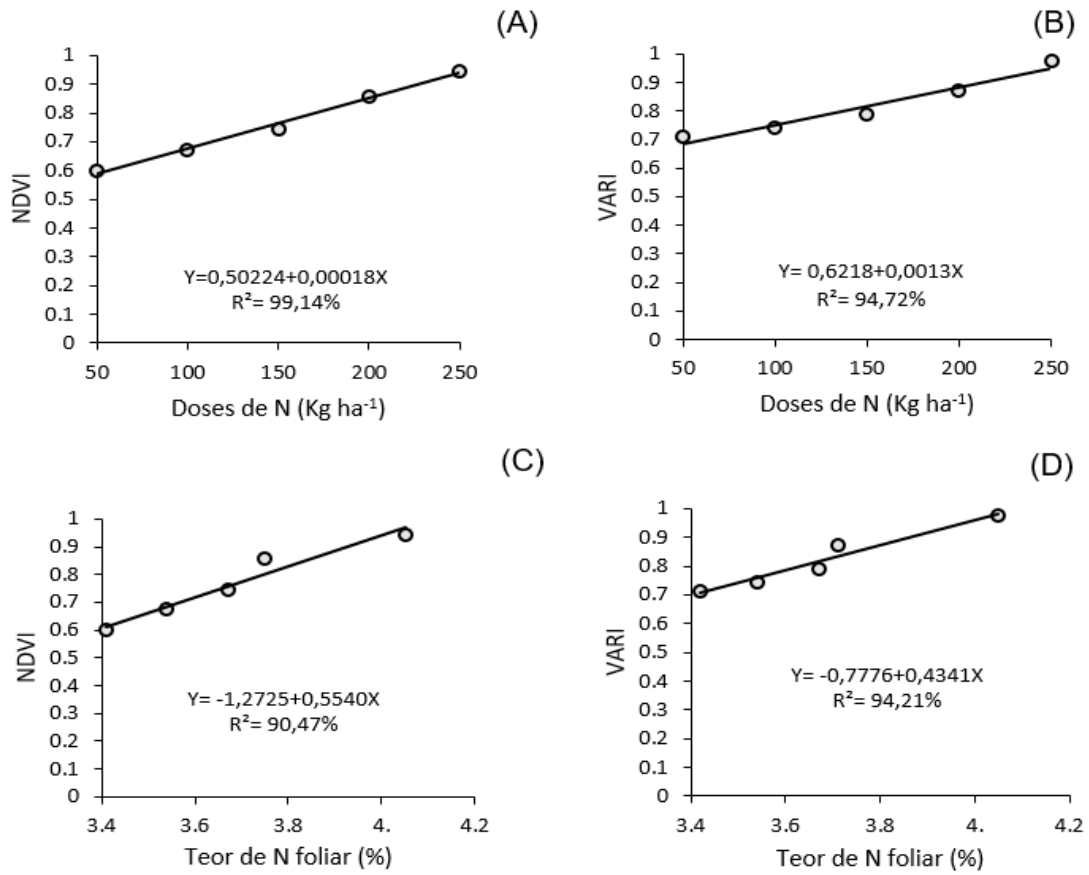
4.1 Relação entre os teores de N e os Índices de vegetação no estágio V4 da cultura do milho.

Ambos os índices de vegetação analisados ajustaram-se a um modelo de regressão linear em relação as doses de N aplicados no estágio V₄ do milho. Tanto o índice de vegetação NDVI quanto o VARI aumentaram de forma linear conforme o aumento das doses de N aplicada no solo, com valores de R² de 99,14% e 94,72%, respectivamente (Figuras 2A e 2B). Estes resultados sugerem que: i) as doses de N aplicadas ao solo se traduziram em maiores teores deste elemento no tecido foliar e ii) ambos os índices respondem de forma semelhante às variações de tonalidade de verde da folha, ocasionado pelas diferentes doses de N.

Considerando que o referido nutriente apresenta relação direta com o aumento da clorofila na folha (SRIDEVY et al., 2018), esta linearidade entre as doses de N e os dois índices de vegetação testados sugerem que, ambos, podem ser utilizados para se avaliar se a dose de N aplicada realmente alcançou o objeto de interesse, no caso, a planta. Os resultados sugerem ainda que, em um caso de perda de N por volatilização ou lixiviação excessiva, este evento poderia ser diagnosticado a partir da análise do NDVI e do VARI.

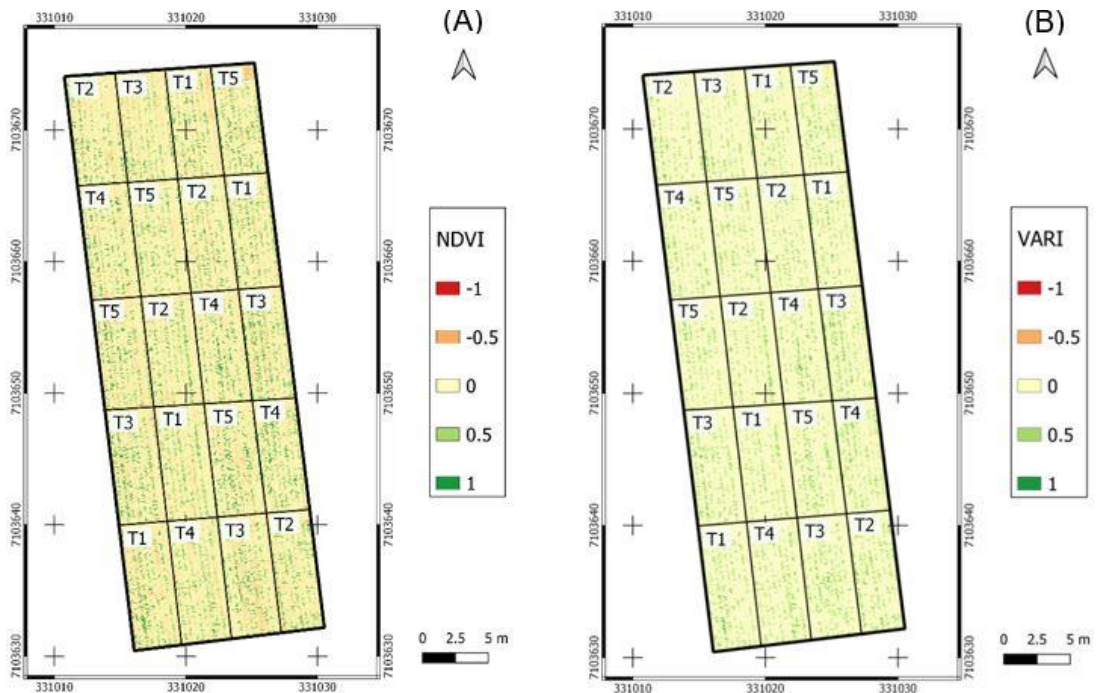
Assim como observado para as doses de N aplicadas no solo, os teores de N foliares também apresentaram linearidade com os índices de vegetação NDVI e VARI. Apesar de aumentarem em proporções distintas, os dois índices aumentaram conforme o aumento no teor de N foliar do milho, ajustando-se a um modelo de regressão linear com valores de R² de 90,47% e 94,21% para o NDVI e para VARI, respectivamente (Figuras 2C e 2D). Os resultados sugerem que os dois índices são capazes de identificar, em certa maneira, o grau de nutrição da cultura em questão quanto ao N. Vale destacar que outros elementos que também causam variações na coloração de folhas novas como S, Zn e Mn podem interferir nos resultados, mas, no presente estudo, não foi possível analisar em função da indisponibilidade de laboratórios.

