

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Diagnóstico do nitrogênio foliar do milho (*Zea mays L.*) a partir de dados
hiperespectrais**

Ana Karla da Silva Oliveira

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra
em Ciências. Área de concentração: Engenharia de
Sistemas Agrícolas

**Piracicaba
2023**

Ana Karla da Silva Oliveira
Engenheira Agrícola

Diagnóstico do nitrogênio foliar do milho (*Zea mays L.*) a partir de dados hiperespectrais
versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **PETERSON RICARDO FIORIO**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra
em Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas
Agrícolas

Piracicaba
2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP
Modelo de ficha revisada

Oliveira, Ana Karla da Silva

Diagnóstico do nitrogênio foliar do milho (*Zea mays L.*) a partir de dados hiperspectrais / Ana Karla da Silva Oliveira. - - versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2023.

61 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Sensores 2. Adubação nitrogenada 3. Reflectância 4. Deficiência nutricional I. Título

DEDICATÓRIA

À minha mãe Raimunda Nonata da Silva Oliveira, símbolo de
amor e inspiração.
Meu pai Luiz Gonzaga da Silva Oliveira, símbolo de proteção e
confiança.
Meus irmãos, Ana Paula da Silva Oliveira e Luiz Henrique da
Silva Oliveira, símbolo de apoio.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela proteção, por me manter forte nesta caminhada e por tudo que faz por mim.

À minha família, em especial a minha mãe Raimunda Nonata da Silva Oliveira, meu pai Luiz Gonzaga de Souza Oliveira, aos meus irmãos Ana Paula da Silva Oliveira e Luiz Henrique da Silva Oliveira. Obrigada família pela confiança, força, incentivos, amor, carinho, ensinamentos, etc.

A meu orientador professor Dr. Peterson Ricardo Fiorio pelos ensinamentos, paciência e amizade. Obrigada, professor!

Aos componentes do grupo de pesquisa TopoGeo: Carlos Augusto Alves Cardoso Silva, Natália Correr Ré, Matheus Sterzo Nilsson, Matheus Luís Caron, Pedro Maroun Roel, Hugo Fukuzava pela grande amizade, força e companheirismo durante todo o período do mestrado. Obrigada pela ajuda e pôr em muitos momentos assumirem as responsabilidades em minha ausência.

Ao meu amigo/irmão Eduardo Arouche da Silva por sempre está me acompanhando nessa caminhada, pelas palavras de apoio e pela ajuda.

Aos meus melhores amigos, Luís Felipe Correia, João Paulo Santos e Pedro Henrique Cardoso pelos fortes laços de família que construímos, pelo incentivo, pela grande amizade, força e companheirismo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

À Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP) pela oportunidade de realizar o curso, e a todos os professores pelos conhecimentos repassados.

SUMÁRIO

RESUMO	6
ABSTRACT	7
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	10
1. INTRODUÇÃO.....	11
2. REVISÃO DE LITERATURA	13
2.1 A cultura do milho.....	13
2.2 Exigências nutricionais da cultura do milho.....	15
2.3 Influência fisiológica do nitrogênio sob a planta de milho	16
2.4 Sensoriamento Remoto na agricultura.....	19
2.5 Sensoriamento Remoto e o nitrogênio.....	21
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	23
3.1 Descrição do experimento	23
3.2 Descrição da adubação	24
3.3 Aquisição dos dados biométricos e produtivos	25
3.4 Aquisição dos dados espectrais	26
3.5 Processamento dos dados	29
3.6 Análise de Componentes Principais (PCA).....	29
3.7 Análise de Regressão por Mínimos Quadrados Parciais (PLSR).....	29
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1 Parâmetros biométricos e produtivos	31
4.2 Comportamento espectral das curvas	35
4.3 Análise de Componentes Principais (PCA).....	39
4.4 Predição do teor de nitrogênio por Análise de Regressão por Mínimos Quadrados Parciais (PLSR).....	45
5. CONCLUSÃO.....	49
REFERÊNCIAS	51

RESUMO

Diagnóstico do nitrogênio foliar do milho (*Zea mays L.*) a partir de dados hiperespectrais

Identificar o estresse nutricional na folha do milho, por meio de métodos baseados em espectrorradiometria, pode auxiliar no diagnóstico de deficiências e na tomada de decisão. Sendo assim, este trabalho visa empregar dados hiperespectrais no monitoramento das variações nutricionais do milho submetido a diferentes doses de nitrogênio. O intuito é avaliar a capacidade dos dados radiométricos em diferenciar e prever teores foliares em diferentes estádios. O experimento foi composto pelas doses de 0, 60, 120, 180 e 240 kg ha⁻¹ de nitrogênio. Foram coletados dados correspondentes à altura do milho, diâmetro do colmo, área foliar, diâmetro e comprimento das espigas, produtividade e curvas espectrais. Os dados biométricos e produtivos foram organizados em Boxplot. Para os dados espectrais foram aplicados Análise de Componentes Principais (PCA) para averiguar possíveis formas de grupos com comportamento semelhante e Análise de Regressão por Mínimos Quadrados Parciais (PLSR - Partial Least Square Regression) para buscar comprimentos de onda que estejam mais correlacionados com o nitrogênio e estimar o teor de nitrogênio foliar. Na PCA, a segunda e terceira coleta apresentaram melhores resultados havendo separação entre as doses de 240 kg ha⁻¹ e 0 kg ha⁻¹, ao mesmo tempo que se observou o agrupamento da dose de 240 kg ha⁻¹ na segunda coleta e uma separação mais visível entre os dois primeiros tratamentos 0 e 60 kg ha⁻¹ das demais doses (120, 180 e 240 kg ha⁻¹) na terceira coleta. É possível observar ainda, um agrupamento da dose de 60 kg ha⁻¹ na terceira coleta. As PLSRs apresentaram poder de predição razoáveis para as coletas 1(25 DAE, V4), 2 (35 DAE, V7) e 3 (50 DAE, V10) com R² e RMSE correspondendo a 0,63 e 1,44; 0,56 e 1,14; e, 0,62 e 1,86, respectivamente. Já a coleta 4 (65 DAE, Início do florescimento) gerou melhor predição com R² de 0,67 e RMSE de 1,62. Os resultados gerais indicaram que é possível prever o teor de nitrogênio foliar no milho durante seu desenvolvimento por meio dos dados espectrais, servindo como ferramenta eficiente no monitoramento da nutrição na cultura do milho.

Palavras-chave: Sensores, Adubação nitrogenada, Reflectância, Deficiência nutricional

ABSTRACT

Diagnosis of corn leaf nitrogen (*Zea mays* L.) from hyperspectral data

Identifying nutritional stress in the corn leaf, through methods based on spectroradiometry, can help in the diagnosis of deficiencies and in decision making. Therefore, this work aims to use hyperspectral data to monitor the nutritional variations of maize submitted to different doses of nitrogen. The aim is to evaluate the ability of radiometric data to differentiate and predict leaf contents at different stages. The experiment consisted of doses of 0, 60, 120, 180 and 240 kg ha⁻¹ of nitrogen. Data corresponding to corn height, stem diameter, leaf area, ear diameter and length, productivity and spectral curves were collected. Biometric and productive data were organized in Boxplot. For the spectral data, Principal Component Analysis (PCA) was applied to investigate possible forms of groups with similar behavior and Partial Least Squares Regression Analysis (PLSR - Partial Least Square Regression) to look for wavelengths that are more correlated with nitrogen and estimate the leaf nitrogen content. In the PCA, the second and third collections showed better results, with a separation between the doses of 240 kg ha⁻¹ and 0 kg ha⁻¹, while the grouping of the dose of 240 kg ha⁻¹ was observed in the second collection and a more visible separation between the first two treatments 0 and 60 kg ha⁻¹ from the other doses (120, 180 and 240 kg ha⁻¹) in the third collection. It is also possible to observe a dose grouping of 60 kg ha⁻¹ in the third collection. The PLSRs showed reasonable predictive power for collections 1(25 DAE, V4), 2 (35 DAE, V7) and 3 (50 DAE, V10) with R² and RMSE corresponding to 0.63 and 1.44; 0.56 and 1.14; and, 0.62 and 1.86, respectively. Collection 4 (65 DAE, Beginning of flowering) generated the best prediction with an R² of 0.67 and RMSE of 1.62. The general results indicated that it is possible to predict the leaf nitrogen content in maize during its development through spectral data, serving as an efficient tool for monitoring nutrition in maize.

Keywords: Sensors, Nitrogen fertilization, Reflectance, Nutritional deficiency

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Etapas de desenvolvimento do milho.	14
Figura 2.2. Esquema dos principais passos da fotossíntese de plantas C4.	17
Figura 2.3. Assinatura espectral de folhas saudas (verde), estressadas (marrom) e com estresse severo (vermelha).....	20
Figura 3.1. Fluxograma de desenvolvimento de atividades.....	23
Figura 3.2. Croqui do delineamento experimental em blocos casualizados (DBC).	24
Figura 3.3. Coleta do diâmetro do colmo (A) e altura (B).....	25
Figura 3.4. Escolha da folha +1 do milho (A) e corte do terço médio(B).	27
Figura 3.5. Espectrorradiômetro ASD FieldSpec (A), computador com o software RS3 (B), acessório auxiliar LeafClip (C), conjunto dos equipamentos (D).....	28
Figura 4.1. Gráficos boxplot da altura (A), diâmetro do colmo (B) e área foliar (C) coletados aos 25 DAE (V4), 35 DAE (V7) e 50 DAE (V10) em função das doses: 0, 60, 120, 180 e 240 kg ha ⁻¹ de N.....	32
Figura 4.2. Gráficos boxplot do comprimento da espiga (A), diâmetro da espiga (B) e produtividade (C) do milho em função das doses: 0, 60, 120, 180 e 240 kg ha ⁻¹ de N.	34
Figura 4.3. Curvas espectrais do milho nos comprimentos de onda 450 a 2500 (A) e região do visível (B) sob diferentes doses 0, 60, 120, 180 e 240 kg ha ⁻¹ de N, referentes a primeira coleta, após a primeira e segunda adubação (25 DAE) (A1 e B1), segunda coleta, após a terceira adubação (35DAE) (A2 e B2), terceira coleta (50 DAE) (A3 e B3) e quarta coleta (65DAE) (A4 e B4).....	36
Figura 4.4. Variância das componentes principais 1, 2 e 3.....	40
Figura 4.5. Análise de Componentes Principais com gráfico de dispersão dos scores (A) e comportamento dos loadings (B) para as componentes 1, 2 e 3 sob as diferentes doses: 0, 60, 120, 180 e 240 kg ha ⁻¹ de N, referentes a primeira coleta (25 DAE).....	41
Figura 4.6. Análise de Componentes Principais com gráfico de dispersão dos scores (A) e comportamento dos loadings (B) para as componentes 1, 2 e 3 sob as diferentes doses: 0, 60, 120, 180 e 240 kg ha ⁻¹ de N, referentes a primeira coleta (35 DAE).....	42
Figura 4.7. Análise de Componentes Principais com gráfico de dispersão dos scores (A) e comportamento dos loadings (B) para as componentes 1, 2 e 3 sob as diferentes doses: 0, 60, 120, 180 e 240 kg ha ⁻¹ de N, referentes a primeira coleta (50 DAE).....	43

Figura 4.8. Análise de Componentes Principais com gráfico de dispersão dos scores (A) e comportamento dos loadings (B) para as componentes 1, 2 e 3 sob as diferentes doses: 0, 60, 120, 180 e 240 kg ha⁻¹ de N, referentes a primeira coleta (65 DAE).....44

Figura 4.9. Regressão por Mínimos Quadrados Parciais para estimar o teor de nitrogênio foliar do milho, na primeira coleta (A1, A2), segunda coleta (B1, B2), terceira coleta (C1, C2) e quarta coleta (D1, D2) com R²: coeficiente de determinação e RMSE: erro quadrático médio em g kg⁻¹.....46

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Distribuição da adubação. 25

1. INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays L.*) é uma das culturas mais importantes na cadeia produtiva do agronegócio brasileiro, o qual, levando em consideração apenas a produção primária, corresponde a 37% da produção nacional de grãos (CONAB, 2022). Sua crescente demanda reforça o potencial do setor produtivo, se tratando de um insumo básico para a avicultura e suinocultura, dois mercados extremamente competitivos internacionalmente e geradores de receita para o Brasil (CALDARELLI e BACCHI, 2012). Além disso, o milho tem papel fundamental na conservação do solo e sustentabilidade dos sistemas de produção, devido à grande quantidade de palhada produzida, a qual auxilia na proteção, ciclagem de nutrientes e no incremento de matéria orgânica do solo (MOS), além do desenvolvimento de suas raízes auxiliar na descompactação do solo (GUTH, 2013).

A produção mundial do milho tem crescido a uma taxa de 3,34% ao ano, superando até mesmo o crescimento populacional, uma indicação do dinamismo do produto (CONAB, 2022). No Brasil, a safra de 2021/22 foi estimada em 113,3 milhões de toneladas, apresentando um crescimento de 30,1% comparado a safra de 2020/2021, colocando o país na terceira posição no ranking mundial de produção (USDA, 2022). Ainda em relação ao cenário brasileiro, dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2022) apontam produção de 126,9 milhões de toneladas para a safra de 2022/2023.

O desempenho das culturas no geral é decorrente de fatores genéticos e ambientais, e dimensioná-los possibilita melhorias nas técnicas de produção. Dentre os principais fatores limitantes no desenvolvimento das plantas se destacam o suprimento hídrico, a salinidade e a nutrição (OLIVEIRA et al., 2010). Especificamente em relação ao status nutricional, o nutriente requerido em maior quantidade pela maioria das culturas, o nitrogênio (N), seja na forma nítrica ou amoniacal é fator chave para o sucesso do cultivo (SANTOS et al., 2010).

Para a cultura do milho, o nitrogênio é um dos adubos mais exigidos e seu suprimento impróprio é considerado um dos principais fatores limitantes ao crescimento e rendimento dos grãos. O manejo e recomendação do N é complexo, em virtude das várias reações químicas e biológicas a que está sujeito e de sua grande dependência das condições edafoclimáticas para absorção pela planta (MOTA et al., 2015). Assim, plantas supridas com doses corretas de N, obtém crescimento satisfatório, podendo gerar maior produtividade (SILVA et al., 2013).

Embora existam métodos para monitoramento de nitrogênio nas culturas, como o clorofilômetro, as análises de solo e tecidos vegetais; estes se tornam impraticáveis para o monitoramento em larga escala. Isso se dá pela lentidão no processo de aquisição dos dados, além de serem processos invasivos, caros e demandarem um grande número de amostragens

para à adequada representação da sua variabilidade espacial (RANJAN et al., 2012). Uma técnica descrita como aliada da eficiência dos sistemas produtivos agrícolas é a espectrorradiometria, surgindo como ferramenta ágil, eficaz e de baixo custo no monitoramento das culturas. Estudos sobre o uso da espectrorradiometria no monitoramento do nitrogênio tem tomado grande destaque nas últimas três décadas (CAMMARANO et al., 2014; PRADHAN et al., 2014; QUEMADA et al., 2014; MARTINS, et al., 2020; CISNEROS et al., 2020).

O uso de dados hiperespectrais apoiaram o desenvolvimento de sensores dedicados à avaliação de parâmetros dos campos de produção, sobretudo o nitrogênio foliar (SHAVER et al., 2011). Li et al. (2010), mostraram que para a cultura do trigo o desenvolvimento de um novo índice dedicado ao monitoramento do nitrogênio foliar deteve melhores resultados, se comparado com diferentes índices de vegetação já propostos na literatura, sendo o mesmo fato constatado por Ryu et al. (2009) estudando a cultura arroz. Resultados do experimento de Mahajan et al. (2014), demonstraram que as medições rediométricas podem ser utilizadas no monitoramento de N, P, S e K na cultura de trigo.

Os métodos baseados em espectrorradiometria mostram-se promissores para avaliação do teor de N em plantas. A espacialização de forma mais precisa de áreas com demandas nutricionais distintas e a aplicabilidade em larga escala, são as principais vantagens que podem ser citadas (CAMMARANO et al., 2014). Diante dos estudos supracitados, nota-se resultados interessantes acerca do uso da espectrorradiometria no monitoramento do nitrogênio.

No entanto, a complexibilidade da dinâmica do nitrogênio no solo e na cultura dificulta a tarefa de estabelecer correlações confiáveis acerca do teor de nitrogênio foliar (TNF), sendo ainda necessários estudos mais aprofundados para melhor compreensão das informações fornecidas pela resposta espectral do milho (ANDRADE et al., 2019). Além disso, identificar feições espectrais específicas que auxiliam na aquisição do teor de nitrogênio na folha, facilita a detecção da variabilidade nutricional, ou seja, ajuda a determinar os diferentes níveis de N, aos quais o milho tenha sido submetido, e ainda, como a planta está respondendo a tais níveis.

Consequentemente, estas respostas podem gerar resultados antecipados sobre o status de nitrogênio foliar, fornecendo informações que auxiliam na tomada de decisão. Portanto, este trabalho busca monitorar as variações nutricionais do milho submetido a diferentes doses de nitrogênio, por meio de dados hiperespectrais, com o intuito de diferenciar e prever os teores foliares em diferentes estádios.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A cultura do milho

O milho (*Zea mays* L.) é cultivado há pelo menos 5000 anos. Possivelmente, sua origem seja do México, América Central ou Sudoeste dos Estados Unidos. Após sua descoberta, foi levado para a Europa, tornando-se conhecido como alimento, a partir daí expandiu-se por todo o globo (DUARTE et al., 2011). O milho é uma cultura anual (entre 110 e 180 dias para condições de clima no Brasil) de alto rendimento e amplamente cultivada desde 58° de Latitude Norte no Canadá e na Rússia até os 40° de latitude sul na Argentina. (FORNASIERI FILHO, 2007).

O desenvolvimento do milho apresenta 5 etapas: i) Germinação e emergência – fase compreendida entre a semeadura e o aparecimento da plântula, cujo período varia entre 4 e 12 dias, em consequência da temperatura e umidade do solo; ii) Crescimento vegetativo – inicia-se a partir da emissão da segunda folha até o início do florescimento, cuja extensão varia em decorrência do genótipo e de fatores climáticos caracterizando e classificando diferentes genótipos entre ciclos superprecoces, precoces e normais; iii) Florescimento – estabelecido entre o início da polinização e o da frutificação; iv) Frutificação – compreendida entre a fecundação e o enchimento completo dos grãos, cuja duração varia entre 40 e 60 dias; e, v) Maturidade – período compreendido entre o fim da frutificação e o aparecimento da camada negra, sendo esse relativamente curto e indicativo do fim do ciclo de vida da planta (FANCELLI e DOURADO NETO, 2000). A figura 2.1 ilustra as etapas de desenvolvimento da cultura.

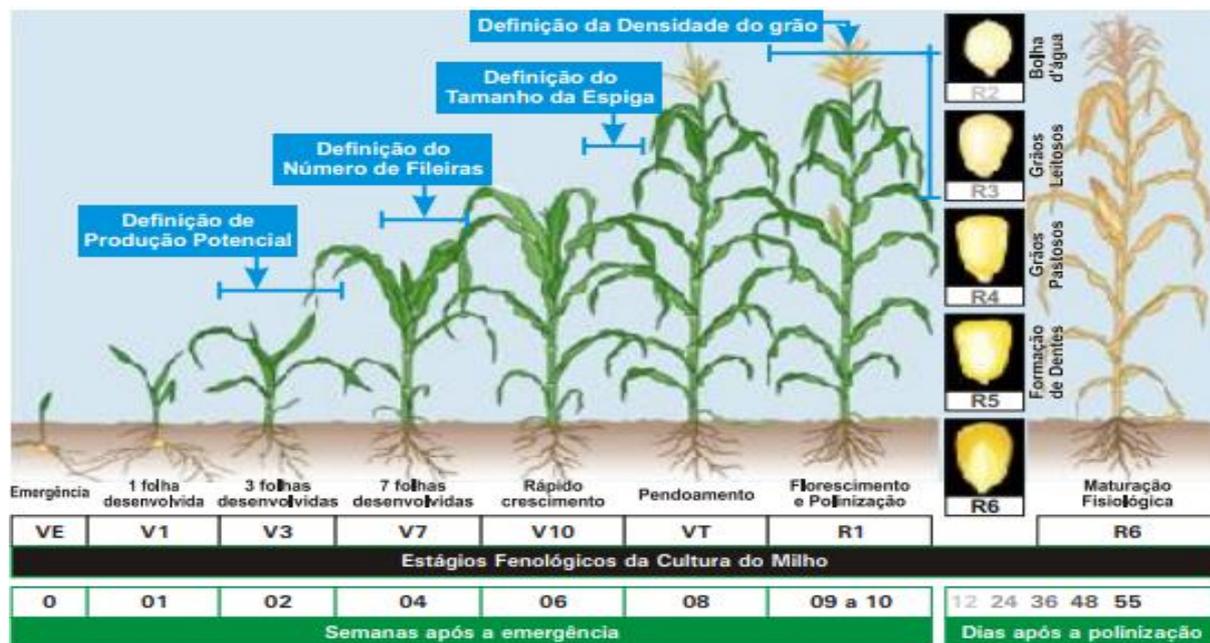


Figura 2.1. Etapas de desenvolvimento do milho.

Fonte: Adaptado de FANCELLI (1986).

A produção do milho vem crescendo a cada ano junto ao avanço das pesquisas, sendo uma das principais culturas cultivadas no Brasil (SILVA e SILVA, 2017). É um cereal de grande importância para a alimentação humana e animal, além de servir como matéria prima para indústria (BARAVIERA et al., 2014), principalmente em função da quantidade e qualidade das reservas acumuladas nos grãos (ALVES et al., 2015). O Brasil é o terceiro maior produtor do grão, respondendo por cerca de 9,9% do volume total produzido e superado apenas por Estados Unidos (31,8%) e China (22,8%) (USDA, 2022).

No decorrer das últimas décadas, o milho alcançou o patamar de maior cultura agrícola do mundo, sendo a única a ter ultrapassado a marca de 1 bilhão de toneladas, deixando para trás antigos concorrentes, como o arroz e o trigo, devido a importância notabilizada pelos diversos usos. Estimativas apontam para mais de 3.500 aplicações deste cereal. Como por exemplo, a alimentação humana e animal, produção de uma infinidade de produtos, tais como combustíveis, bebidas, polímeros, etc. (MIRANDA, 2018).

O milho é um produto fundamental para a agricultura brasileira, cultivado em todas as regiões do Brasil, em mais de dois milhões de estabelecimentos agropecuários, contribuindo para o sustento de pequenas propriedades (MORTATE et al., 2018). Nas últimas décadas, a cultura passou por transformações profundas, destacando-se sua redução como cultura de subsistência de pequenos produtores e o aumento do seu papel em uma agricultura comercial eficiente, com deslocamento geográfico e temporal da produção (COTINI, 2019). Pode-se dizer que é uma cultura estratégica sob o ponto de vista de segurança alimentar e do

desenvolvimento econômico (FAOSTAT, 2012). O crescimento do Brasil é notável, com 4,67% a.a. na produção e 2,95% a.a. na produtividade (CONAB, 2022). A CONAB (2022) aponta uma produção de 126,9 milhões de toneladas para a safra de 2022/2023.

2.2 Exigências nutricionais da cultura do milho

As necessidades nutricionais das culturas são estabelecidas de acordo com a quantidade de nutrientes extraída durante o seu ciclo produtivo. As quantidades extraídas dependem da produtividade atingida, do cultivar, das condições de clima, fertilidade do solo, adubação realizada e demais tratos culturais (VON PINHO et al., 2010). No caso do milho, dentre os elementos minerais essenciais, o nitrogênio (N) é o nutriente exigido em maior quantidade pela cultura, limitando o crescimento, capacidade fotossintética e produtividade de grãos (WEI et al., 2016; TRACHSEL et al., 2016). Trabalhos desenvolvidos sob diversas condições climáticas, sistemas de cultivo e condições de solo, demonstraram que, em geral, a cultura do milho é responsiva á adubação nitrogenada (CARMO et al., 2012; SANTOS et al., 2013a).

Os períodos em que o milho absorve maiores quantidades de nitrogênio são durante a fase de desenvolvimento vegetativo e formação da espiga, e os períodos em que absorve menores quantidades são entre a emissão do pendão e o início da formação da espiga (OLNESS e BENOIT, 1992). A cultura se torna vulnerável com o manejo incorreto de nitrogênio, a deficiência do adubo provoca um desequilíbrio nutricional entre o colmo e a espiga, tornando a planta de milho mais suscetível aos complexos causadores de podridão da base do colmo (WORDELL FILHO e SPAGNOLLO, 2013).

No entanto, altas concentrações de nitrogênio no solo causam aumento na formação de tecidos jovens, o acúmulo de aminoácidos no apoplasto e na superfície da folha, tornando as plantas mais susceptíveis a infecções, além de diminuir a concentração de compostos fenológicos de lignina e silício, prejudicando o sistema de defesa das plantas contra infecções fúngicas (FAGARD et al., 2014). Dessa maneira, o desequilíbrio nutricional de nitrogênio torna a cultura do milho mais susceptível a doenças, seja pela falta ou excesso do nutriente (SANTOS et al., 2013b).

Apesar da incontestável importância dos fertilizantes nitrogenados para o aumento da produção agrícola, ainda se enfrentam dificuldades na definição de doses econômicas de N para a cultura do milho, especialmente quando altas produtividades são esperadas. Além disso, o uso de fertilizantes contendo amônia ou ureia ocasiona acidificação do solo,

principalmente quando doses elevadas são empregadas no sistema de produção (CAIRES et al., 2015). Atualmente, e de acordo com a recomendação para a adubação da cultura do milho, as doses variam entre 120 a 160kg ha⁻¹ de N com o uso de 30 a 40 kg ha⁻¹ na adubação de semeadura e o restante quando a planta se situa entre os estádios fenológicos V3 e V4, momento que é realizado a adubação de N em cobertura, levando em conta a expectativa da produtividade desejada da cultura (YAMADA, 1995; RIBEIRO et al., 1999; SOUSA e LOBATO, 2004).

A recomendação de adubação nitrogenada será sempre uma aproximação do que a cultura precisa, pois, a disponibilidade deste nutriente no solo varia em funções de diversos fatores, como: teor de umidade, tipo de fertilizante, temperatura do solo e práticas de manejo cultural, sendo muito difícil determinar a quantidade exata de N que o milho necessita para atingir sua produção estimada (YAMADA, 2000). E é neste contexto que as técnicas de sensoriamento remoto podem ser aplicadas, pois com a quantidade de radiação refletida pela planta é possível monitorar as fases de desenvolvimento e crescimento da planta, os resultados desse monitoramento influenciarão na tomada de decisões, como exemplo a correção de solo e a quantificação de N na planta do milho e com está quantificação é possível chegar muito próximo a quantidade que a planta necessita deste nutriente (ANDRADE et al., 2019).

2.3 Influência fisiológica do nitrogênio sob a planta de milho

A ureia é um dos fertilizantes mais utilizados no Brasil como fonte de nitrogênio para as plantas, com baixo custo, alta concentração de nitrogênio, facilidade de produção e boa solubilidade (CANTARELLA, 2007). No solo a ureia (CH₄N₂O) passa pela hidrólise catalisada pela enzima urease, liberando compostos que são absorvidos pela raiz da planta ou perdidos pela lixiviação e/ou volatilização. O processo de hidrólise da ureia pode durar dois ou três dias, decorrente da forma e quantidade de ureia aplicada, da umidade, temperatura e ph do solo (REYNOLDS et al., 1985).

A ureia é assimilada de maneiras diferentes pelas plantas e isto se deve aos processos metabólicos que estão associados as plantas C3 e C4. Um estudo realizado por Merigout et al. (2008) com o objetivo de avaliar o efeito de três fontes de nitrogênio (ureia, nitrato e sulfato de amônia) no metabolismo, concluiu que a maior eficiência de utilização de ureia é vista em plantas de metabolismo C4. Na figura 2.2, pode-se observar as principais etapas realizadas por plantas de metabolismo C4 na realização da fotossíntese.

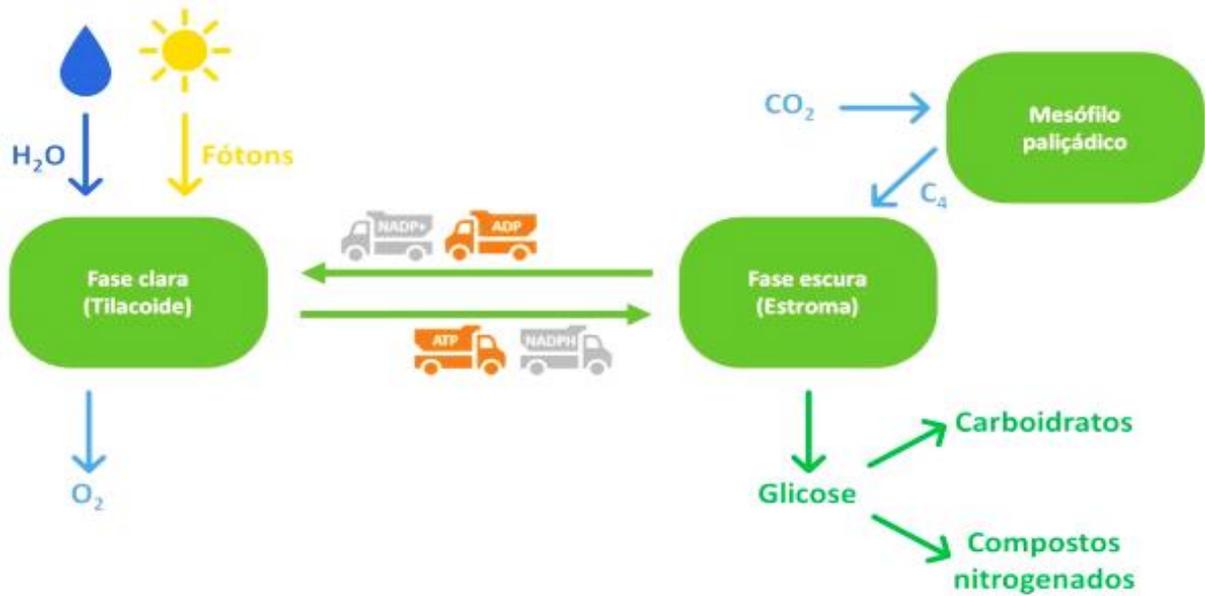


Figura 2.2. Esquema dos principais passos da fotossíntese de plantas C4.
Fonte: Adaptado de CASTRO et al., 2005.

O milho é caracterizado por ser uma planta herbácea, de folhas alternadas, de ciclo anual, monóica, ou seja, que possui dois sexos na mesma planta com momentos de inflorescências diferentes. Esta cultura pertence ao gênero de plantas C4 que possuem como diferencial alto aproveitamento na fixação de CO_2 (SILOTO, 2002; FANCELLI e DOURADO NETO, 2004; HORN et al., 2006; TAIZ e ZEIGER, 2004). Por ser uma planta de metabolismo C4 e possuir elevada eficiência na utilização da luz solar e CO_2 , umas de suas limitações na produtividade pode estar relacionada a deficiência de luz em períodos críticos ao seu desenvolvimento (MAGALHÃES et al., 2020).

Plantas C4 podem ser classificadas em três grupos de acordo com a descarboxilação na bainha vascular, e o milho está no grupo que apresenta maior eficiência no uso da radiação solar (entre $64,5$ e $69,0 \mu\text{mol mol}^{-1}$) enquanto que os outros grupos se encaixam em valores na faixa de $52,6$ a $60,4 \mu\text{mol mol}^{-1}$. Este mecanismo é favorecido pela sua anatomia, que possui menor área entre as nervuras e lamela suberizada, reduzindo as perdas de CO_2 para o meio externo (BERGAMASCHI e MATZENAUER, 2014).

Nas plantas C4, o mecanismo de concentração de CO_2 da rubisco mantém a elevada razão CO_2/O_2 e reduz a fotorrespiração. Está elevada razão CO_2/O_2 acontece pela alta afinidade da enzima fosfoenolpiruvato carboxilase (PEPcase) pelo CO_2 , que por sua vez fixa o dióxido de carbono por meio da formação do ácido oxalacético e leva este produto de quatro carbonos para as células da bainha do feixe vascular, onde é descarboxilado. O CO_2 então é refixado pela rubisco e eleva a sua concentração no meio fazendo com que a rubisco opere no

limite da sua taxa máxima de saturação de CO₂, inibindo sua atividade de oxigenase e eliminando a fotorrespiração (BERGAMASCHI e MATZENAUER, 2014).

O processo de fotossíntese necessita da presença e atuação de várias moléculas e enzimas para ocorrer, a exemplo a enzima rubisco, porém, o suprimento de energia (ATP) e o metabolismo de regeneração das enzimas não atendem à demanda das células fotossintéticas (YELLE et al., 1989; CHEN et al., 2005). Essa deficiência é o primeiro ponto de regulação do metabolismo, pois, o aumento da taxa fotossintética fica limitada pelo maior consumo da Rubisco e energia, que não são repostas na mesma velocidade. Ao fim da fotossíntese, são liberadas cadeias de carbono ou carboidratos, que são substratos na biossíntese de outros compostos estruturais e/ou compostos do metabolismo vegetal. A síntese de aminoácidos (componentes das proteínas) é uma das principais vias dos carboidratos após serem produzidos (TAIZ e ZEIGER, 2013).