Figura 2- Relação entre o NDVI e as doses de Nitrogênio (A). Relação entre o VARI e as doses de Nitrogênio (B). Relação entre o Teor de N foliar e o NDVI (C) e, Relação entre o Teor de N foliar e o VARI (D) em estágio fisiológico V₄ (quarta folha) do milho.



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 3- Distribuição espacial de valores de NDVI (A) e Distribuição espacial de valores de VARI (B) obtida no estágio de desenvolvimento V₄.



Fonte: Autoria própria (2022)

E nas imagens geradas (Figura 3A e 3B) é possível observar as plantas de milho no estágio V4, podendo identificar a intensidade de verde presente nas folhas para ambos os índices de vegetação. Onde um dos principais sintomas de estresse causado pela deficiência de N é a coloração amarelada em folhas velhas da planta (SRIDEVY et al., 2018). Entretanto, apesar de o VANT captar, principalmente, imagens da parte superficial da planta (folhas novas) os resultados, ainda sim, são satisfatórios. Plantas bem nutridas com N apresentaram valores para ambos os índices próximos a 1. Porém, quanto mais os valores dos índices de vegetação reduzem e se aproximam do -1 pode ser indicativo de deficiência de nutricional, devido a redução da coloração verde que indica redução do teor de N na folha.

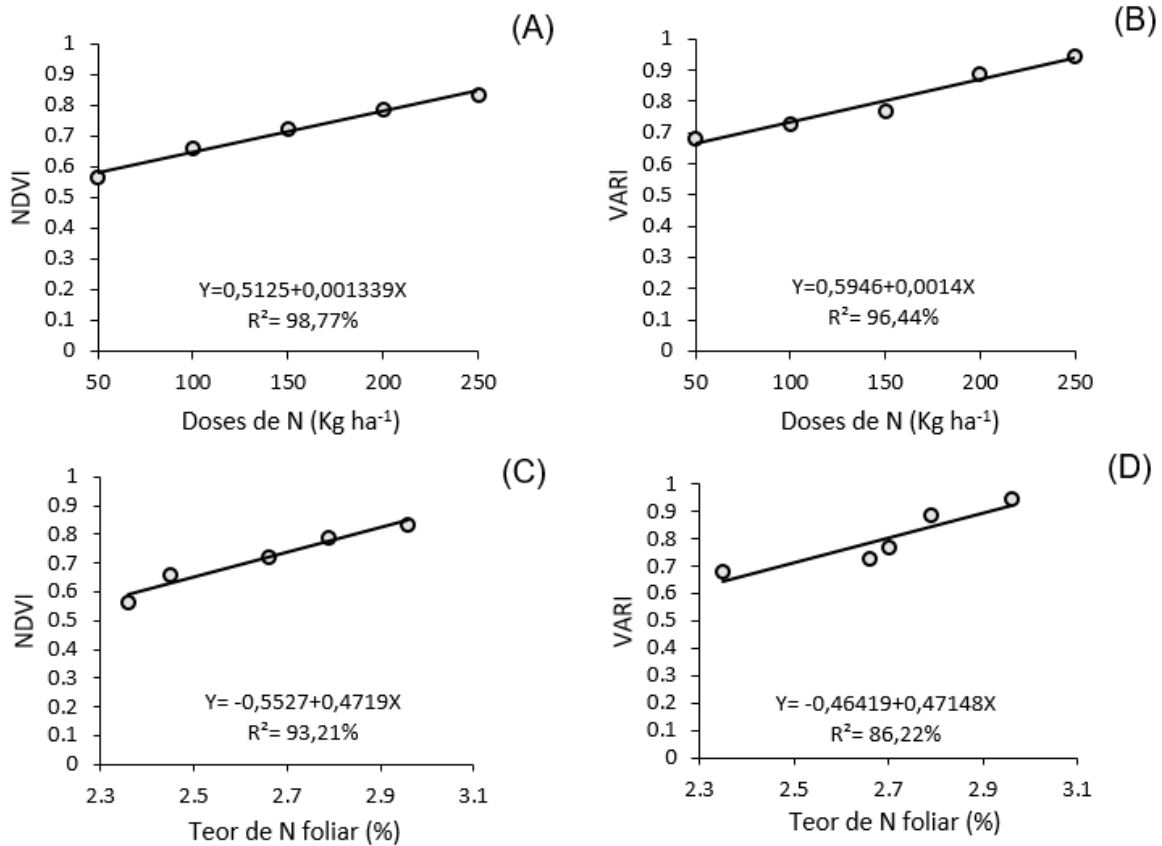
4.2 Relação entre os teores de N e os Índices de vegetação no estágio V8 da cultura do milho

Os índices de vegetação ajustaram-se a um modelo de regressão linear em relação as doses de N aplicados com valores de R^2 98,77% e 96,44% (Figuras 4A e 4B), onde ambos os valores dos índices NDVI e VARI aumentaram conforme aumentou-se a dose de N aplicado. Portanto, mostrando que ambos os índices reproduzem de forma semelhantes as doses de adubação nitrogenada. É importante destacar que, nesta fase de desenvolvimento da cultura, toda dose de N já havia sido aplicado e a planta apresentava pleno desenvolvimento fisiológico com a máxima cobertura do solo.

Especificamente em relação ao estágio de desenvolvimento vegetativo compreendido entre V₄ e V₁₂, a demanda de N é intensa e a sua disponibilidade é de grande importância porque é neste momento que o número potencial de grãos está sendo definido. Outro momento de grande importância é durante a fase reprodutiva ou formação da espiga, quando o potencial produtivo é atingido (EMBRAPA, 2011).