Neste processo, o nitrogênio (N) é utilizado juntamente com um grupamento carboxila (COOH) e uma amina (NH₂), para serem adicionados aos carboidratos, na presença de enzimas e outros compostos. Ademais, o nitrogênio é um componente da clorofila, do ATP, e cofator da rubisco (TAIZ e ZEIGER, 2013). Portanto, a quantidade de nitrogênio presente no interior das folhas para este metabolismo, é outro ponto de regulação da fotossíntese em curto prazo (KIM et al., 2011). Cerca de 80% do nitrogênio foliar é levado para os cloroplastos na forma de proteínas, no qual a rubisco representa aproximadamente 20% do total de proteínas solúveis em folhas de plantas C4 (KANT et al., 2011).

Durante a fase de senescência, essas proteínas são quebradas e o nitrogênio é realocado para formação dos novos tecidos para assegurar o crescimento e reprodução das plantas. Portanto, se a deficiência de nitrogênio não for suprida, ela poderá induzir a senescência das folhas mais velhas para que os tecidos mais novos consigam os compostos fotossintéticos necessários para seu desenvolvimento (MENG et al., 2016). A planta que possui maior taxa fotossintética e, conseqüentemente, maior produção de carboidratos, tem sua demanda de N aumentada, podendo levar a uma deficiência de N nas folhas. Esta deficiência leva ao acúmulo de carboidratos que são responsáveis por outro ponto de regulação do metabolismo da planta (TRICKER et al., 2004).

A absorção de água é outro ponto de regulação do metabolismo. A taxa de absorção de nitrogênio ocorre em função da taxa de absorção de água, assim, quanto menor a quantidade de água absorvida, menor quantidade nitrogênio é carregado pelo processo de absorção (MALAVOLTA, 1980), podendo agravar o estado de deficiência de N. Considerando essa menor absorção de nutrientes, pode-se supor que as exigências de adubação (principalmente

nitrogenada) sejam maiores em ambientes que influenciem a absorção de água. Além disso, a maior taxa fotossintética faz com que a demanda por nutrientes também aumente.

O nitrogênio possui uma alta influência fisiológica sobre a planta por estar presente em todos os aminoácidos, proteínas e ácidos nucleicos, participando de vários processos bioquímicos. Sintomas como a queda no desenvolvimento e rendimento da cultura, mudança na arquitetura da raiz e a senescência precoce das folhas, podem ser observados quando ocorre a carência do aporte de nitrogênio. Estes sintomas são o reflexo da diminuição na síntese de clorofila, taxa fotossintética, aminoácidos essenciais, e na energia necessária à produção de carboidratos e esqueletos carbônicos, além da mudança de expressão de genes envolvidos no metabolismo de carbono e nitrogênio (MALAVOLTA et al., 1997; HERMANS et al., 2006; KANT et al., 2011).

2.4 Sensoriamento remoto na agricultura

O estudo da espectroscopia de reflectância, é utilizado na agricultura a partir da interação da radiação solar com o alvo, podendo ser o solo ou as plantas (MULLA, 2013). Especificamente em relação as plantas, a figura 2.3 mostra o comportamento espectral de três tipos de vegetação: sadia, com estresse e com estresse severo.

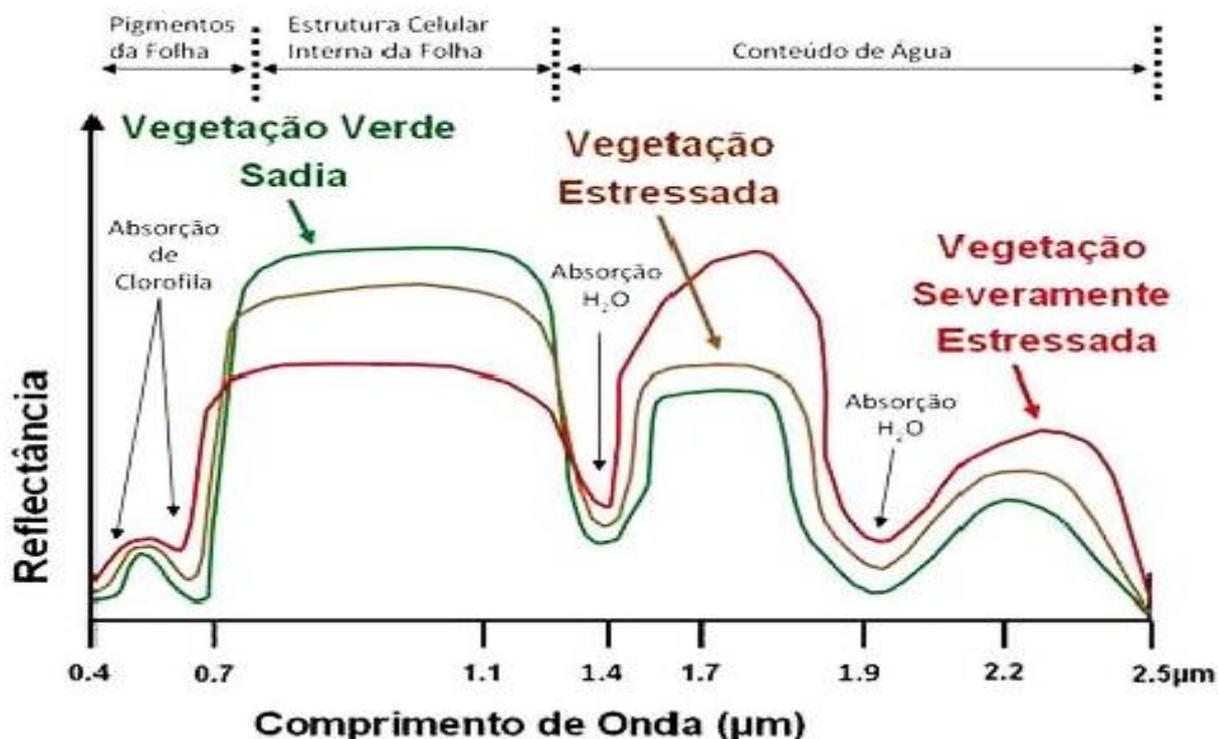


Figura 2.3. Assinatura espectral de folhas saudias (verde), estressadas (marrom) e com estresse severo (vermelha).

Fonte: Filho et al. 2008.

As alterações observadas nas respostas espectrais das plantas nas regiões do visível, infravermelho próximo e infravermelho médio, determinam o estresse nutricional das culturas agrícolas (CURRAN, 1989). A região do visível situa-se entre os 400 e 720 nm do espectro eletromagnético e corresponde à radiação absorvida para o acúmulo de biomassa, sendo influenciada pelos pigmentos da folha, como carotenos, xantofilas, clorofilas “a” e “b”, que absorvem a maior parte da radiação incidente na superfície foliar convertendo-a em calor ou fluorescência (MOREIRA, 2011; PONZONI et al., 2012).

A região do infravermelho próximo situa-se entre 720 e 1100 nm do espectro eletromagnético (MOREIRA, 2011), apresenta a reflectância próxima a 40%, que pode ser explicada pelo aumento de espaços vagos entre as células do mesófilo esponjoso (LIU, 2015), pelo número de camadas celulares e, indiretamente, pela quantidade de água presente na folha (PONZONI et al., 2012). A região do infravermelho médio situa-se entre 1100 e 3200 nm do espectro eletromagnético (MOREIRA, 2011) e possui a reflectância alterada pela quantidade de água presente na folha. A água absorve energia em todas as faixas dos espectros, no entanto, a radiação de destaca nas regiões entre 1300 e 2000 nm (PONZONI et al., 2012) diminuindo assim a energia refletida. Portanto, a região do infravermelho acaba sendo a mais influenciada pela espécie vegetal, pois é sensível às diferenças da estrutura celular (GRANT et al., 2012).

Uma das metodologias aplicadas até hoje são os índices de vegetação que têm sido utilizados genericamente com várias finalidades, porém, com o avanço da tecnologia vieram sensores hiperespectrais que permitem escolhas de bandas espectrais para fins específicos (MOREIRA, 2011). A resposta espectral varia ao longo do ciclo das culturas agrícolas, sendo que o modelo criado para um parâmetro específico pode ter melhor resultado durante uma determinada fase da cultura, o que nem sempre condiz com a fase de interesse técnico da mesma (LI et al., 2010).

Para coleta de dados em campo, a espectrorradiometria é uma técnica imediata e precisa para o estudo das relações entre dados espectrais e dados biofísicos, e tem sido largamente utilizada nos trabalhos de pesquisa sobre o emprego do sensoriamento remoto na análise de campos produtivos por meio de sensores ativos e passivos, à nível terrestre (VIGNEAU et al., 2011; MAHAJAN et al., 2014), aéreo (LEBOURGEOISV et al., 2012) e orbital (HERRMANN et al., 2011). A maior parte desses estudos aborda a dinâmica de espectros de fatores de reflectância (CHEN et al., 2010; HUNT et al., 2013).

As informações espectrais em vários comprimentos de onda permitem melhor identificação de diferentes tipos de alvos e uma maior precisão na construção de índices relacionados ao status nutricional (LI et al., 2014a). As alterações nas propriedades espectrais da vegetação ocasionadas por estresse nutricional servem de embasamento para a utilização de técnicas de sensoriamento remoto na diagnose e no manejo de nutrientes em culturas agrícolas. Esse tipo de abordagem tem sido investigado para aplicações em cultivos de larga escala como o milho (SCHLEMMER et al., 2013; QUEMADA et al., 2014).

2.5 Sensoriamento remoto e o nitrogênio

Entre os fatores modificadores da composição química na folha está a condição nutricional das plantas. Segundo Munné-Bosch & Alegre (2004), o estresse por deficiência nutricional ocasiona mudanças significativas na fisiologia das plantas. Essas alterações ocasionam, conseqüentemente, modificações no espectro de reflectância. O principal nutriente responsável nesse processo é o Nitrogênio(N). A deficiência desse elemento induz mudanças na estrutura e na cor nas folhas (clorose), o que possibilita a identificação de padrões espectrais de resposta à adubação (CHEN et al., 2010). As faixas espectrais do visível (VIS) e infravermelho próximo (NIR) são as principais regiões onde é possível a identificação das alterações na reflectância da vegetação em função da adubação de N (CILIA et al., 2014).

Os sensores ópticos têm ganhado destaque na literatura como método inovador que envolve praticidade, agilidade e eficiência para avaliação do estado nutricional de N em culturas (RANJAN et al., 2012). Estes sensores surgiram como uma forma não destrutiva de avaliar diferentes amostras, com economia de tempo e reagentes, sendo bastante eficiente para determinar o estado nutricional da planta, sobretudo do nitrogênio foliar (SHAVER et al., 2011; RANJAN et al., 2012). A estimativa do teor de nitrogênio foliar dá suporte ao uso correto de fertilizantes na plantação (WANG e LI, 2012). Foram realizados alguns estudos com sensores hiperespectrais para avaliar algumas culturas como a cevada, cana de açúcar, o milho e trigo (MOLIN et al., 2010; AMARAL e MOLIN, 2014; ROSA et al., 2015).

Outros trabalhos como MARTINS et al. (2020), que buscaram demonstrar as relações entre variações no teor de nitrogênio foliar (LNC) e o comportamento espectral da cana-de-açúcar e CISNEROS et al. (2020) que buscaram testar e demonstrar a aplicabilidade de diferentes índices para estimar a produtividade de biomassa, o teor de nitrogênio foliar (FNC), a altura da planta e o índice de área foliar (IAF) de diversas espécies de campos tropicais submetidas a diferentes doses de nitrogênio (N), são exemplos que demonstraram o uso dos sensores hiperespectrais.

Blackmer et al. (1996) concluíram que, a melhor faixa do espectro para ser utilizada a fim de detectar a deficiência de N no milho encontra-se entre 550 e 710nm. O status de N na planta apresenta boa correlação com a concentração de clorofila no tecido foliar. A variação da clorofila faz com que a reflectância da região visível do espectro eletromagnético (300-700 nm) também apresente variações, as quais podem ser utilizadas para a avaliação do teor de nitrogênio na cultura (READ et al., 2003; BRANDÃO, 2009; BRONSON et al., 2011, MARTINS, et al., 2020).

Markovic et al. (2017) revelou que o rendimento de grãos de milho é basicamente influenciado pela quantidade de N disponível, o adubo afetou significativamente o rendimento do milho em um experimento de milho analisado por dois anos. No milho, a concentração de clorofila nas folhas está altamente relacionada ao status de nitrogênio, indicando que a capacidade de identificar a variabilidade espacial na concentração de clorofila no milho por meio de dados de sensoriamento remoto permite que o status de N das culturas seja quantificado rapidamente em nível de campo (RODRIGUEZ e MILLER, 2000). Outros estudos mostraram a capacidade de prever o teor de nitrogênio da cultura a partir de dados de sensoriamento remoto (BABAR et al., 2006), como milho (ERDLE et al., 2011), trigo (LI et al., 2010; VIGNEAU et al., 2011), arroz (TIAN et al., 2011; YI et al., 2012), feijão (REDDY e MATCHA, 2010).

3. MATERIAL E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste estudo foram seguidos os passos descritos no fluxograma (Figura 3.1).



Figura 3.1. Fluxograma de desenvolvimento de atividades.

3.1 Descrição do experimento

O experimento foi instalado e desenvolvido em área de pivô central localizado na Fazenda Areão, pertencente a Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), no município de Piracicaba sob as coordenadas geográficas 22°41’54” de latitude sul, 47°38’34” de longitude oeste e altitude de 540 m. O solo da região é classificado como Nitossolo Eutroférico Típico. De acordo com o sistema de classificação de Köppen, o clima do local é do tipo Cwa, subtropical úmido, com estiagem no inverno e chuvas no verão, precipitação pluviométrica média de 1247 mm ano⁻¹, temperatura média do mês mais quente de 22 °C e do mais frio de 18 °C, umidade relativa média de 74% e velocidade do vento média de 2,2 m s⁻¹ (SENTELHAS, 1998).

A cultivar de milho utilizada foi a SHS7939, semeada no dia 12/11/2021. Este híbrido é considerando precoce e com alta produtividade. Cultivado em todo Brasil tanto no verão quanto na safrinha, utilizado para produção de grãos, silagem de planta inteira e silagem de

grão úmido. Possui tecnologias: i) convencional, ii) VT PRO 2TM com tolerância a insetos da ordem lepidóptera e ao herbicida Glifosato e, iii) VT PRO 3 com proteção da raiz do milho contra o ataque da Diabrotica Speciosa (larva alfinete) (SHS, 2022).

O delineamento experimental foi em blocos casualizados (DBC) com 5 tratamentos e 5 repetições, totalizando 25 parcelas. Os tratamentos corresponderam as doses de 0, 60, 120, 180 e 240 kg de nitrogênio por ha⁻¹, sendo utilizada a ureia como adubo. Cada parcela foi composta de 6 linhas de milho (4 linhas centrais e 2 de bordadura), com dimensões de 8x2,7m (Figura 3.2).

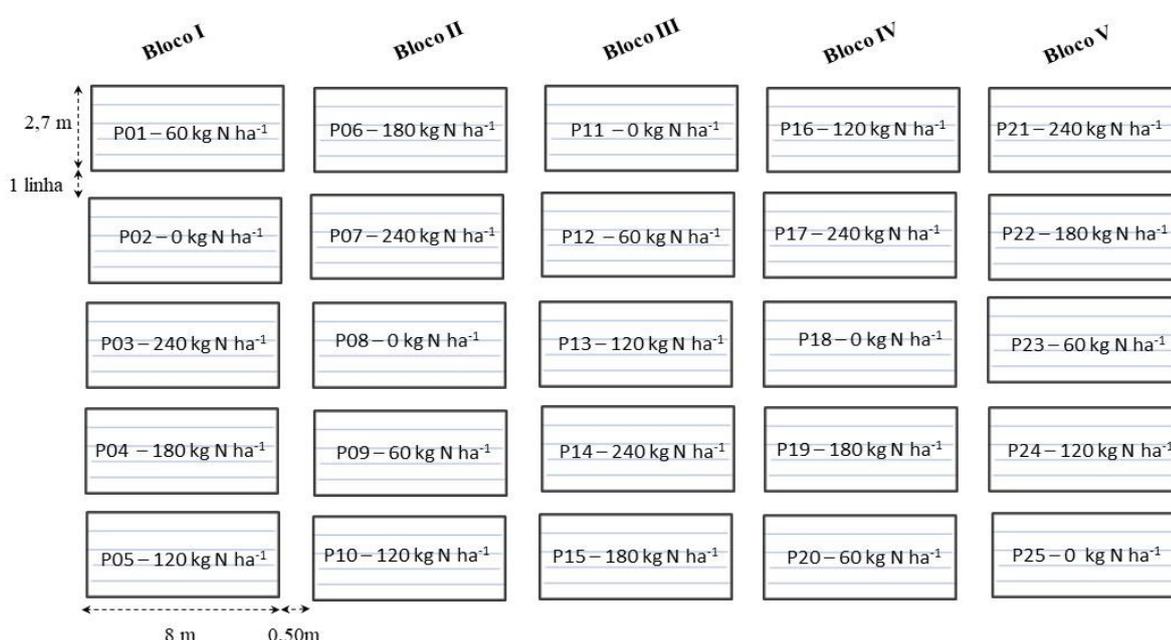


Figura 3.2. Croqui do delineamento experimental em blocos casualizados (DBC).