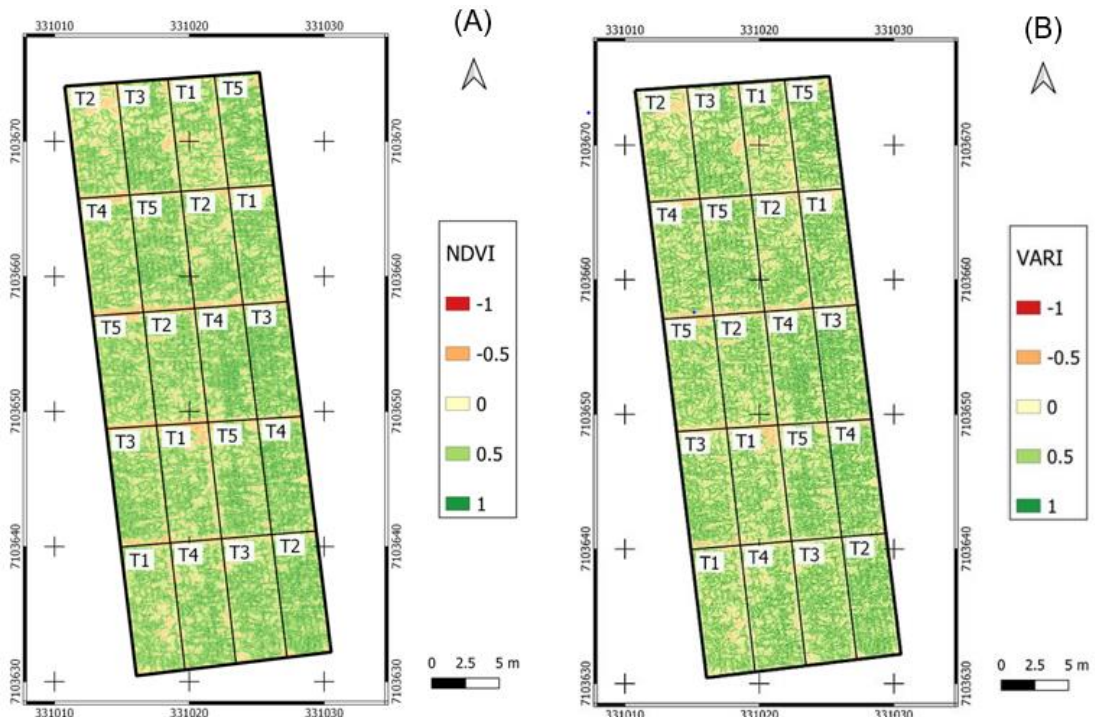
Corroborando os resultados observados para o NDVI, Amado et al. (2017) ao avaliarem a resposta da produtividade do milho e eficiência de aplicação de N no sul paraguaiano, também constataram o acréscimo do valor de NDVI após a aplicação do N do estágio V8 para V12 da planta.

Figura 4 - Relação entre o NDVI e as doses de Nitrogênio (A). Relação entre o VARI e as doses de Nitrogênio (B). Relação entre o Teor de N foliar e o NDVI (C) e Relação entre o Teor de N foliar e o VARI (D) em estágio fisiológico V₈ (oitava folha) do milho.



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 5 - Distribuição espacial de valores de NDVI (A) e Distribuição espacial de valores de VARI (B) obtida no estágio de desenvolvimento V₈.



Fonte: Autoria própria (2022)

Observou-se que ambos os índices de vegetação (NDVI e VARI) ajustaram-se a um modelo de regressão linear em relação aos teores de N foliar aplicados no estágio V₈ do milho. Tanto o índice de vegetação NDVI quanto o VARI aumentaram de forma linear conforme aumento do teor de N foliar com valores de R² de 93,21% e 86,22%, respectivamente (Figura 4C e 4D). Estudos realizados por Andrade Junior et al. (2021), utilizando os índices NDVI e VARI para diagnóstico nutricional do N em milho corroboram os resultados encontrados no presente trabalho.

Os autores supracitados também observaram que os índices NDVI e VARI ajustaram-se a um modelo linear em relação ao teor de N encontrado na folha com valores de R² 93,21% e 86,22% (Figura 4C e 4D). Desta forma com o aumento dos teores de N foliar, aumentou-se também linearmente os valores dos índices de vegetação. Nessa fase, a planta continua absorvendo grande quantidade de N que foi disponibilizado na adubação, portanto, aumentando os valores dos índices de vegetação de acordo com o valor de verde-escuro encontrado na folha devido a maior atividade da clorofila, sendo possível também observar isso através das imagens geradas, onde a intensidade de verde nas folhas que intensificaram nessa fase para ambos os índices (Figura 5A e 5B). Segundo Sousa (2016) os maiores teores de N foliar na cultura do milho são encontrados entre os estágios V6 à V10, apresentando correlações positivas em relação as leituras de clorofila, assim constatando que as plantas aumentam a absorção de N em V6 com acúmulo mais acentuado em V10.

Portanto, os resultados obtidos mostram que ambos os índices aplicados apresentam capacidade de identificar o estado nutricional da cultura em relação ao N, onde as plantas bem nutridas apresentam valores próximos de 1 para ambos os índices e plantas que apresentem valores próximos a -1 podem indicar algum grau de deficiência nutricional, sendo evidenciado pela redução da coloração verde captado nas folhas (SOUSA, 2016).

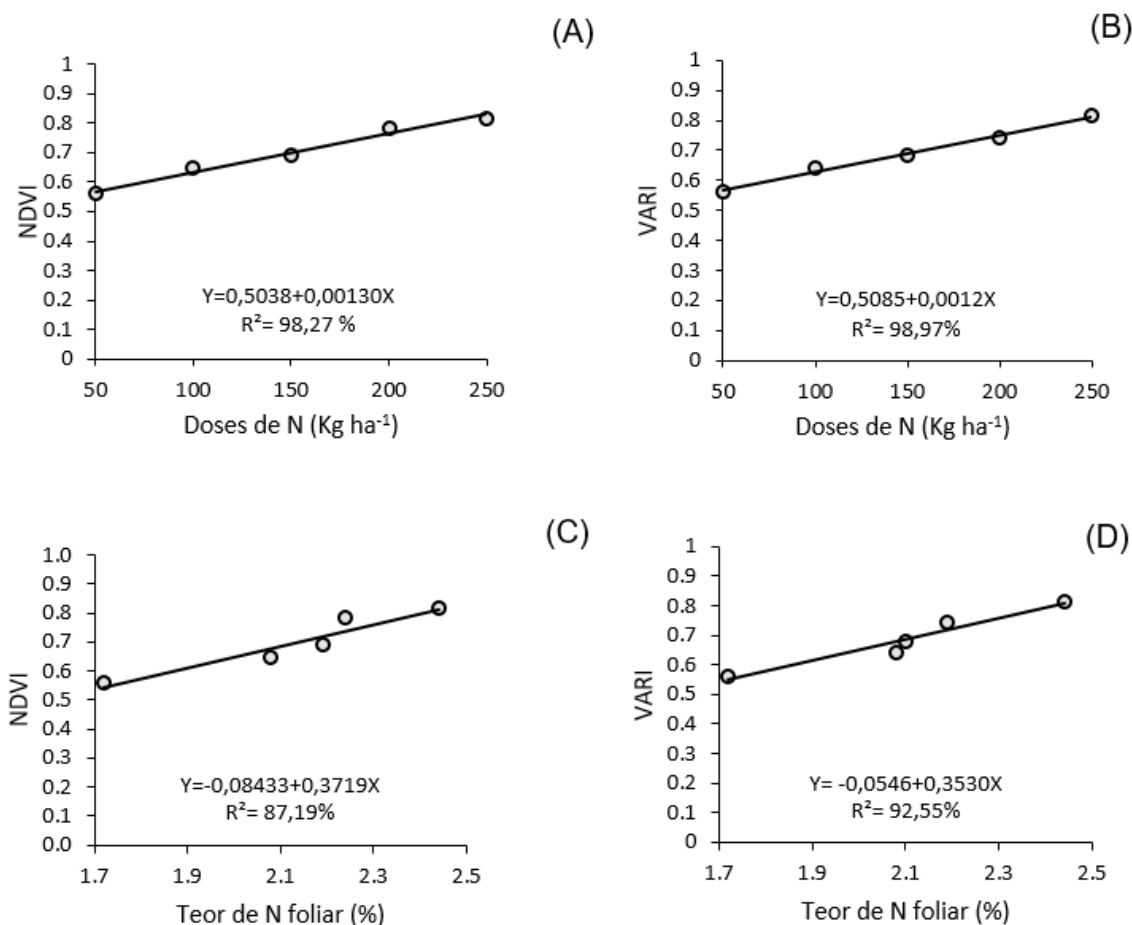
4.3 Relação entre os teores de N e os Índices de vegetação no estágio R2 da cultura do milho

Nesta fase de desenvolvimento da planta, toda a dose de N já havia sido aplicada e a planta se prepara para a produção de grãos. A partir de R1, inicia-se o processo de maturidade fisiológica da planta que é caracterizada pela saída da água das folhas que acarreta a degradação das proteínas e pigmentos fotossintetizantes, o que

tornará a folha menos apta a absorver radiação eletromagnética (PONZONI et al., 2012). Desta forma as folhas acabam reduzindo seu teor de verde e consequentemente sendo detectado pelos índices de vegetação em função da redução dos valores obtidos.

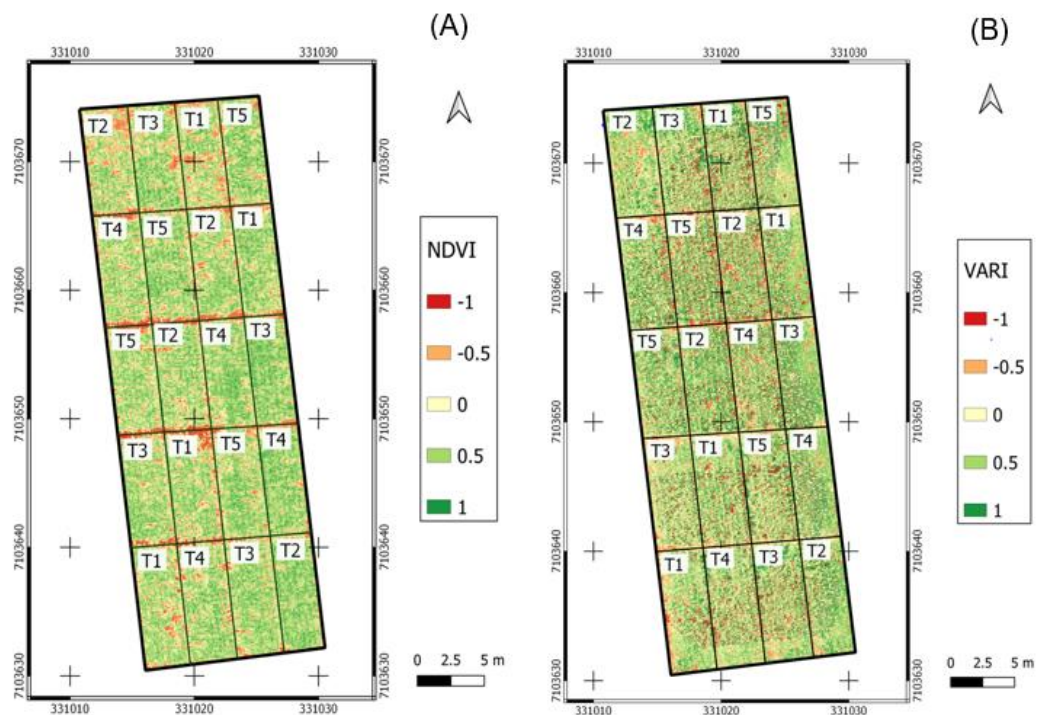
Assim como observado para os outros estádios, tanto o NDVI quanto o VARI ajustaram-se a uma regressão linear em relação as doses de N, com valores de R^2 98,27 e de 98,97% (Figuras 6A e 6B).

Figura 6 - Relação entre NDVI e as doses de Nitrogênio (A). Relação entre o VARI e as doses de Nitrogênio (B). Relação entre o Teor de N foliar e o NDVI (C) e Relação entre o Teor de N foliar e o VARI (D) em estágio fisiológico R₂ (Grão leitoso) do milho.



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 7 - Distribuição espacial de valores de NDVI (A) e Distribuição espacial de valores de VARI (B) obtida no estágio de desenvolvimento R₂.



Fonte: Autoria própria (2022)

Os valores dos índices aumentaram conforme o aumento da dose de N. Portanto, os dois índices testados apresentam respostas semelhantes a adubação nitrogenada na cultura do milho e ambos podem ser utilizados para avaliar a resposta do N na planta, já que o mesmo é responsável pelo aumento do teor de clorofila na folha, intensificando a cor verde de acordo com a quantidade de N disponível e absorvido pela planta. Portanto observando as imagens geradas para ambos os índices (Figura 7A e 7B) é possível notar as plantas no campo e a intensidade do verde das folhas no estágio R₂.

Também, observou-se que ambos os índices se ajustaram a uma regressão linear em relação ao de N foliar, com valores de R² 87,12% de 92,55% (Figura 6C e 6D). Esse comportamento linear mostra que conforme o aumenta o teor de N foliar, também aumentam os valores de ambos os índices de vegetação. Ambos os índices se tornam eficiente para avaliar o estado nutricional da cultura no campo, detectando possíveis casos de deficiência ocasionado pela falta de N.