3.2 Descrição da adubação

A área experimental é de sucessão de culturas, ou seja, o milho foi plantado após cultivo da soja, esta rotação de cultura ocorre há pelo menos 4 anos na área. As doses de nitrogênio foram determinadas posteriormente ao resultado da análise e correção do solo, seguindo a metodologia de Raij et al. (1997), tendo como resultado ótimo para o experimento uma dose de 180 kg ha⁻¹. A partir disto, foram adicionadas duas doses inferiores (60 e 120 kg ha⁻¹) e um superior (240 kg ha⁻¹). A adubação nitrogenada foi realizada de forma fracionada em 3 fases de aplicação. Inicialmente aplicou-se uma parte na semeadura com 30 kg ha⁻¹ em todas as parcelas, exceto na testemunha. O restante do fertilizante foi parcelado em duas partes iguais e distribuídos nos estádios V3 e V5 (Tabela 3.1).

Tabela 3.1. Distribuição da adubação.

Tratamento	Doses	Semeadura			V5
		---- Nitrogênio em kg ha ⁻¹ ----			
T1	0	0	0	0	
T2	60	30	15	15	
T3	120	30	45	45	
T4	180	30	75	75	
T5	240	30	105	105	

3.3 Aquisição dos dados biométricos e produtivos

Foi realizada a biometria do milho nas quatro linhas centrais de cada unidade experimental após sete dias de cada aplicação de N, tempo considerado suficiente para absorção do nitrogênio por parte da planta. As coletas referentes à altura de planta, diâmetro do colmo e área foliar ocorreram em três fases: 25, 35 e 50 Dias Após Emergência (DAE), nos estádios V4, V7 e V10, respectivamente. A cada coleta, a biometria foi realizada de forma aleatória dentro da parcela, sendo medidas 10 plantas por unidade experimental, com os três parâmetros analisados aferidos na mesma planta.

A altura e o diâmetro foram medidos com a ajuda de uma trena e um paquímetro, respectivamente (Figura 3.3). A área foliar foi obtida pela expressão $AF = C \times L \times 0,75$, também utilizada por Sangoi et al. (2007), em que C representa o comprimento e L a largura. A medição foi realizada também com o auxílio de uma trena.



Figura 3.3. Coleta do diâmetro do colmo (A) e altura (B).

O levantamento dos dados de caracteres produtivos ocorreu antes da colheita, sendo colhida manualmente as espigas existentes em uma área útil de 4m² de cada parcela. Em seguida, foram analisadas para estimativa de produtividade, onde foram selecionadas 3 espigas, seguindo a metodologia de Reetz (1987) para análise dos parâmetros: comprimento, largura e diâmetro da espiga. O comprimento das espigas (cm) foi obtido com auxílio da trena graduada em centímetros. Utilizou-se paquímetro de precisão milimétrica, na determinação do diâmetro de espigas (mm). Aferiu-se o número de fileiras por espiga, em seguida o número de grãos total por espiga dividido pelo número de fileiras. A produtividade foi estimada pelo método de Reetz (1987), obtida da média das produtividades estimadas das três espigas, provenientes de cada amostra, utilizando a Equação 1.

Produtividade (t ha⁻¹, a 15,5% de umidade) = A x B x C x 0,01116 x 0,063.

Em que:

A: número de espigas em 4m²; B: número de fileiras de grãos da espiga; C: número de grãos por fileira, utilizando uma média de 3 fileiras de grãos por espiga, desconsiderando os grãos menores que a metade de um grão normal, presentes na extremidade da espiga; 0,01116: fator de correção do método; e 0,063: valor para transformação de bushels por acre (bu A⁻¹) para toneladas por hectare (t ha⁻¹).

3.4 Aquisição dos dados espectrais

Foram realizadas 4 coletas de dados espectrais, sendo as três primeiras nos mesmos dias da coleta biométrica (25, 35, 50 DAE) e uma aos 65 DAE quando o milho estava no estágio de início de florescimento. Em cada coleta foram adquiridas 10 folhas de cada unidade experimental, gerando 250 leituras por coleta e um total de 1000 leituras.

Coletaram-se as “folhas +1” de cada planta, sendo estas, folhas que estão totalmente desenvolvidas, localizadas na parte superior da planta e apresentam desprendimento total da bainha com a língua membranosa. Além disso, houve a separação do terço médio de cada folha com o auxílio de uma tesoura (Figura 3.4). Tais processos ocorreram para fins de padronização na aquisição dos dados espectrais. Após a coleta em campo, as folhas eram colocadas em sacos plásticos com suas respectivas identificações e transportadas em caixas térmicas com gelo, a fim de manter a turgescência das folhas por um período maior de tempo para realização das leituras, seguindo a metodologia de TAVARES et al. (2020).

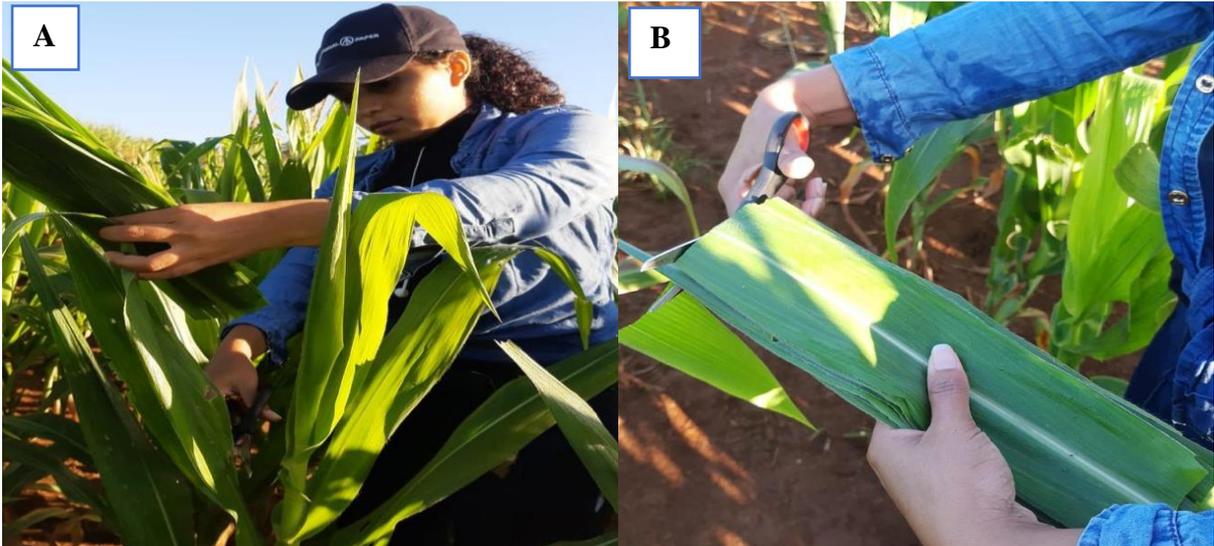


Figura 3.4. Escolha da folha +1 do milho (A) e corte do terço médio(B).

Os dados hiperespectrais foram adquiridos com o espectrorradiômetro ASD FieldSpec FR Spectroradiometer® (ASD – Analytical Spectral Devices Inc., Boulder, CO, EUA) e o *LeafClip* (ASD Inc., Boulder, Colorado, EUA) que tem como função facilitar a leitura espectral na face adaxial das folhas e diminuir a influência dos fatores externos (Figura 3.5). O espectrorradiômetro coleta dados no espectro compreendido entre os comprimentos de onda de 350 a 2500 nm, abrangendo assim as regiões do Visível (VIS), Borda vermelha, Infravermelho Próximo (NIR) e Infravermelho Médio, com resolução espectral de 3 nm na faixa de 350-1000 nm e de 10 nm entre 1000 e 2500 nm (ASD, 2010).

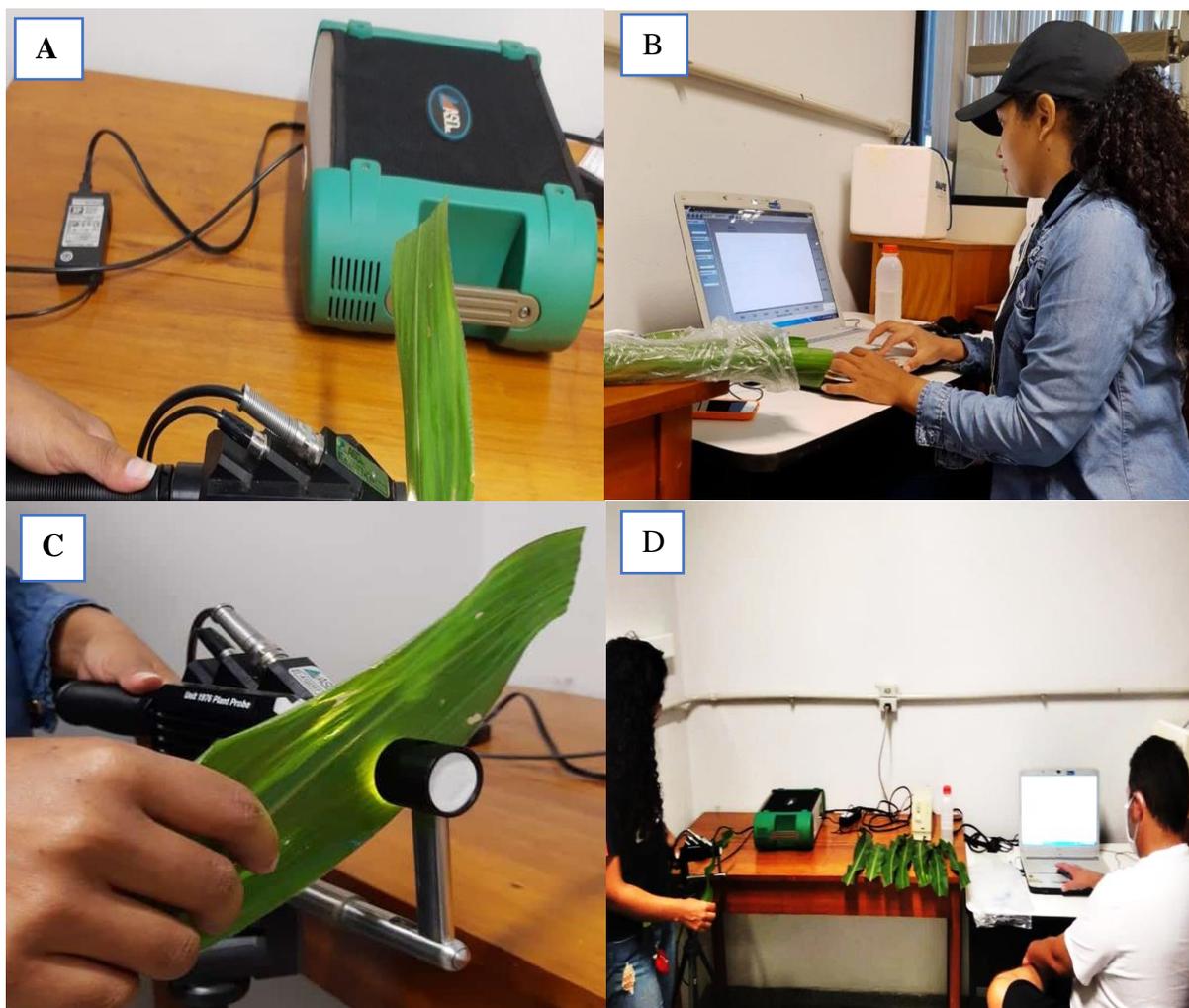


Figura 3.5. Espectrorradiômetro ASD FieldSpec (A), computador com o software RS3 (B), acessório auxiliar LeafClip (C), conjunto dos equipamentos (D).

Para o processo de aquisição das leituras foi realizada a calibração do aparelho. Inicialmente o espectrorradiômetro foi ligado por 30 minutos para o aquecimento e estabilização da lâmpada halógena, seguindo calibração com o auxílio de um bloco cerâmico branco presente no dispositivo *LeafClip* (*Placa Lambertiana*). A calibração com o bloco cerâmico foi feita a cada 10 leituras espectrais das folhas para garantir constância e padronização dos dados.

Após este processo os dados foram exportados para o *software* ViewSpec Pro (ASD – Analytical Spectral Devices Inc., Boulder, CO, USA), onde foram convertidos para refletância. Em seguida foram exportadas para um segundo *software*, o Microsoft Excel® 2016, onde ocorreu um pré-tratamento dos dados com a eliminação de ruídos de 350-449 nm, resultando em uma curva espectral de 450 a 2500 nm.

Após as leituras, as folhas foram encaminhadas ao Laboratório de Tecidos Vegetais, setor do Departamento de Ciência do Solo (ESALQ/USP) para determinação dos teores de nitrogênio. O resultado foi obtido em grama de nitrogênio por quilograma (g kg^{-1}).

3.5 Processamento dos dados

Para estatística, todos os dados (biométricos, produtivos e as curvas de reflectância) passaram pelo teste de normalidade de Shapiro e Wilk (1965), a $p < 95\%$. Apenas os dados biométricos e produtivos se ajustaram a normalidade, sendo submetidos a ANOVA. Não rejeitando a hipótese nula, os dados biométricos e de caráter produtivo foram organizados em gráficos *boxplot* com os valores da média, mediana, primeiro e terceiro quartil, assim como os valores máximo e mínimos elaborados no software Microsoft Excell® 2016, para melhor visualização. Não se ajustando a distribuição normal, as assinaturas espectrais das folhas foram submetidas a Análise de Componentes Principais (PCA) e posterior Análise de Regressão por Mínimos Quadrados Parciais (PLSR).

3.6 Análise de Componentes Principais (PCA)

A análise de Componentes Principais foi adotada para averiguar as características da curva espectral e identificar os comprimentos de onda mais significativos, além de investigar a correlação entre os dados e a possível formação de grupos com comportamento semelhante. Esta análise tem sido amplamente utilizada para realizar estudos que envolvem dados espectrais na área do sensoriamento remoto, sendo um dos instrumentos mais úteis da análise multivariada. O PCA tem como principal objetivo estabelecer as combinações lineares de variáveis e extrair as variações dos dados originais, o que reduz a dimensionalidade destes dados. A redução das variáveis elimina os componentes sobrepostos e as informações mais importantes contidas nos dados originais são retidas pelo PCA (LI et al., 2016).

3.7 Análise de Regressão por Mínimos Quadrados Parciais (PLSR)

A análise de Regressão por Mínimos Quadrados Parciais (PLSR - Partial Least Square Regression) foi utilizada para estimar o teor de nitrogênio foliar no milho buscando os comprimentos de onda que estejam mais correlacionados com o teor de nitrogênio foliar

(TNF) oriundos das análises químicas e os valores de reflectância. O PLS é um tipo de regressão muito útil quando as variáveis são colineares, a exemplo, o espectro ou ainda, quando existem maior número de variáveis do que observações. Ademais, esta é uma análise robusta que gera modelos de forma satisfatória mesmo com presença de ruídos ou ausência de dados (VISCARRA ROSSEL, 2008). É também um método muito utilizado para relacionar propriedades químicas das plantas com o espectro (ASNER e MARTIN, 2008; CARVALHO et al., 2013).

Para definir as bandas relevantes na predição, calculou-se a Importância da Variável na Predição (VIP). Este índice é calculado para cada banda espectral, sendo considerados apenas valores acima de 0,8 (WOLD, SJÖSTRÖM e ERIKSSON (2001). Todo o processo estatístico das curvas espectrais foi realizado no software estatístico JMP ® Pro (versão 14). O JMP ® Pro é um software composto de ferramentas estatísticas que atendem a necessidades específicas, dentre elas, análises de correlação e predição (JMP, 2022).

Os resultados das predições do teor de nitrogênio foram avaliados conforme o seu desempenho no mérito de maior R^2 (Coeficiente de determinação) e menor Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE - Root Mean Square Error). Analisando qual maior valor de R^2 para precisão do modelo de predição do teor de nitrogênio e o analisando o valor de RMSE para a acurácia do modelo. Os valores de R^2 foram interpretados de acordo com Saeys et al. (2005), considerando que os modelos com valores de R^2 inferiores a 0,50 são ruins; R^2 entre 0,50 e 0,65 indicam um modelo razoável, com a possibilidade de discriminação entre altas e baixas concentrações do atributo modelado; enquanto valores de R^2 entre 0,66 e 0,86 e acima de 0,86 indicam modelos quantitativos de predição bons e excelentes, respectivamente.

com o intuito de buscar comprimentos de onda que estejam mais correlacionados com o teor de nitrogênio foliar (TNF) entre os valores de TNF oriundos das análises químicas com os valores de reflectância e estimar o teor de nitrogênio foliar no milho.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Parâmetros biométricos e produtivos

Os resultados mostram que as maiores médias para altura, diâmetro do colmo e área foliar se concentraram entre as doses de 120 kg ha⁻¹ e 180 kg ha⁻¹ levando em consideração todas as coletas realizadas (Figura 4.1). A avaliação da altura indicou que aos 25 e 35 dias após a emergência, as plantas não apresentaram grandes diferenças entre as doses, no entanto, a última coleta (50 DAE), além de registrar as maiores alturas, resultou em maior diferença entre as médias, ou seja, somente após a segunda coleta (35 DAE), quando ultrapassou o estágio V7, a planta começou a responder aos tratamentos, com crescimento seguindo o aumento das doses. Contudo, houve uma redução de tamanho para o T5 (240 kg ha⁻¹) em todas as avaliações (Figuras 4.1A).

Na última avaliação da altura em específico, a dose 180 kg ha⁻¹ proporcionou maior crescimento das plantas (Figura 4.1A). De acordo com Okumura et al. (2011) o processo de crescimento das plantas depende do N para realização da síntese de proteína, absorção iônica, fotossíntese, respiração, multiplicação e diferenciação celular, proporcionando uma vegetação mais verde e abundante, com um bom desenvolvimento, principalmente com relação a altura da planta. Esta pesquisa evidencia a íntima relação do crescimento de plantas de milho com o suprimento nitrogenado. Segundo Prado (2008), o efeito positivo do nitrogênio para a altura está diretamente relacionado a função estrutural do mesmo, visto que este nutriente faz parte de enzimas e hormônios que contribuem para o crescimento das plantas.

O diâmetro registou diferença visível entre as médias desde a primeira coleta, com destaque para a dose de 180 kg ha⁻¹, que foi o tratamento que apresentou maior média (14,88 mm) na primeira avaliação (25 DAE). As demais avaliações de diâmetro (35 e 50 DAE), mostraram valores bem próximos entre os resultados de uma coleta (19,46; 20,66; 21,08; 20,32 e 20,44 mm) e a outra (20,80; 21,08; 22,04; 21,72 e 21,84 mm) para as doses de 0, 60, 120, 180 e 240 kg ha⁻¹, respectivamente, em que a planta se comportou de forma idêntica, com maiores médias (21,08 e 22,04 mm) registradas pela dose de 120 kg ha⁻¹ e redução do colmo a partir deste tratamento (Figura 4.1B).

As duas últimas coletas (35 e 50 DAE) ocorreram quando o milho se encontrava nos estádios V7 e V10, respectivamente. A proximidade das médias do diâmetro nas duas últimas avaliações pode ser associada ao fato de que o milho provavelmente está se preparando para os próximos estádios (florescimento e enchimento dos grãos). No início destas fases, acontece uma remobilização das reservas contidas no colmo para sustentar de maneira adequada e

sucessiva estes ciclos (REPKE et al., 2013). Castro et al. (2008) relata que a capacidade produtiva das plantas está também relacionada com sua capacidade em acumular e transferir carboidratos do colmo para a formação e o enchimento de grãos.

Assim como o diâmetro, os resultados das duas últimas avaliações de área foliar, foram bem próximos. As maiores médias (557, 607, 632, 599 e 604 cm²) para as doses de 0, 60, 120, 180 e 240 kg ha⁻¹, respectivamente, tais quais as demais variáveis, foram encontrados na terceira coleta (50 DAE). No decorrer das avaliações, a área foliar se manteve crescente com o aumento das doses, evidenciando o T3(120 kg ha⁻¹), que apresentou maiores médias, contudo, o tamanho da folha regrediu a partir deste tratamento, independente da época avaliada (Figuras 4.1C).

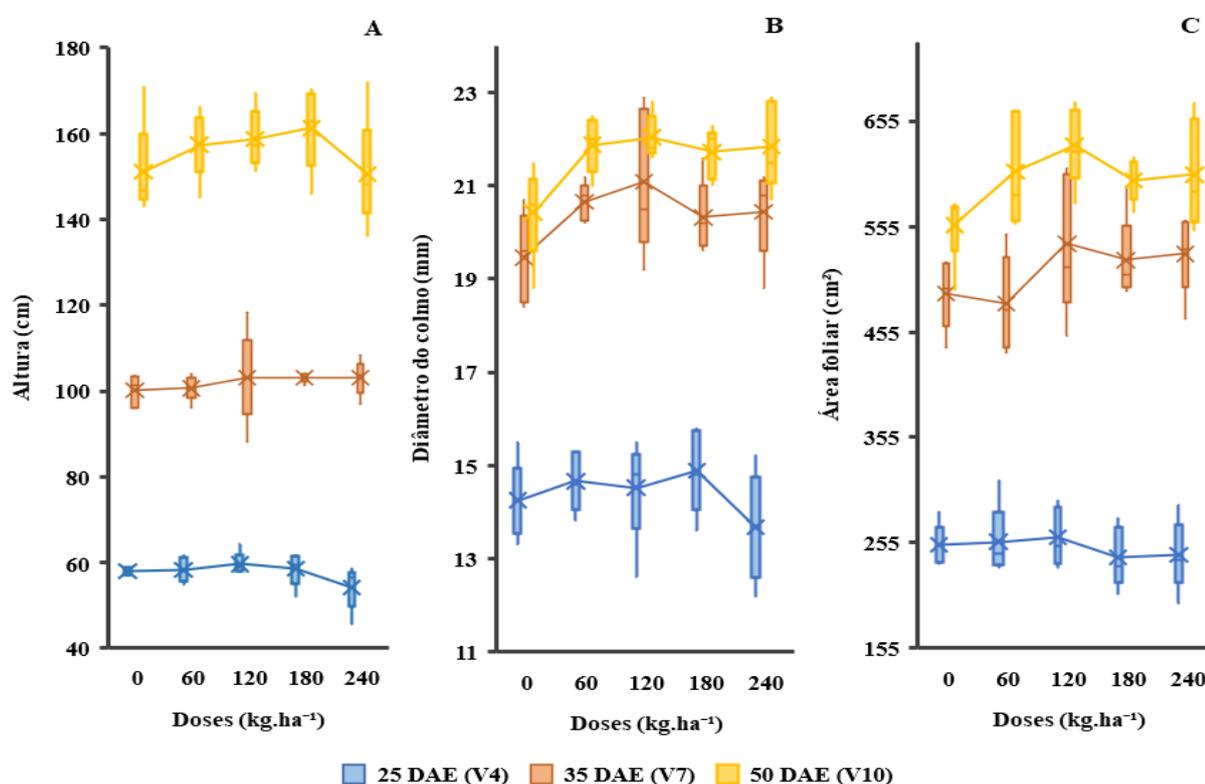


Figura 4.1. Gráficos boxplot da altura (A), diâmetro do colmo (B) e área foliar (C) coletados aos 25 DAE (V4), 35 DAE (V7) e 50 DAE (V10) em função das doses: 0, 60, 120, 180 e 240 kg ha⁻¹ de N.

De acordo com Repke et al. (2013), folhas bem nutridas de nitrogênio têm a maior capacidade de assimilar CO₂ e sintetizar carboidratos durante a fotossíntese, resultando em maior crescimento e desenvolvimento de área foliar. Ainda nesta perspectiva, os mesmos autores avaliando diversos parâmetros, incluindo altura, diâmetro do colmo e área foliar do milho em função de diferentes doses nitrogenadas encontraram os maiores valores destes aos 60 DAE (início do florescimento), período próximo a última coleta realizada neste estudo. No

entanto, com relação as doses, os resultados foram opostos, as maiores médias de diâmetro do colmo e área foliar, foram encontradas na maior dose adotada pelos autores (180 kg ha^{-1}), já a altura não apresentou diferença entre as médias para as maiores doses ($130, 155, \text{ e } 180 \text{ kg ha}^{-1}$) no mesmo período de avaliação.

Ainda com relação à altura, os resultados obtidos neste estudo corroboram com os encontrados por Khan et al. (2014) e Sousa (2020), em que ambos os autores obtiveram altura de planta superiores na cultura do milho quando aplicadas as doses de nitrogênio similar ao desta pesquisa (150 kg ha^{-1} e 160 kg ha^{-1} , respectivamente). Seguindo a mesma linha, El-Moursy et al. 2019 encontraram maiores médias das mesmas variáveis (altura, diâmetro do colmo e área foliar) com a dose 120 kg ha^{-1} . Contrapondo estas ideias, Braz et al. (2019) trabalhando com milho, obtiveram maior área foliar com sua maior dose de nitrogênio (210 kg ha^{-1}).

Segundo Wolschick et al. (2003) a deficiência de N acelera a senescência foliar, uma vez que a planta realiza o retranslocamento do nitrogênio da folha para os pontos de crescimento, diminuindo a área foliar fotossinteticamente ativa. Neste sentido, plantas com nenhum ou pouco N não realizam este processo de forma eficiente, fazendo com que as folhas entrem em senescência precocemente, influenciando no processo de produção de grãos, o que promove significativa queda no rendimento da cultura, principalmente pela redução do comprimento e diâmetro da espiga.

Este seguimento justifica bem os resultados demonstrados na Figura 4.2, em que a testemunha (0 kg ha^{-1}) apresentou as menores médias para o comprimento ($17,9 \text{ cm}$) e diâmetro da espiga ($5,0 \text{ mm}$), conseqüentemente gerando menor produtividade no mesmo tratamento. As características produtivas (comprimento e diâmetro da espiga e produtividade) se comportaram de forma similar, crescendo junto ao aumento das doses, exceto para o comprimento da espiga que apresentou redução na média para dose 120 kg ha^{-1} , quando comparada ao tratamento anterior (60 kg ha^{-1}). Entretanto, em ambos os parâmetros, o tratamento (180 kg ha^{-1}) registrou as maiores médias.

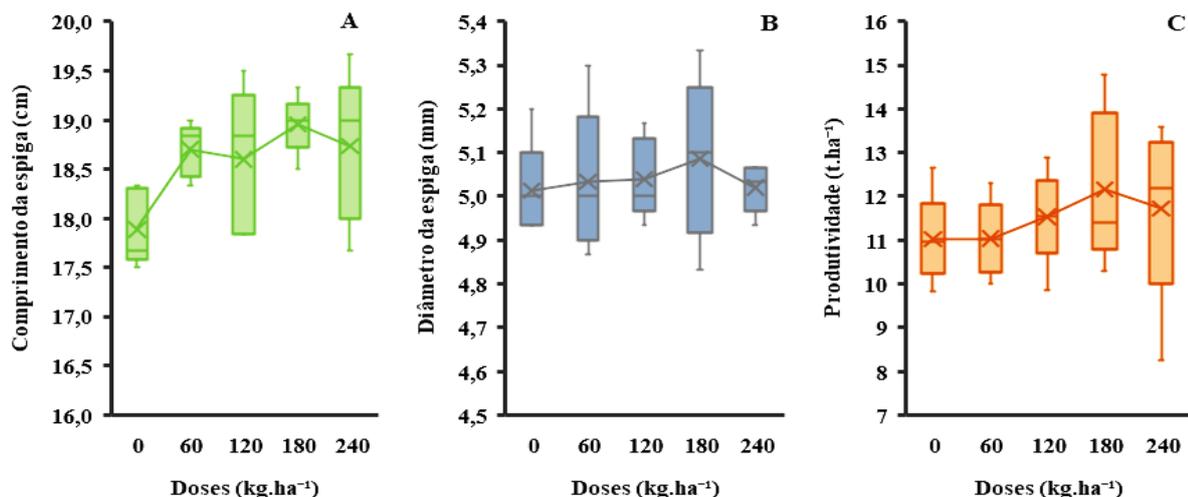


Figura 4.2. Gráficos boxplot do comprimento da espiga (A), diâmetro da espiga (B) e produtividade (C) do milho em função das doses: 0, 60, 120, 180 e 240 kg ha⁻¹ de N.

Outras pesquisas, avaliando a produtividade do milho com diferentes doses de nitrogênio, resultaram em produtividade de grãos aumentadas conforme foram elevadas as doses. No ensaio de Araújo et al. (2004), a dose de 240 kg ha⁻¹ não apresentou maior produtividade em relação as outras doses, mas, proporcionou um aumento de 28% na produtividade de grãos quando comparada ao tratamento testemunha, que recebeu a dose zero kg ha⁻¹. Amaral Filho et al. (2005) verificaram que o aumento nas doses de nitrogênio de zero kg ha⁻¹ para 150 kg ha⁻¹ gerou efeitos positivos na produtividade de grãos.

Shanahan et al. (2008) relatam que níveis ideais de nitrogênio atribuem influência significativa do N para estimular os caracteres de crescimento das plantas e conseqüentemente no rendimento de grãos. Tais relatos também são compatíveis com as de Seadh et al. (2013), Gruzka et al. (2016), Ali e Anjum (2017) e Abera et al. (2017).

É importante ressaltar que na testemunha (0 kg ha⁻¹), obteve-se aproximadamente 11 t ha⁻¹, produtividade considerada alta, uma vez que estas unidades experimentais não receberam adubo. Fato que pode está relacionado ao acúmulo de nitrogênio residual, advindas de adubações anteriores, visto que o experimento foi desenvolvido em área de sucessão de cultura (soja/milho), com incorporação da matéria orgânica. Schröder et al. (2007) constataram efeito positivo na produtividade de gramínea forrageira e que o efeito residual do N foi significativo. Contudo, não foi realizada análise química de solo neste estudo.

De forma geral, diante dos resultados biométricos, produtivos e dos resultados de estudos supracitados podemos visualizar a complexibilidade do nitrogênio na planta, visto que o T4 (180 kg ha⁻¹) não apresentou o melhor desempenho biométrico, contudo, este fator não influenciou no resultado final, em que a dose 180 kg ha⁻¹ gerou a maior média de

produtividade (12 t ha^{-1}). No entanto, os resultados da ANOVA mostraram que o teste aceitou a hipótese nula, não apresentando diferença ao nível de probabilidade de 5% ($p > 0,05$) em relação aos parâmetros biométricos (altura, diâmetro do colmo e área foliar) e produtivos (comprimento e largura da espiga e produtividade) em função das doses adotadas (0, 60, 120, 180 e 240 kg ha^{-1} de N).

4.2 Comportamento espectral das curvas

A figura 4.3 ilustra as curvas espectrais das folhas de milho nos 25, 35, 50 e 65 DAE, em função das diferentes doses de nitrogênio empregadas. Nota-se que as assinaturas espectrais se comportam de forma semelhante ao longo do espectro em todas as coletas. Nos gráficos é possível observar que com o decorrer do tempo, os comprimentos de onda correspondentes a região do visível (450-720nm) são as faixas mais sensíveis ao status nutricional (Figura 4.3 – B1, B2, B3 e B4). Isto por que esta região está relacionada com os pigmentos fotossintéticos, ou seja, a clorofila (MARTINS et al., 2020).