Porém, observa-se que, em comparação com os demais estádios de desenvolvimento do milho, nesse estágio, os valores dos índices foram menores tanto em relação as doses de N aplicadas ao solo quanto ao teor de N foliar. Isso se deve

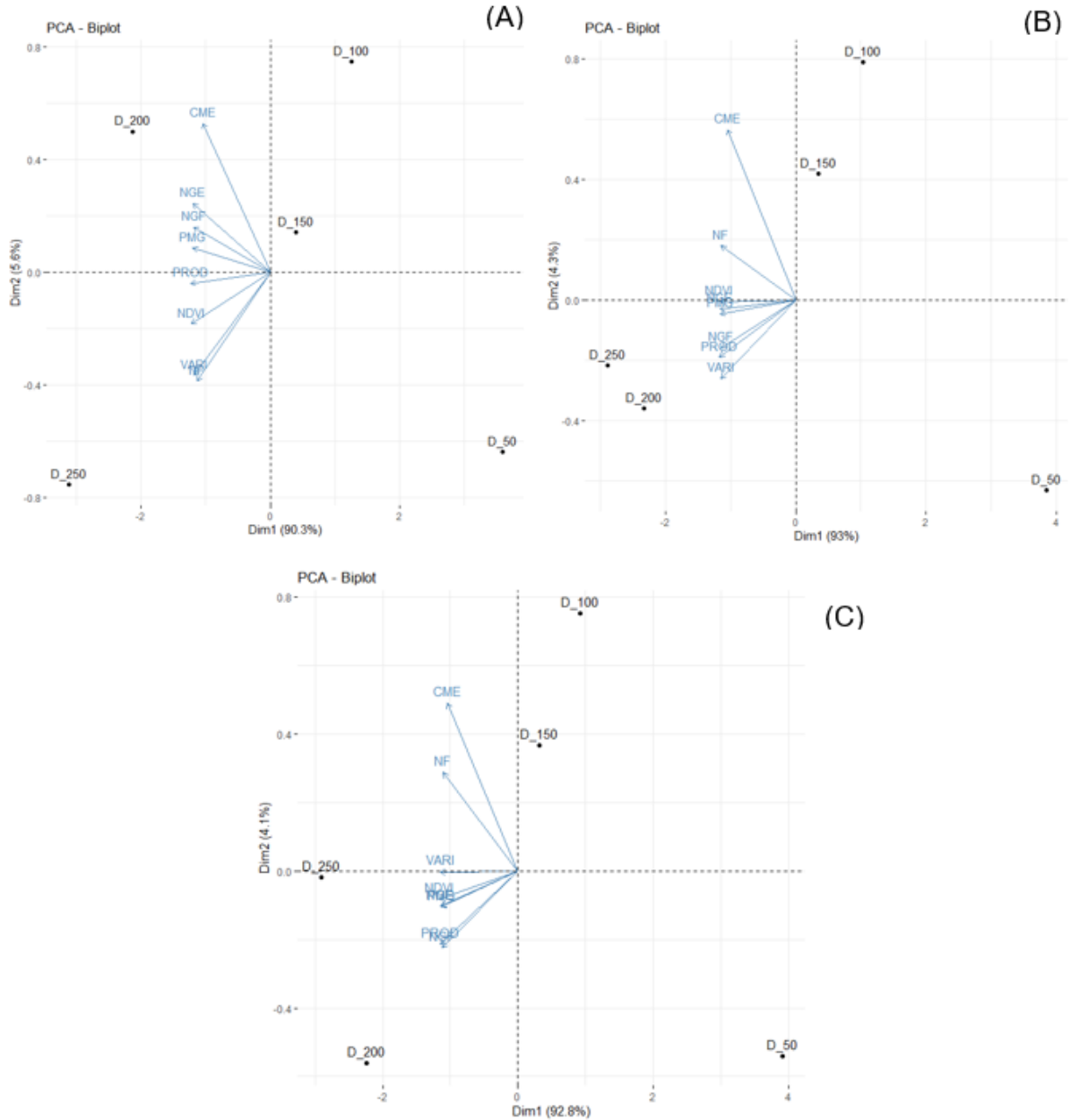
ao fato de que no estágio R₂, a planta continua absorvendo N e realocando esse nutriente das partes vegetativas para a espiga. Portanto, ocorre redução desse nutriente nas folhas e posteriormente interferindo na atividade da clorofila, diminuindo o teor foliar de N e os valores dos índices obtidos através da coloração verde da folha, que acaba perdendo sua tonalidade verde-escuro.

Autores que trabalharam com diversos índices de vegetação (IVs) derivados de imagens digitais Vermelho-Verde-Azul (RGB) como ferramentas de baixo custo para o melhoramento de plantas e manejo da fertilização. Estes foram comparados com o desempenho do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI). Como resultado, os autores obtiveram uma relação linear entre a concentração de N nas folhas de milho e os índices de vegetação, assim conforme ocorreu o aumento do teor foliar de N, observando maiores valores para os índices de vegetação (VERGARA DÍAZ et al., 2016).

4.4 Relação entre os índices de vegetação e os componentes de rendimentos

Pela análise de componentes principais foi observado que apenas duas componentes explicaram 95,9% da variância dos dados em V₄; 97,3% em V₈ e 96,9% em R₂ (Figuras 8A, 8B e 8C). O tratamento com menor dose de N (50 kg ha⁻¹) ficou posicionado no eixo positivo da componente 1 (Dim1) para os 3 estádios de desenvolvimento, comportamento inverso observado para os componentes de rendimento. As maiores doses de N (200 e 250 kg ha⁻¹) se posicionaram na porção negativa da componente 1, mesmo comportamento das variáveis relacionadas aos componentes de rendimento. A dose de N igual a 100 kg ha⁻¹ se alocou na porção positiva da componente 2 (Dim2) e a dose de 150 se posicionou na faixa central do eixo, o que significa que não interferiu significativamente nos resultados dos componentes de rendimentos.

Figura 8 - Gráfico biplot do primeiro e segundo componentes principais do PCA com todas as observações de correlação entre as variáveis avaliadas, número de grãos por fileira (NGF), comprimento de espiga (CME), número de grãos por espiga (NGE), peso de mil grãos (PMG), produtividade (PROD) e teor de nitrogênio foliar (NF) em relação aos índices de vegetação (NDVI e VARI).