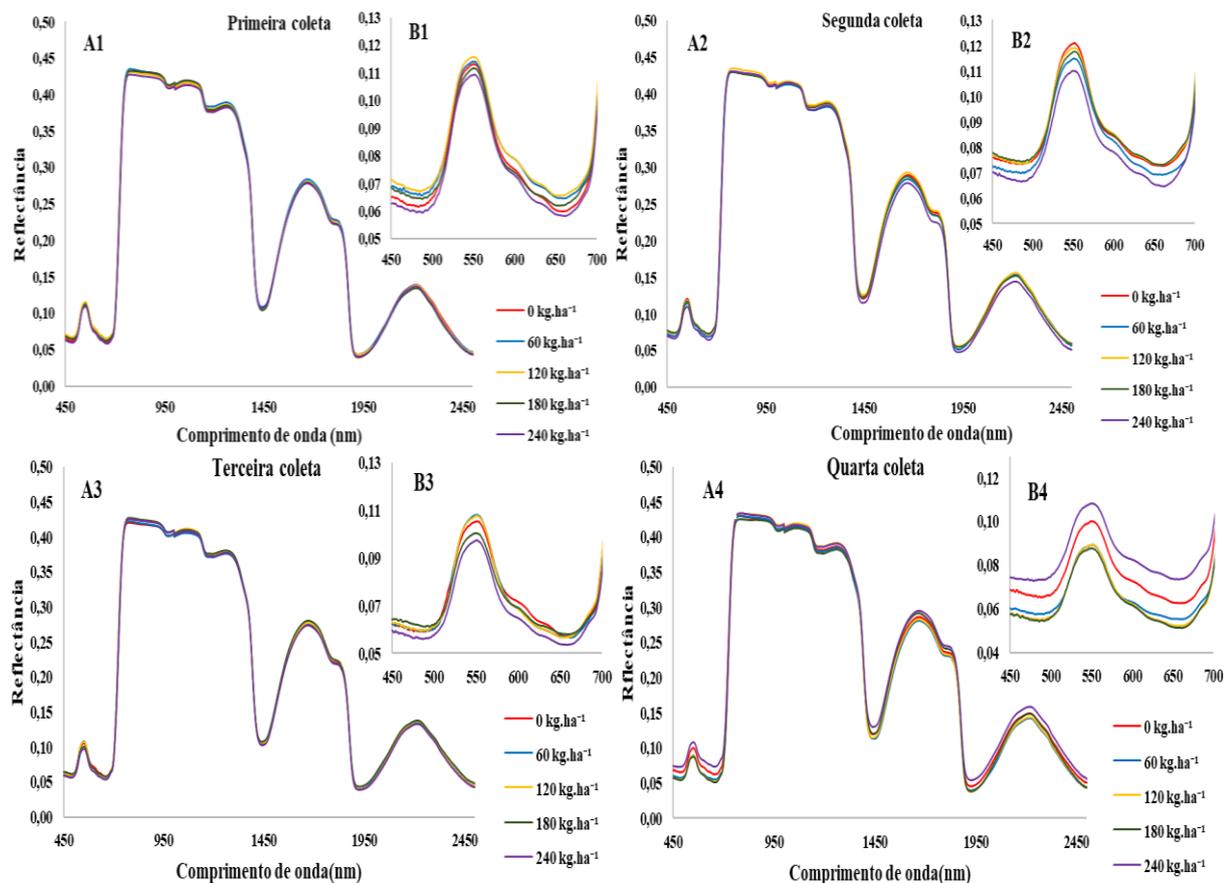


Figura 4.3. Curvas espectrais do milho nos comprimentos de onda 450 a 2500 (A) e região do visível (B) sob diferentes doses 0, 60, 120, 180 e 240 kg ha⁻¹ de N, referentes a primeira coleta, após a primeira e segunda adubação (25 DAE) (A1 e B1), segunda coleta, após a terceira adubação (35DAE) (A2 e B2), terceira coleta (50 DAE) (A3 e B3) e quarta coleta (65DAE) (A4 e B4).

Este resultado é descrito por Moreira (2011), onde o autor enfatiza que a pigmentação das folhas altera a resposta espectral das mesmas apenas na região do visível e que os pigmentos que mais regulam o comportamento espectral da vegetação são as clorofilas A e B. De acordo com Bronson et al. (2011) a clorofila apresenta boa relação com o status de N na planta, ao passo que este pigmento sofre alterações que demonstram a variação no teor de nitrogênio na cultura.

Moharana e Dutta, (2016) também expressam a relação positiva entre o conteúdo de nitrogênio e a clorofila. Apesar do conteúdo de nitrogênio na folha ser um parâmetro relacionado ao crescimento da planta, e o conteúdo de clorofila um indicativo da saúde de crescimento da planta; o conteúdo de nitrogênio foliar é um fator que influencia a atividade fotossintética, pois a presença de pigmentos depende das condições bioquímicas (SONOBE; SANO; HORIE, 2018).

Na região do infravermelho próximo (720 a 1100), para todas as coletas (Figura 4.3), a reflectância de ambas as doses aumenta, se mantendo entre os valores de 40 a 45%. Esses

comprimentos de onda estão relacionados a estrutura interna da folha. Estas características se devem ao fato de que a planta está ganhando biomassa em resposta a adubação nitrogenada. Segundo Li et al. (2016), este é um fator importante, pois essa grande diferença de absorção e reflectância ocorre para que a folha mantenha o equilíbrio no balanço de energia, não superaqueça e evite a desnutrição da clorofila.

A proximidade nas curvas espectrais das faixas do infravermelho próximo (720 a 1100 nm) para as todas as doses, independente da coleta, indicam também que a estrutura dos mesófilos não foi alterada pelos tratamentos (0, 60, 120, 180 e 240 kg ha⁻¹ de N). Gates et al. (1965) relatam que a reflectância das folhas nesta região é resultado da interação da energia incidente com a estrutura do mesófilo. O autor explica que essa estrutura pode ser modificada de acordo com as alterações na relação água-ar no mesófilo devido a disponibilidade de água, alterando desta forma a reflectância foliar. Além disso, quanto mais lacunosa for a estrutura interna foliar, maior será o espalhamento interno da radiação incidente, consequentemente, maior reflectância.

Os comprimentos de onda correspondentes ao infravermelho médio (1100-2500), apresentam picos de absorção próximos a 1450 e 1950 nm, característica relacionada a presença de água na folha. Autores como Jong et al. (2014); Fang et al. (2017); Rodriguaz-Perez et al. (2018) defendem que o teor de água na planta gera absorção da reflectância principalmente nestas faixas do infravermelho médio. Ou seja, a absorção das curvas nos comprimentos de onda 1450 e 1950 nm, indicam que as plantas de milho não deram indícios exorbitantes de estresse hídrico (Figura 4.3).

Nas três primeiras coletas (25, 35 e 50 DAE), as curvas se mostram com comportamento semelhante na região do visível (450 a 720 nm). Sendo a primeira com maior reflectância para ambas as doses, isto se deve ao fato de que esta coleta ocorreu aos vinte e cinco dias após a emergência, quando o milho se encontrava no estágio V4. Neste momento, todas as plantas estavam com a mesma variação de N, visto que ainda não haviam recebido as doses totais de nitrogênio determinados - com exceção da testemunha que não recebe N, ou seja, não havia doses em excesso ou ideal, o que consequentemente, resultou em uma maior reflectância nesta região do espectro, para todas as doses, principalmente na faixa do verde, próximo de 550nm (Figura 4.3 – B1).

A segunda e a terceira coleta que ocorreram aos 35 DAE e 50 DAE, respectivamente, ilustram diferenças sutis entre as curvas, com redução de reflectância de acordo com o aumento das doses, contudo, as plantas com baixo teor de nitrogênio apresentaram estresse nutricional, consequentemente, gerando maior reflectância, permanecendo no topo do gráfico

(Figura 4.3 – B2 e B3). Já a última coleta (65 DAE), as maiores reflectâncias foram registradas pelos tratamentos extremos, ou seja, a maior e a menor dose. O que pode ser relacionado com a deficiência nutricional na testemunha (0 kg ha⁻¹) e provavelmente com a possível toxidez pelo excesso (240 kg ha⁻¹) (Figura 4.3 – B4).

Conforme Ponzoni et al. (2012), a reflectância na região do visível de folhas quando submetidas a efeitos de estresse, tais como doença, problemas fisiológicos, nutricionais e condições ambientais adversas, apresentam-se maior do que em folhas saudáveis. Segundo Hoffer (1978), a produção de clorofila é reduzida quando a planta está sob estresse, reduzindo também, absorção de radiação eletromagnética (REM), elevando assim a reflectância nas regiões do verde e vermelho do espectro.

Na região do infravermelho médio, na última coleta (65 DAE), houve uma ligeira diferença entre as curvas, sendo as doses 0 e 240 kg ha⁻¹, as que apresentaram maior reflectância. Como já mencionado, esta região do espectro se relaciona com o conteúdo de água na planta. Uma vez que a folha é removida da planta, esta começa a perder água. A dissecação da folha resulta na diminuição de turgidez que pode afetar a superfície e formato da folha. (JUNEAU e TARASOFF, 2012). Além disso, a energia nesses comprimentos de onda (720 a 1100 nm) interage com o OH das moléculas de água, causando um efeito vibracional. O efeito absorve a energia desse comprimento de onda, não reflete. Sem reflexão, ocorre o recurso de absorção (MARTINS et al., 2020).

Estes dados estão de acordo com o trabalho de Blackmer et al. (1996) em que a detecção de N foi melhor evidenciada na região de comprimento de onda centrada em 550 nm. Além disso, segundo Fonseca et al. (2002) em sua pesquisa com *Paspalum Notatum*, notaram que com o aumento da biomassa, devido ao acréscimo das doses de N, ocorreu redução da reflectância no espectro visível, que também foram similares aos experimentos com arroz, trigo e milho, em que a medida que aumenta os níveis de N aplicados, ocorre a diminuição da reflectância na porção visível do espectro (PATEL et al., 1985; FERNÁNDEZ et al., 1994; BLACKMER et al., 1996; MA et al., 1996).

Os resultados corroboram também com os encontrados com Gitelson et al. (2002), o autor reafirma que a região que apresenta forte relação com os níveis de clorofila e nitrogênio é a de 550 nm (verde), e esta faixa do espectro apresentou diferenças crescentes ao longo de suas coletas. Como já explanado, o formato do espectro na região do visível está associado com os níveis de clorofila, carotenoides e antocianinas. Assim, quanto maior o teor de nitrogênio foliar, maior será a presença de pigmentos e, conseqüentemente, haverá maior absorção da radiação e menor reflectância (SIMS e GAMON, 2002), justificando os

resultados aqui demonstrados, exceto para a dose mais alta (240 kg ha^{-1}), onde a planta respondeu com aumento da reflectância.

A importância do nitrogênio para o milho diz respeito ao seu metabolismo fotossintético, caracterizado pela eficiência na utilização do nitrogênio, da energia solar, e na produção de fotoassimilados. Como o nitrogênio é parte constituinte de várias moléculas, dentre elas a clorofila, participa direta ou indiretamente de vários processos bioquímicos, refletindo diretamente no desenvolvimento e rendimento da cultura (KANT; BI; ROTHSTEIN, 2011).

Esses resultados se assemelham ao estudo que diz que o padrão de mudança da refletância espectral pode separar efetivamente os tratamentos em níveis através das características da região do visível, servindo como ferramenta para a construção de relações quantitativas entre as respostas espectrais e o conteúdo de nitrogênio foliar (LI et al., 2016). De modo geral, observa-se que a dose de 180 kg ha^{-1} foi a que melhor respondeu a análise espectral, sendo esta melhor demonstrada na última coleta que ocorreu aos sessenta e cinco dias após a emergência.

É possível observar ainda, que dados hiperespectrais além de serem sensíveis ao nitrogênio também podem indicar se a planta está absorvendo o fertilizante. Visto que, na terceira coleta o milho já havia recebido o total de adubação (Figura 4.3 – A3, B3), mas, não demonstrou grandes diferenças entre as doses, principalmente na região do visível (Figura 4.3 – B3), indicando que naquele momento (50 DAE), a planta ainda não havia absorvido o nitrogênio aplicado, fato que pode estar relacionado a fatores externo, como por exemplo, a falta de chuva. Falar sobre a ureia

De acordo com os dados do Posto Meteorológico da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (Esalq/USP), conforme os registros, o ano de 2021 acumulou 934 mm, considerado abaixo da média e menor do que os registrados nos anos anteriores (GIANTOMASO, 2022). Somente na quarta coleta (Figura 4.3 – A4, B4) a planta respondeu melhor as doses aplicadas aplicadas, sugerindo que naquele momento (65 DAE), o milho absorveu o adubo.

4.3 Análise de Componentes Principais (PCA)

As componentes principais (CPs) 1, 2 e 3 representaram pelo menos 95% da variação, em que a CP1 correspondeu a 60,5%, 77,6%, 68,8% e 74,4%; seguida pela CP2 com 25,9%, 15,7%, 21,2% e 16,6% e a CP3 com 9,21%, 4,04%, 6,47% e 4,06% para a primeira, segunda, terceira e quarta coleta, respectivamente (Figura 4.4).

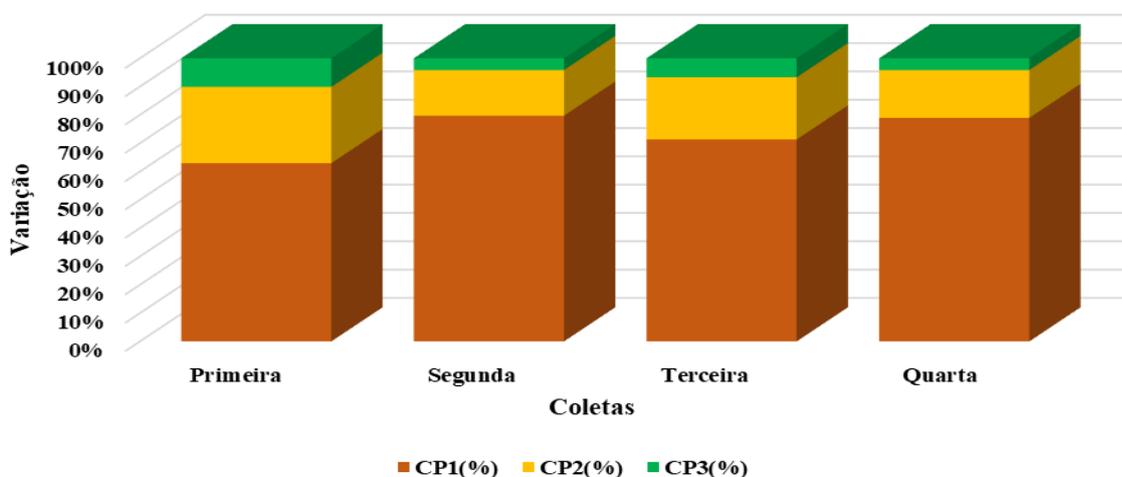


Figura 4.4. Variância das componentes principais 1, 2 e 3.

Esta variabilidade corrobora com Yang et al, (2016). Os autores, avaliando o espectro do arroz em diferentes estádios e sob diferentes doses nitrogenadas encontraram variação similar à esta pesquisa, em que a variância dos dados foi melhor representada por 3 CPs, componentes 1 (81,49%) e (85,59%), 2 (11,35) e (5,96%) e, 3 (2,92%) e (1,98%) na fase de perfilhamento e fase de colheita, respectivamente.

Nas figuras 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8 estão apresentados os gráficos de dispersão dos *scores* e o comportamento dos *loadings* nas componentes 1, 2 e 3 obtidos das curvas espectrais, para as 4 coletas realizadas. Na primeira coleta, visualmente, é possível observar que, individualmente, não houve agrupamento de doses, assim como não houve a separação de nenhum grupo, ou seja, existe apenas um espalhamento de ambos os materiais, com sobreposição dos tratamentos (Figura 4.5A). Os *loadings* das CPs 1, 2 e 3 tiveram suas maiores contribuições em bandas diferentes no espectro em todas as coletas (Figuras 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8). Na primeira coleta, os *loadings* da CP1 apresentaram influência em todo o espectro, evidenciando principalmente a região do infravermelho médio (1350 – 2500 nm) (Figura 4.5B).

Já a CP2 apresentou maior peso na região do infravermelho próximo (720 – 1100 nm) e início do infravermelho médio (1100 – 1280 nm), com picos de 760 a 900 nm e na faixa próximo de 1080 nm. Houve ainda um pico menos expressivo em 1260 nm e vales em 950 e 1170 nm, aproximadamente. Ocorreu também uma influência pouco expressiva dos *loadings* da CP2 na região do infravermelho médio (1100 – 2500), com picos ao redor das faixas de 1450, 1860 e 2100 nm. Na CP3, os *loadings* de maior influência ocorreram na região do visível (450 – 720 nm), com picos próximo de 500, 600 e 700 nm e vales ao redor de 480, 550

e 670 nm. As faixas de menor influência estão presentes no infravermelho médio (1350 – 2500 nm), com picos em 1350, 1650, 1930 e 2500 nm (Figura 4.5B).

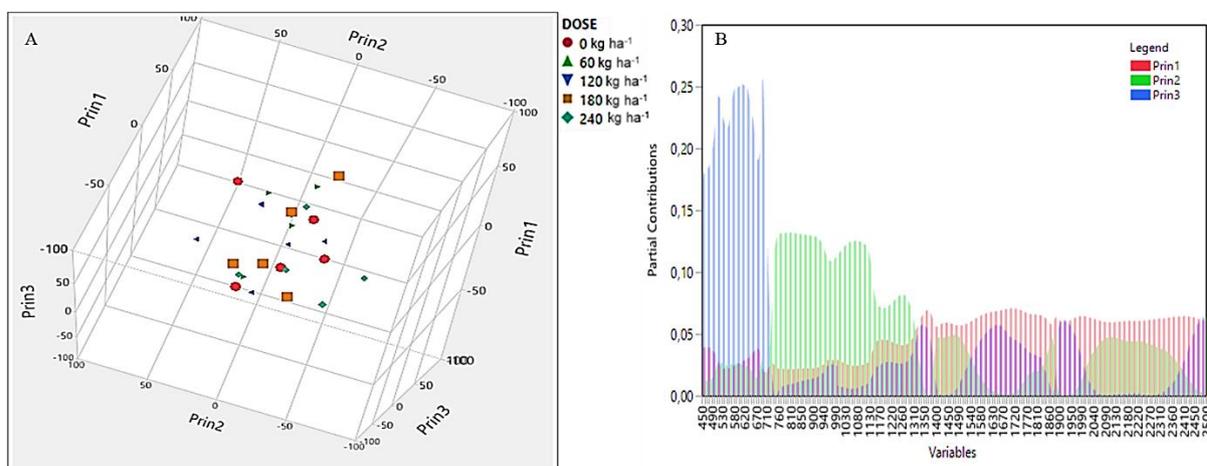


Figura 4.5. Análise de Componentes Principais com gráfico de dispersão dos scores (A) e comportamento dos loadings (B) para as componentes 1, 2 e 3 sob as diferentes doses: 0, 60, 120, 180 e 240 kg ha⁻¹ de N, referentes a primeira coleta (25 DAE).

No gráfico de *scores* da segunda coleta (Figura 4.6A) se mantém o espalhamento da maioria dos materiais, sem formações ou separações de grupos, exceto por uma tendência de separação das dose de 240 kg ha⁻¹ e 0 kg ha⁻¹, ao mesmo tempo que se observa um leve agrupamento da dose de 240 kg ha⁻¹. Os *loadings* da segunda coleta mostraram que a CP1 (Figura 4.6B) apresentou contribuições bem próximas em todas as faixas do espectro, quase que sem diferenças.

A CP2, se comportou semelhante a primeira coleta com maior peso na região do infravermelho próximo (720 – 1100 nm) e início do infravermelho médio (1100 – 1280 nm), com picos (760 a 900, 1080 e 1260 nm) e vales (950 e 1170 nm) nas mesmas regiões. Além dos picos pouco expressivos ao redor das faixas de 1450, 2040 e 2360 nm. Na CP3, os *loadings* apresentaram picos em 550 nm (verde) e 710 nm (red-edge) e vales próximos de 480 e 670 nm. As faixas de menor influência estão presentes no infravermelho médio (1350 – 2500 nm), com picos em 1350, 1540 e 1850 nm (Figura 4.6B).

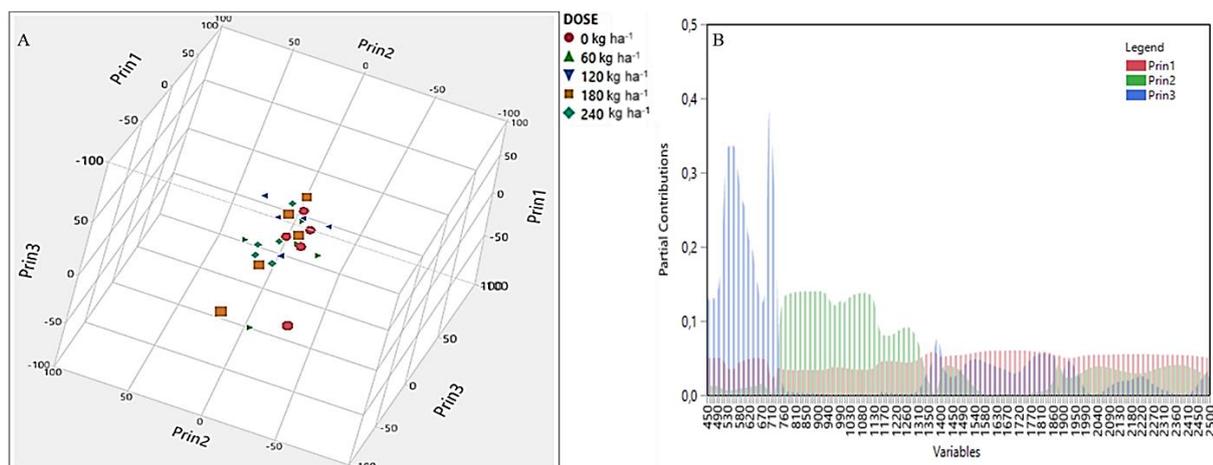


Figura 4.6. Análise de Componentes Principais com gráfico de dispersão dos scores (A) e comportamento dos loadings (B) para as componentes 1, 2 e 3 sob as diferentes doses: 0, 60, 120, 180 e 240 kg ha⁻¹ de N, referentes a primeira coleta (35 DAE).

Na terceira coleta, o gráfico de *scores* ilustra uma separação mais visível entre os dois primeiros tratamentos (0 e 60 kg ha⁻¹) das demais doses (120, 180 e 240 kg ha⁻¹), é possível observar ainda, um incentivo de agrupamento da dose de 60 kg ha⁻¹ (Figura 4.7A). Os *loadings* da CP1 na terceira coleta se mostraram similares a segunda coleta, quase que sem diferenças ao longo do espectro. A CP2, tal qual as coletas anteriores, com maior peso na região do infravermelho próximo (720 – 1100 nm) e início do infravermelho médio (1100 – 1280 nm), com picos (760 a 900, 1080 e 1260 nm) e vales (950 e 1170 nm) nas mesmas regiões. Além dos picos pouco expressivos ao redor das faixas de 1450, 2090 e 2310 nm (Figura 4.7B).

Na CP3, os *loadings* se mostraram iguais a coleta anterior com picos em 550 nm (verde) e 710 nm (red-edge) e vales próximos de 480 e 670 nm. As faixas de menor influência foram identificadas no infravermelho médio (1350 – 2500 nm), com picos em 1350, 1540 e 1850 nm (Figura 4.7B).

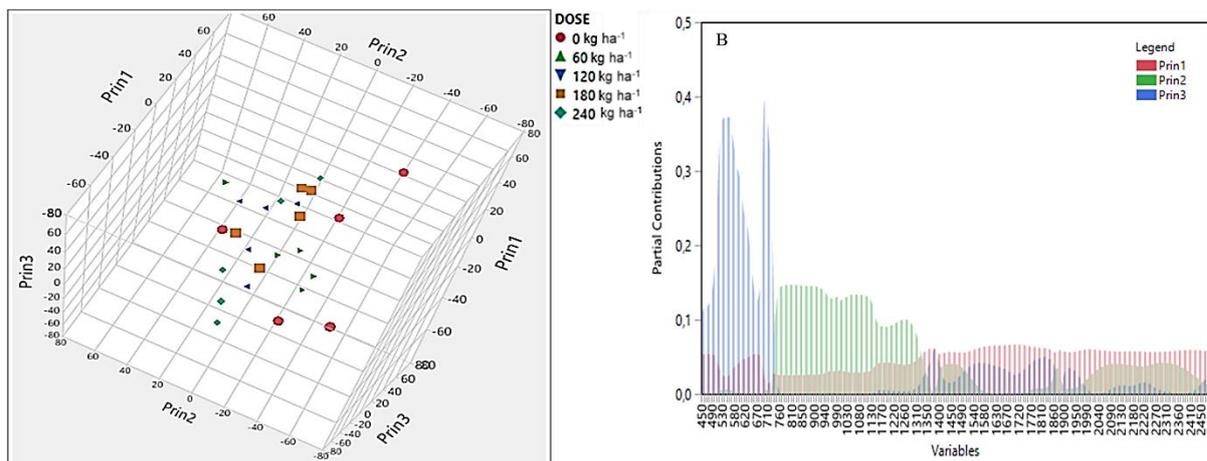


Figura 1.7. Análise de Componentes Principais com gráfico de dispersão dos scores (A) e comportamento dos loadings (B) para as componentes 1, 2 e 3 sob as diferentes doses: 0, 60, 120, 180 e 240 kg ha⁻¹ de N, referentes a primeira coleta (50 DAE).

Já os *scores* da quarta e última coleta, assim como na primeira, houve um maior espalhamento e sobreposição dos materiais. Apenas a dose de 60 kg ha⁻¹ demonstrou maior tendência de agrupamento, tal qual a terceira coleta, no entanto, não houve agrupamento das demais doses entre si (Figura 4.8A). Os *loadings* da quarta coleta na CP1, demonstraram peso em todo o espectro, evidenciando principalmente a região do infravermelho médio (1350 – 2500 nm), tal qual a primeira coleta (Figura 4.8B).

Na CP2, ocorreu semelhança com as demais coletas com maior peso na região do infravermelho próximo (720 – 1100 nm) e início do infravermelho médio (1100 – 1280 nm), com picos (760 a 900, 1080 e 1260 nm) e vales (950 e 1170 nm) nas mesmas regiões. Além dos picos pouco expressivos ao redor das faixas de 1450, 2090 e 2310 nm. E na CP3, a influência da região do visível apresentou picos em 490 e 700 nm, e um vale bem centrado em 550 nm. Ocorreu também *loadings* de menor influência no infravermelho médio (1350 – 2500 nm), com picos em 1350, 1540, 1800, 1950, 2000 e 2250 nm (Figura 4.8B).

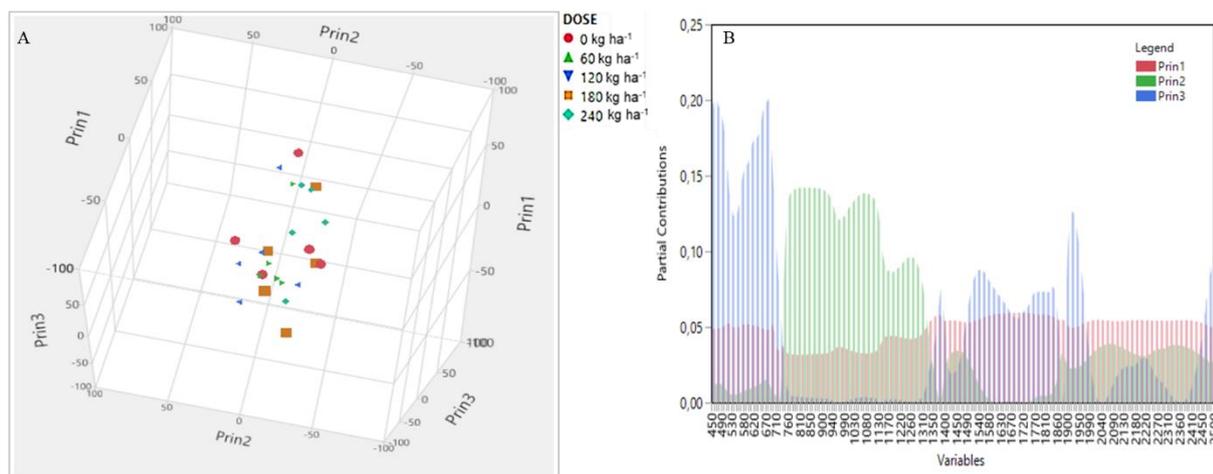


Figura 4.8. Análise de Componentes Principais com gráfico de dispersão dos scores (A) e comportamento dos loadings (B) para as componentes 1, 2 e 3 sob as diferentes doses: 0, 60, 120, 180 e 240 kg ha⁻¹ de N, referentes a primeira coleta (65 DAE).

Nas quatro coletas realizadas, a CP1 apresentou influência em todo o espectro com intensidades próximas com destaque para região do Infravermelho Médio, onde houve maior contribuição, indicando que esta faixa do espectro pode está indiretamente relacionada com o teor de nitrogênio. Nas componentes 2 e 3, observa-se que a região do visível e infravermelho próximo foram as regiões de maior peso no resultado do gráfico de *scores* no decorrer das coletas, isto por que o nitrogênio está diretamente ligado ao teor de clorofila na folha e desenvolvimento da planta em resposta a adubação nitrogenada.

Além disso, observou-se também que na primeira e quarta coleta houve a presença de um vale, na CP3 no visível, ao redor de 550 nm, mesmo que menos expressivo na primeira coleta. Fato que pode ter influenciado na separção dos tratamentos (maiores e menores doses) visto que estas coletas foram as que apresentaram maior espalhamento e sobreposição dos materiais.

Resultados considerados compreensivos, visto que a primeira análise foi realizada aos 25 DAE, neste período como já mencionado, a planta de milho ainda estava por receber o total de adubação determinadas e se encontrava em um estágio de desenvolvimento (V4) que não permitia demonstrar diferenças entre os tratamentos. Já o resultado da segunda análise pode ser associado ao estado de estresse da planta, uma vez que esta coleta foi realizada aos 35 DAE, neste período o milho já havia recebido todo o nitrogênio definido, e a plantas passavam a sofrer estresse pela falta ou toxidade pelo excesso do adubo.

A terceira coleta apresentou melhor resultado de separação entre as maiores e menores doses que as anteriores, mesmo não demonstrando agrupamento satisfatório para os tratamentos. Enquanto que a quarta análise se assemelhou a primeira. Fato que pode estar

associado com o período de coleta que ocorreu aos 65 DAE, nesse momento o milho já iniciara o estágio reprodutivo e todo o metabolismo que antes se concentrava para desenvolvimento da planta, agora começava a se direcionar para desenvolvimento do grão.

Elmetwalli et al. (2020), relatam que em seus resultados avaliando o nitrogênio no milho ao longo do crescimento, a PCA não mostrou diferença nos estádios iniciais de crescimento, apenas a época de floração apresentou melhor variabilidade. Os autores argumentaram ainda que os espectros nas regiões do visível e infravermelho próximo apresentaram maior importância na correlação. Resultados similares ao deste estudo, onde os estádios iniciais não apresentaram agrupamento, apenas nas duas últimas coletas houve melhor interação. Assim como as mesmas faixas no espectro apresentaram maior importância.

4.4 Predição do teor de nitrogênio por Análise de Regressão por Mínimos Quadrados Parciais (PLSR)

De acordo com o resultado da regressão demonstrados na figura 4.9, observa-se que na primeira coleta o R^2 correspondeu a 0,62, valor considerado razoável, enquanto que o RMSE correspondeu a 1,44 g kg⁻¹ (Figura 4.9 - A1), justificando os resultados das assinaturas espectrais nesta coleta, onde não houve diferença entre as curvas. Observa-se também que os comprimentos de onda no visível, com pico ao redor do verde (550 nm) e borda do vermelho (por volta de 710 nm) apresentaram maiores valores dos coeficientes, 1,7 e 2,6 aproximadamente (Figura 4.9 – A2).

Na segunda coleta, o visível não apresentou grandes influências na predição, apenas a borda do vermelho (red-edge), infravermelho próximo (750 – 800 nm) e início do infravermelho médio, de 1150 a 1275 nm (Figura 14 – B2), o que gerou queda no R^2 e no RMSE para 0,56 g kg⁻¹ e 1,13, respectivamente (Figura 4.9 – B1), uma predição considerada razoável.

A regressão na terceira coleta, assim como na primeira, apresentou maior influência na borda do vermelho, gerando aumento no R^2 para 0,70 e RMSE para 1,76 g kg⁻¹, resultando em uma melhora na predição do teor de nitrogênio, quando comparada a coleta anterior, portanto, este coeficiente de determinação é considerado bom. Já a quarta coleta gerou maior valor de R^2 correspondendo a 0,93 e RMSE de 0,85 g kg⁻¹. De acordo com Saeys et al. (2005), valores de R^2 acima de 0,86 indicam modelos quantitativos de predição excelentes.