Fonte: Autoria própria (2022)

A componente 2 (Dim2), apesar de explicar apenas 5,6% da variância dos dados em V₄, 4,3% em V₈ e 4,1% em R₂, também teve importância na explicação do comportamento de algumas variáveis. O VARI, por exemplo, foi a variável que mais se afastou do centro no sentido negativo do eixo da Dim2 no estágio V₄ e V₈. Este padrão se modifica no estágio R₂, onde as variáveis que posicionaram na porção mais

extrema foram a PROD e NGF (Figura 8C). Já, no sentido positivo do eixo, a variável que mais se afastou foi a CME em todos os estágios de desenvolvimento V₄, V₈ e R₂. Este afastamento de uma variável em relação às demais evidencia a baixa correção entre elas e nos permite inferir, por exemplo, que elevados teores de NF em V₄ não promovem, necessariamente, elevado CME. De maneira semelhante, elevados valores do VARI no mesmo estágio de desenvolvimento, não promovem, necessariamente, a formação de espigas maiores com elevado CME (Figura 8A).

Para os índices de vegetação analisados no estágio V₄, com exceção das variáveis NF, as maiores correlações entre os índices e os componentes de rendimentos aferidos na colheita foram observadas pelo NDVI (Tabela 4).

Tabela 4- Matriz de correlação entre as variáveis número de grãos por fileira (NGF), comprimento de espiga (CME), número de grãos por espiga (NGE), peso de mil grãos (PMG), produtividade (PROD) e teor de nitrogênio foliar (NF), nos estágios V₄, V₈ e R₂.

Variáveis	----- Estágio V ₄ -----		----- Estágio V ₈ -----		----- Estágio R ₂ -----	
	NDVI	VARI	NDVI	VARI	NDVI	VARI
NGF	0.72	0.69	0.76	0.76	0.77	0.73
CME	0.53	0.46	0.66	0.57	0.65	0.60
NGE	0.72	0.68	0.77	0.74	0.77	0.77
PMG	0.78	0.72	0.81	0.82	0.80	0.75
PROD	0.71	0.69	0.77	0.76	0.76	0.76
NF	0.63	0.66	0.76	0.70	0.81	0.81

Fonte: Autoria própria (2022)

No estágio V₈, com exceção das variáveis NGF, que apresentou igual correlação entre os índices, e PMG que foi superior pela leitura do VARI, em todas as outras, a correlação entre o índice de vegetação e os componentes de rendimentos foram maiores para o NDVI.

No estágio R₂, por sua vez, as variáveis NGE, PROD e NF apresentaram a mesma correção com os índices de vegetação avaliados. Para as demais variáveis: NGF, CME e PMG os maiores valores foram observados para o índice NDVI.

5 CONCLUSÃO

Em relação ao N, os Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e o Índice Resistente à Atmosfera na Região Visível (VARI) foram eficazes para detectar o estado nutricional da cultura durante todas as fases em que realizou-se as avaliações, V₄, V₈ e R₂. Sendo uma tecnologia promissora para otimizar processos e aumentar a precisão de avaliação e monitoramento nutricional da cultura no campo.

Os índices de vegetação (NDVI e VARI) apresentaram correlação positiva com os principais componentes de rendimentos analisados: NGF, CME, NGE, PMG, PROD e NF.

O índice NDVI apresentou-se mais eficiente que o VARI para predição dos componentes de rendimentos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A deficiência de N é detectada na planta pela clorose generalizada predominantemente em folhas velhas e já a deficiência de S é detectada pela clorose generalizada em folhas jovens, portanto não é possível distinguir deficiência de N da deficiência de S. Pois pelo trabalho realizado, ainda não é possível realizar essa distinção, pois assim como o N o S também é um macronutriente, essa deficiência deve ser monitorada no solo, pois na folha da planta através dos Índices de Vegetação não será possível distinguir, tornando-se então uma limitação do método. Porém considerando que o N é o nutriente mais demandado pela cultura, onde seus sintomas de deficiência são mais comuns, a partir desse método realizado no trabalho é possível realizar uma estimativa.

Os Índices de Vegetação NDVI e VARI foram eficazes para detectar o estado nutricional da cultura no campo em relação ao N, portanto a partir do método utilizado no trabalho foi possível analisar as diferenças nos valores dos Índices de vegetação para cada dose de N testado (50, 100, 150, 200 e 250 kg de N ha⁻¹) nas três fazes de avaliação (V4, V8 e R2).

Ao se ter certeza da ocorrência da deficiência de N nas plantas, é possível através das imagens gerar os Índices de Vegetação e identificar todos os pontos dentro da área em que estão ocorrendo essa deficiência, facilitando assim o monitoramento nutricional da cultura.

REFERÊNCIAS

AMADO, T. J. C., VILLALBA, E. O. H., BORTOLOTTI, R. P., NORA, D. D., BRAGAGNOLO, J., & LEÓN, E. A. B. Yield and nutritional efficiency of corn in response to rates and splits of nitrogen fertilization. **Revista Ceres**, v. 64, n. 4, p. 351-359, 2017.

ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). Regulamento Brasileiro da Aviação Civil Especial – RBAC-E nº 94. Requisitos Gerais para Aeronaves Não Tripuladas de Uso Civil, Resolução nº 419, 2 de maio de 2017. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-e-94/@@display-file/arquivo_norma/RBACE94EMD00.pdf>. Acesso em: 07 de abril de 2021.

ANDRADE JUNIOR, S. A., CARDOSO, J. M., MELO, F. B., BASTOS, E. A. Avaliação do estado nutricional do milho por índices de vegetação via imagens aéreas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.51, n.8, 2021.

ANDRADE, R. G. et al. Uso de veículo aéreo não tripulado (VANT) como plataforma para monitoramento da produção agropecuária: estudo de caso para o milho forrageiro. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2019. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/195875/1/DOC-233-Usode-VANT-como-plataforma-p-monitoram-da-prod-agropecuaria.pdf>>. Acesso em: 24 de mar. de 2021.

ARAÚJO, L. S. et al. Desempenho agrônômico de híbridos de milho na região sudeste de Goiás. **Revista Agro@ambiente On-line**, Boa Vista, v. 10, n. 4, p. 334-341, 2016.

ASSAIANTE, B. A. S.; CAVICHIOLI, F. A. A utilização de Veículos Aéreos não Tripulados (VANT) na cultura da cana-de-açúcar. **Interface Tecnológica**, Taquaritinga, v. 17, n. 1, p. 444-445, 2020.

ÁVILA, J. S.; FERREIRA, J. S.; SANTOS, J. S.; ROCHA, P. A.; BALDANI, V. L. D. Green manure, seed inoculation with *Herbaspirillum seropedicae* and nitrogen fertilization on maize yield. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 24, n. 9, p. 590-595, 2020.

BAIO, F. H. R., PANTELEÃO, A. A., CAMPOS, C. N. S., TEODORO, L. P. R. Relationship between vegetation indices and agronomic performance of maize varieties under different nitrogen rates. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 36, n. 5, p. 1638-1644, 2020

BERGE, R.; SILVA, J. A. A.; FERREIRA, R. L. C.; CANDEIAS, L. B.; RUBILAR, R. Índices de vegetação para a estimativa do índice de área foliar em plantios clonais de *Eucalyptus saligna* Smith. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 29, n. 2, p. 885-899, 2019.

BERNARDES, J. V. S.; ORIOLI JÚNIOR, V. Estratégias de aplicação e doses de nitrogênio para o milho cultivado em solo argiloso. **Revista Ciências Agrárias - Amazon Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, Belém, v. 63, n. 8, p. 1-8, 2020.

BERNARDI, A. C. C.; BETTIOL, G. M.; GREGO, C. R.; ANDRADE, R. A.; RABELLO, L. M.; INAMASU, R. Y. Ferramentas de agricultura de precisão como auxílio ao manejo da fertilidade do solo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, v. 32, n. 1/2, p. 205-221, 2015.

BESEN, M. R. Produtividade de milho e retorno econômico em sistema integrado de produção com doses de nitrogênio. **Revista Ciência Agroveterinárias**, Lages, v. 19, n. 1, p. 94-103, 2020.

BHERING, S. B. et al. Mapa de Solos do Estado do Paraná Legenda atualizada. Embrapa Solos-Documents, 2009. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/56704/1/SP5507.pdf>>. Acesso em: 19 mar. 2021.

BORRA-SERRANO, I.; PEÑA, J.M.; TORRES-SÁNCHEZ, J.; MESAS-CARRASCOSA, F.J.; LÓPEZ-GRANADOS, F. Spatial quality evaluation of resampled Unmanned Aerial Vehicle-Imagery for weed mapping. **Sensors**, Basel, v.15, n. 8, p.19688-19708, 2015.

CAIRES, E. F.; MILLA, R. Adubação nitrogenada em cobertura para o cultivo de milho com alto potencial produtivo em sistema de plantio direto de longa duração. **Bragantia**, Campinas, v. 75, n. 1, p.87-95, 2016.

CHAPLIN, C. Vida e Pensamentos. Editora Martin Claret. 1997. p. 118.

COSTA, L.; NUNES, L.; AMPATZIDIS, Y. A new visible band index (vNDVI) for estimating NDVI values on RGB images utilizing genetic algorithms. **Computers and Electronics in Agriculture**, Gainesville, v. 172, n. 11, p. 105334-105349, 2020.

CRUZ, C. D. Programa Genes: Análise multivariada e simulação. Editora UFV. Viçosa (MG). p. 175, 2006.

DHITAL, S.; RAUN, W. R. Variability in optimum nitrogen rates for maize. **Agronomy Journal**, Fitchburg, v. 108, n. 6, p.2165-2173, 2016.

EMBRAPA MILHO E SORGO. **Milho - O produtor pergunta, a Embrapa responde**. In: CRUZ, J.C. et al (Ed.), editores técnicos. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2011. 338 p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistemas de Produção Embrapa, 2017. Disponível em: <https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p_p_id=conteudoportlet_WAR_sistem>

asdeproducaolf6_1ga1ceportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-2&p_p_col_count=1&p_r_p_-76293187_sistemaProducaold=7905&p_r_p_-996514994_topicold=8> Acesso em: 11 mar. 2021.

FIESP. Federação das Indústrias do Estado de São Paulo. Safra Mundial de Milho 2021/22 – 9º Levantamento do USDA. Informativo, jan. 2022. Disponível em: <<https://www.fiesp.com.br/indices-pesquisas-e-publicacoes/safra-mundial-de-milho-2/>>. Acesso em: 16 mar. 2023.

FILHO, R. S.; CUNHA, J. P. A. R. Agricultura de Precisão: Particularidades de sua adoção no sudoeste de Goiás – Brasil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 35, n. 4, p. 689-698, 2015.

GALINDO, F. S. et al. Manejo da adubação nitrogenada no capim-mombaça em função de fontes e doses de nitrogênio. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 41, n. 4, p. 900-913, 2018.

GITELSON, A. A.; STARK, R.; GRITS, U.; RUNDQUIST, D.; KAUFMAN, Y.; DERRY, D. Vegetation and soil lines in visible spectral space: a concept and technique for remote estimation of vegetation fraction. **International Journal of Remote Sensing**, Abingdon, v. 23, n. 13, p. 2537-2562, 2002.

GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; STARK, R. et al. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. **Remote Sensing of Environment**, Oxford, v.80, p.76-87, 2002.

HALL, A. Remote Sensing Applications for Viticultural Terroir Analysis. Institute for Land, Water and Society, Charles Sturt University, Albury, Australia, v. 14, n. 3, p. 185-190, 2018.

HUANG, S.; TANG, L.; HUPY J. P.; WANG, Y.; SHAO, G. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. **Journal of Forest Research**, Chiyoda, v. 32, n. 1, p. 1–6, 2021.

IAPAR - Instituto Agrônomo do Paraná. Cartas climáticas do Paraná, precipitação – Média anual. Londrina, 2022. Disponível em: <<https://www.idrparana.pr.gov.br/Pagina/Boletim-Agrometeorologico>>. Acesso em: 29 de dezembro de 2021.

KJELDAHL, J. Neue methode zur bestimmung des stick-stoffs in organischen korpfern. **Zeitschrift für Analytische Chemie**, Regensburg, v. 22, n.1, p.366-382, 1883.

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

LAMPARELLI, R. A. C. Agricultura de precisão. Brasília: Agência Embrapa de Informação Tecnológica, 2016. <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_72_711200516719.html>. Acesso em: 22 de jul. 2021

LEDA, V. C.; GONÇALVES, A. K.; LIMA, N. S. Sensoriamento remoto aplicado a modelagem de produtividade da cultura da cana-de-açúcar. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 34, n. 2, p. 263-270, 2019.

LIMA, G. C.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; SILVA, M. A.; OLIVEIRA, A. H.; AVANZI, J. C.; UMMUS, M. E. Avaliação da cobertura vegetal pelo índice de vegetação por diferença normalizada (IVDN). **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 8, n. 2, p. 204-214, 2013.

MACEDO, L. A. et al. Crescimento inicial de milho submetido a diferentes manejos de adubação. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 2, p. 5880-5893, 2020.

MAHMOODI, P.; YARNIA, M.; AMIRNIA, R.; BENAM, M. B. K. Effect of nitrogen foliar application on grain filling rate and period in 3 cultivars of corn (*Zea mays* L.). **African Journal of Agricultural Research**, Nairóbi, v. 6, n. 29, p. 6226-6231, 2011.

MARTHA JUNIOR, G. B.; CORSI, M.; TRIVELIN, P. C. O.; VILELA, L. Recuperação de 15N-ureia no sistema solo-planta de pastagem de capim-tanzânia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 1, p. 95-101, 2009.

MICHELON, D.; ZAMBERLAN, J. F.; OLIVEIRA NETO, D.; SAMPAIO, M. R. Uso do sensoriamento remoto com VANTS: Possibilidade de aquisição de dados para agricultura. **Ciência e Tecnologia**, Cruz Alta, v. 3, n. 1, p. 23-35, 2019.

MOKARRAM, M., BOLOORANI, A. D., HOJATI, M. Relationship between Land Cover and Vegetation Indices. Case Study: Eghlid Plain, Fars Province, Iran. **European Journal of Geography**, v. 7, n. 2, p. 48–60, 2016.

MORTATE, R. K.; NASCIMENTO, E. F.; GONÇALVES, E. G. S.; LIMA, M. W. P. Resposta do milho (*Zea mays* L.) à adubação foliar e via solo de nitrogênio. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia, v. 5, n. 1, p. 1-6, 2018.

OLIVEIRA, A. J. et al. Potencialidades da utilização de drones na agricultura de precisão. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 9, p. 64140-64149, 2020.

PADOLFI, A. S.; RAMALDES, G. P.; SANTOS, O. L. Análise de índice de vegetação através de imagens obtidas por VANT. **Revista Científica da FAESA**, Vitória, v. 14, n. 1, p. 145-165, 2018.

PARAGINSKI, R. T.; ROCKENBACH, B. A.; SANTOS, R. F.; ELIAS, M. C.; OLIVEIRA, M. Qualidade de grãos de milho armazenados em diferentes temperaturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 4, p. 358–363, 2015.

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

PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; BOSI, C.; CRIPPA, P. H.; SANTOS, P. M.; NARDACHIONE, E. C. Assessment of Piatã palisadegrass forage mass in integrated livestock production systems using a proximal canopy reflectance sensor. *European Journal of Agronomy*, Conthey, v. 103, n. 3, p. 130-139, 2019.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2. ed. Cubatão: Oficina de Textos, 2012. 160 p.

PORTELA, M. G. T.; ARAÚJO, R. L.; BARBOSA, R. P.; ROCHA, D. R. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, Tupã, v. 10, n. 3, p. 248-258, 2016.

R Development Core Team (2018). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.

RAMBO, L. M. XIONG, Y. REGIS FERREIRA DA SILVIA, P. Leaf and canopy optical characteristics as crop N status indicators for field nitrogen management in corn. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, Paris, v. 173, n. 3, p. 434-443, 2010.

REIS, R. A.; FURLANI JUNIOR, E.; BUZETTI, S. ANDREOTTI, M. Diagnóstico da Exigência do Cafeeiro em Nitrogênio pela Utilização do Medidor Portátil de Clorofila. *Bragantia*, Campinas, v. 65, n. 1, p. 163-171, 2006.

REPKE, R. A.; CRUZ, S. J. S.; SILVA, C. J.; FIGUEIREDO, P. G., BICUDO, S. J. Eficiência da *Azospirillum brasilense* combinada com doses de nitrogênio no desenvolvimento de plantas de milho. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, Sete Lagoas, v. 12, n. 3, p. 214-226, 2013.

RESENDE, D. B.; ABREU JÚNIOR, C. A. M.; MARTINS, G. D.; MARQUES, O. J.; XAVIER, L. C. M. Uso de imagens tomadas por aeronaves remotamente pilotadas para detecção da cultura do milho infestada por *Spodoptera frugiperda*. *Revista Brasileira de Geografia Física*, Recife, v. 13, n. 1, p. 156-166, 2020.

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

RODRIGUES, S. S.; BARROS, M. M. O Uso do VANT e do Sensoriamento Remoto como ferramenta de melhoria das Técnicas de Agricultura de Precisão. *Revista Digital Simonsen*, Rio de Janeiro, v. 8, n. 10, p. 61-77, 2019.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. W.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W.; HARLAN, J. C. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Greenwave effect) of natural vegetation. NASA/GSFCT Type III Final Report, Greenbelt, MD, USA. 1974.

SAMPAIO, H. S.; BOURSCHEIDT, V.; SARRACINI, L. H.; JORGE, L. A. C.; BETTIOL, G. M.; BERNARDI, A. C. C. Comparação entre Índices de Vegetação obtidos por imagens aéreas com Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) e satélite. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, Tupã, v. 14, n. 2, p. 111-124, 2020.

SCARIOTTO, B.; SACHET, M. R.; PENSO, G. A. Adaptability and stability of 34 peach genotypes for leafing under Brazilian subtropical conditions. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 155, n. 1, p. 111-117, 2013.

SHIRATSUCHI, L. S.; BRANDÃO, Z. N.; VICENTE, L. E.; VICTORIA, D. de C.; DUCATI, J. R.; OLIVEIRA, R. P. de; VILELA, M. de F. Sensoriamento remoto: conceitos básicos e aplicações na agricultura de precisão. **Separata de: Agricultura de Precisão: Resultados de um Novo Olhar**, Brasília, DF. Embrapa Cerrados, p. 58-73, 2014.

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

SILVA, D. F. et al. Volatilização de amônia do solo após doses de ureia com inibidores de urease e de nitrificação na cultura do abacaxi. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 64, n.3, p.327-335, 2017.

SILVA, V. S.; SALAMI, G.; SILVA, M. I. O.; SILVA, E. A.; MONTEIRO JUNIOR, J. J.; ALBA, E. Methodological evaluation of vegetation indexes in land use and land cover (LULC) classification. **Geology, Ecology, and Landscapes**, Reino Unido, v. 4, n. 2, p. 159-169, 2020.

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS). Núcleo Estadual do Paraná (NEPAR). **Manual de adubação e calagem para o Estado do Paraná**. Curitiba: SBCS/NEPAR, 2017. 482 . p.

Soil Survey Staff. Keys to soil taxonomy. 12.ed. Washington: U.S. Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service, p. 372, 2014.

SOUSA, R. et al. Leituras de clorofila e teores de n em fases fenológicas do milho. *Colloquium Agrariae*, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 57-63, 2016.

SOUZA, A. E.; REIS, J. G. M.; RAYMUNDO, J. C.; PINTO, R. S. Estudo da produção do milho no Brasil: Regiões produtoras, exportação e perspectivas. **South American Development Society Journal**, São Paulo, v. 4, n. 11, p. 182-194, 2018.

SRIDEVY, S. et al. Identificação de deficiência de nitrogênio e potássio em milho por mineração de imagens, resposta espectral e de cor verdadeira. **Jornal Indiano de Fisiologia Vegetal**, v. 23, p. 91-99, 2018.

VERGARA-DÍAZ, O. et al. Uma nova abordagem de sensoriamento remoto para previsão da produtividade de milho sob diferentes condições de nitrogênio fertilização. **Fronteiras na ciência das plantas**, v. 7, p. 666-000, 2016.