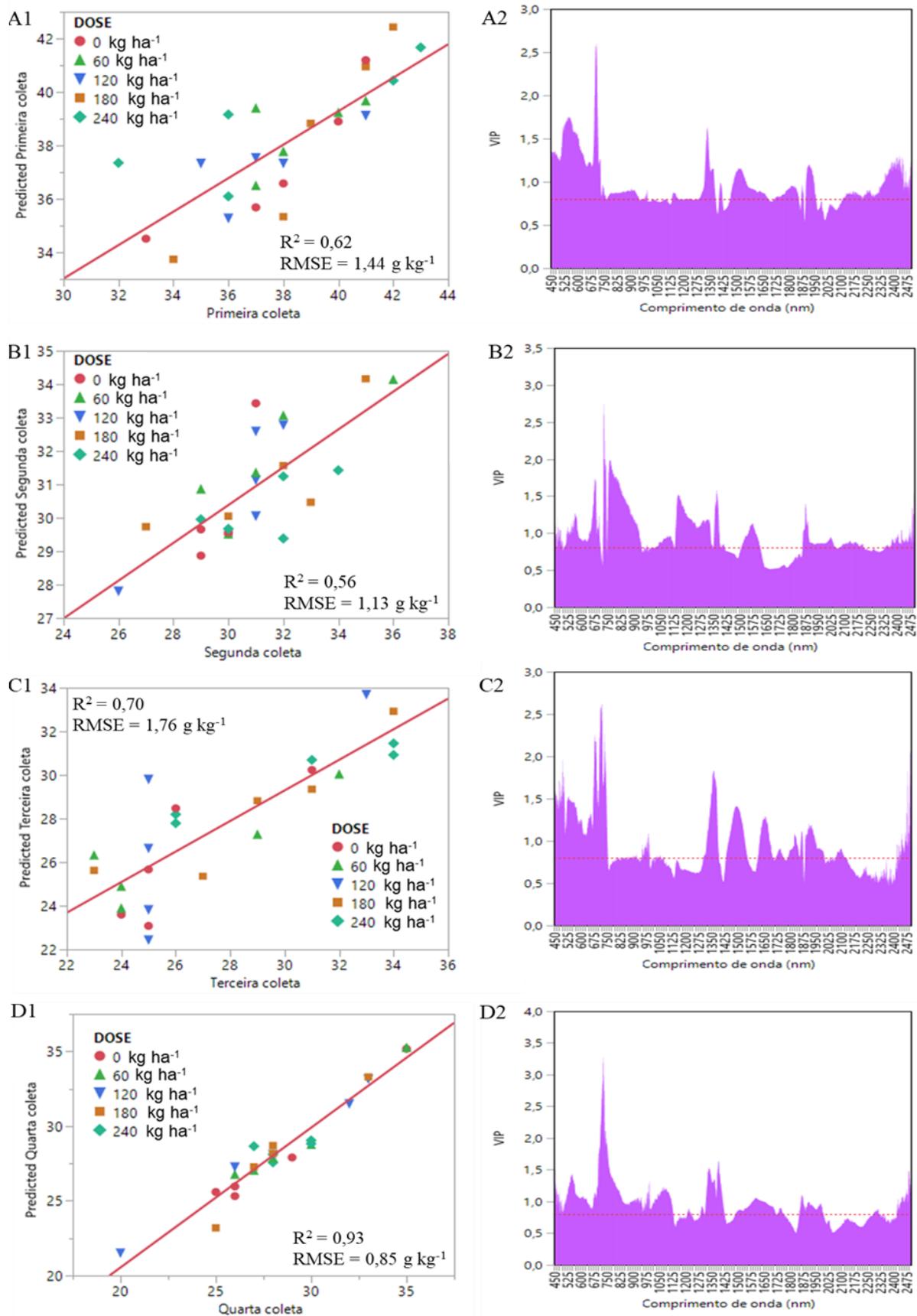


Figura 4.9. Regressão por Mínimos Quadrados Parciais para estimar o teor de nitrogênio foliar do milho, na primeira coleta (A1, A2), segunda coleta (B1, B2), terceira coleta (C1, C2) e quarta coleta (D1, D2) com R²: coeficiente de determinação e RMSE: erro quadrático médio em g kg⁻¹.

Como apresentado acima, as coletas 1, 2 e 3 se revelaram desfavoráveis na construção de um modelo que permita realizar a predição do conteúdo de nitrogênio nas folhas de milho. Apesar de serem consideradas razoável e boa, respectivamente. No entanto, a quarta coleta indicou melhor eficácia na predição do nitrogênio foliar, uma vez que apresentou maior valor de R^2 (0,93) e menor RMSE (0,85 g kg⁻¹). É possível observar ainda a importância das faixas do red-edge e região do visível na geração do modelo, uma vez que estas foram as faixas do espectro que geraram maior influência ao longo das coletas. Fato que pode ser bem observado, na segunda coleta, em que o peso do red-edge e do visível apresentou menor coeficiente em comparação as demais coletas, gerando menor valor de R^2 (0,56) e RMSE (1,13 g kg⁻¹).

Sabzi et al, (2021) concluíram que o modelo de regressão PLSR foi preciso e eficiente na predição da quantidade de nitrogênio presente em folhas de pepino com R^2 de 0,99. Li et al, (2014) estimando o teor de nitrogênio no trigo, através do PLSR, relataram que o método produziu uma precisão preditiva significativa, independente do estágio de crescimento e adubação da planta. Enquanto que neste estudo, apenas a última coleta gerou melhor predição.

Yuan et al, (2016) também utilizando PLSR na predição de nitrogênio no milho em diferentes estádios bem como diferentes adubações obtiveram parâmetros estatísticos robustos que revelaram a estabilidade e a confiabilidade da espectroscopia de reflectância com a análise PLSR. Ainda nesta perspectiva, Wang et al, (2017) utilizando de medições espectrais no visível e infravermelho próximo realizando a determinação não destrutiva de nitrogênio em folhas de pera com aplicação de diferentes doses nitrogenadas encontraram valor de coeficiente de determinação (R^2) de 0,85 no PLSR.

De modo geral, os resultados deste estudo podem ser considerados positivos para a escolha do melhor período para predição do nitrogênio em plantas de milho, sendo considerado o estágio próximo ao início da reprodução, que ocorreu na quarta coleta (65 DAE). Fica evidente ainda, a importância da utilização de dados de sensoriamento remoto hiperespectral oriundos de plantas de milho, no desenvolvimento de modelos preditivos para estimar nitrogênio foliar, visto que por meio das assinaturas espectrais na predição possibilitaram uma predição considerada excelente, permitindo melhorar o manejo de nitrogênio em lavouras de milho, interferindo positivamente na tomada de decisão e consequentemente, aumento a produtividade.

5. CONCLUSÃO

O milho apresentou diferenças no desenvolvimento em resposta as diferentes doses aplicas tanto biometricamente, quando espectralmente, embora a biometria não tenha apresentado significância. A análise de componentes principais (PCA) indicou que os comprimentos de onda que demonstraram maior correlação com o teor de nitrogênio foram na faixa do visível (450 – 700) e infravermelho próximo (700 – 1100). Contudo, não houve um bom agrupamento ou separação das doses entre si. Na predição, o PLSR demonstrou melhor poder de predição aos 65 DAE, com a R² de 0, e RMSE de 0,85 g kg⁻¹.

REFERÊNCIAS

- ABERA T, DEBELE T, WEGARY D. Effects of varieties and nitrogen fertilizer on yield and yield components of maize on farmers field in mid altitude areas of Western Ethiopia. **International Journal of Agronomy**, ID 4253917, p 13, 2017.
- ALI, N. e ANJUM, M. M. 2017. Effect of different nitrogen rates on growth, yield and quality of maize. **Middle East Journal of Agriculture Research**, v.6, n.1, p.107-112, 2017.
- ALVES, B. M.; CARGNELUTTI FILHO, A.; TOEBE, C. B. M.; TOEBE, M.; SILVA, L. P. Divergência genética de milho transgênico em relação à produtividade de grãos e da qualidade nutricional. **Ciência Rural**, Santa Maria v.45, n.5, p.884-891, 2015.
- AMARAL FILHO, J. P. R.; FORNASIERI FILHO, D.; FARINELLI, R.; BARBOSA, J. C. Espaçamento, densidade populacional e adubação nitrogenada na cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, n.3, p.467-473, 2005.
- AMARAL, L. R. e MOLIN, J. P. The effectiveness of three vegetation indices obtained from a canopy sensor in identifying sugarcane response to nitrogen. **Agronomy Journal**, v.106, p.273-280, 2014.
- ANDRADE, R.; HOTT, M.; de MAGALHAES JUNIOR, W. C. P.; OLIVEIRA, P. D.; OLIVEIRA, J. Uso de veículo aéreo não tripulado (VANT) como plataforma para monitoramento da produção agropecuária: estudo de caso para o milho forrageiro. **Embrapa Gado de Leite-Documents (INFOTECA-E)**, 2019.
- ARAÚJO, L. A. N.; FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. Adubação nitrogenada na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, n.8, p.771-777, 2004.
- ANALYTICAL SPECTRAL DEVICES (ASD). Manual do Usuário do FieldSpec[®] 3, Documento ASD 600540 Rev. F; **Analytical Spectral Devices**, Inc.: Boulder, CO, EUA, 2010.
- ASNER, G. P. e MARTIN, R. E. Spectral and chemical analysis of tropical forests: Scaling from leaf to canopy levels. **Remote Sensing of Environment**, v.112, p.3958-3970, 2008.
- BABAR, M. A., REYNOLDS, M. P., VAN GINKEL, M., KLATT, A. R., RAUN, W. R., & STONE, M. L. Spectral reflectance to estimate genetic variation for in-season biomass, leaf chlorophyll, and canopy temperature in wheat. **Crop science**, v.46, n.3, p.1046-1057, 2006.
- BARAVIERA, C. M. C.; CANEPELLE, C.; DOURADO, L. G. A.; AGUERO, N. F. Avaliação de propriedades físicas de grãos de híbridos de milho. **Enciclopédia Biosfera**, v.10, n.19, p.291-297, 2014.
- BERGAMASCHI, H. e MATZENAUER, R. **O milho e o clima**. Porto Alegre: Emater/RSAscar, v.84, p.85, 2014.
- BLACKMER, T.; SCHEPERS, J.S.; VARVEL, G.E. et al. Nitrogen Deficiency detection using reflected short-wave radiation from irrigated corn canopies. **Agronomy Journal**, v.88, p.1-5, 1996.

BRANDÃO, Z. N. **Estimativa da produtividade e estado nutricional da cultura do algodão irrigado via técnicas de sensoriamento remoto**. 2009. 152f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais. UFCG, Campina Grande-PB, 2009.

BRONSON, K.F. e BOOKER, J.D. et al. Canopy reflectance-based Nitrogen Management Strategies for Subsurface Drip Irrigated Cotton in the Texas High Plains. **Agronomy Journal**, v.103, p.422-430. 2011.

CAIRES, E. F.; HALISKI, A.; BINI, A. R.; SCHARR, D. A. Surface liming and nitrogen fertilization for crop grain production under no-till management in Brazil. **European Journal of Agronomy**, v.66, p.41-53, 2015.

CALDARELLI, C. E. & BACCHI, M. R. P. Fatores de influência no preço do milho no Brasil. **Nova Economia Belo Horizonte**, v.22, n.1, p.141-164, 2012.

CAMMARANO, D.; FITZGERALD, G.; CASA, R.; BASSO, B. Assessing the robustness of vegetation index to estimate wheat N in Mediterranean environments. **Remote Sensing**, v.6, p.2827–2844, 2014.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). Fertilidade do solo. Viçosa: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2007. p.375-470.

CARMO, M. S.; CRUZ, S. C. S.; SOUZA, E. J.; CAMPOS, L. F. C.; MACHADO, C. G. Doses e fontes de nitrogênio no desenvolvimento e produtividade da cultura de milho doce (*Zea mays* convar. *saccharata* var. *rugosa*). **Biosciencie Journal, Uberlândia**, v.28, n.1, p.223-231, 2012.

CARVALHO, S.; SCHLERF, M.; VAN DER PUTTEN, W. H.; SKIDMORE, A. K. Hyperspectral reflectance of leaves and flowers of an outbreak species discriminates season and successional stage of vegetation. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.24, p.32-41, 2013.

CASTRO, P. R. C.; KLUGE, R. A.; SESTARI, I. **Manual de fisiologia vegetal: fisiologia de cultivos**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2008. 864 p.

CHEN, P.; HABOUDANE, D.; TREMBLAY, N.; WANG, J.; VIGNEAULT, P.; LI, B. New spectral indicator assessing the efficiency of crop nitrogen treatment in corn and wheat. **Remote Sensing of Environment**, v.114, p.1987–1997, 2010.

CHEN, G.Y.; YONG, Z. H.; LIAO, Y.; ZHANG, D. Y.; CHEN, Y.; ZHANG, H. B.; CHEN, J.; ZHU, J. G.; XU, D. Q. Photosynthetic acclimation in rice leaves to free-air CO₂ enrichment related to both ribulose-1,5-bisphosphate carboxylation limitation and ribulose-1,5-bisphosphate regeneration limitation. **Plant Cell Physiology**, v.46, n.7, p.1036-1045, 2005.

CILIA, C.; PANIGADA, C.; ROSSINI, M.; MERONI, M.; BUSETTO, L.; AMADUCCI, S.; COLOMBO, R. Nitrogen status assessment for variable rate fertilization in maize through hyperspectral imagery. **Remote Sensing**, v.6, n.7, p.6549-6565, 2014.

CISNEROS, A., FIORIO, P., MENEZES, P., PASQUALOTTO, N., VAN WITTENBERGHE, S., BAYMA, G., & FURLAN NOGUEIRA, S. Mapping productivity and essential biophysical parameters of cultivated tropical grasslands from sentinel-2 imagery. **Agronomy**, v.10, n.5, p.711, 2020.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB) (2022) Últimas notícias. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/3140-producao-de-246-milhoes-detoneladas-garante-o-recorde-da-safra-de-graos>>. Acesso em: 10/nov/ 2022.

CONTINI, E.; MOTA, M. M.; MARRA, R.; BORGHI, E.; MIRANDA, R. A.; SILVA, A. F.; SILVA, D. D.; MACHADO, J. R. A.; COTA, L.V.; COSTA, R. V.; MENDES, S. M. **Milho - Caracterização e Desafios Tecnológicos**. SÉRIE DESAFIOS DO AGRONEGÓCIO BRASILEIRO (NT2), p.1-45, 2019.

CURRAN, P. J. Remote sensing of foliar chemistry. **Remote Sensing of Environment**, v.30, p.271–278, 1989.

DUARTE, J. O.; GARCIA, J. C.; MIRANDA, R. A. **Sistema de Produção: Cultivo do Milho**. 7. ed., 2011. Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Milho/CultivodoMilho_7ed/ecnomia.htm>. Acesso em: 25/jan/ de 2021.

ELMETWALLI, A. H. e TYLER, A. N. Estimation of maize properties and differentiating moisture and nitrogen deficiency stress via ground. Based remotely sensed data, **Agricultural Water Management**, v.242, 2020.

EL-MOURSRY, R. S. A.; WAE, A.; MA, B. Response of maize productivity to nitrogen fertilizer and spraying with blue green algae extract. **International Journal of Agronomy and Agricultural Research (IJAAR)**, v.14, n.2, p.10-20, 2019.

ERDLE, K.; MISTELE, B.; SCHMIDHALTER, U. Comparison of active and passive spectral sensors in discriminating biomass parameters and nitrogen status in wheat cultivars. **Field Crops Research**, v.124, n.1, p.74–84, 2011.

FAGARD, M.; LAUNAY, A.; CLÉMENT, G.; COURTIAL, J.; DELLAGI, A.; FARJAD, M.; KRAPP, A.; SOULIÉ, M. C.; MASCLAUX-DAUBRESSE, C. C. Nitrogen metabolismo meets phytopathology. **Journal of Experimental Botany**, v.65, n.19, p.5643-5656, 2014.

FANCELLI, A. L. e DOURADO NETO, D. **Produção de milho**. 4 ed. Piracicaba, SP: Ceres, 360 p. 2004.

FANCELLI, A.L. e DOURADO-NETO, D. **Produção de Milho**. Ed. Agropecuária, Guaíba. 360 p., 2000.

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

FANG, M.; JU, W.; ZHAN, W.; CHENG, T.; QIU, F.; WANG, J. A new spectral similarity water index for the estimation of leaf water content from hyperspectral data of leaves. **Remote Sensing of Environment**, v.196, p.13-27, 2017.

FAOSTAT. - **Food and Agriculture Organization of The United Nations data. Production/Crops**. 2012. Disponível em: <http://faostat3.fao.org/home/index.html#download>. Acesso em: 13/jan/2021.

FERNÁNDEZ, S.; VIDAL, D.; SIMON, E. et al. Radiometric characteristics of triticum aestivum cv. Astral under water and nitrogen stress. **International Journal of Remote Sensing**, v.15, n.9, p.1867-1884, 1994.

FONSECA, E.L.; ROSA, L. M. G.; FONTANA, D.C.; Caracterização espectral de Paspalum notatum em diferentes níveis de adubação nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, n.3, p.365-371. 2002.

FORNASIERI FILHO, D. **Manual da cultura do milho**. Funep,.576 p. 2007.

GATES, D.M.; KEEGAN, H.J.; SCHLETER, J.C.; WEIDNER, V.R. Spectral properties of plants. **Applied Optics**, v.4, ed.1, p.11-20, 1965.

GIANTOMASO, C. Piracicaba registra menor volume de chuva dos últimos sete anos em 2021. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/piracicaba-regiao/noticia/2022/01/09/piracicaba-registra-menor-volume-de-chuva-dos-ultimos-sete-anos-em-2021.ghtml>. Acesso em 06/09/2022.

GITELSON, A. A.; ZUR, Y.; CHIVKUNOVA, O. B.; MERZLYAK, M. N. Assessing Carotenoid Content in Plant Leaves with Reflectance Spectroscopy. **Photochemistry and Photobiology**, v.75, n.3, p.272-281, 2002.

GRANT, K. M.; JOHNSON, D. L.; HILDEBRAND, D. V.; PEDDLE, D. R. Quantifying biomass production on rangeland in southern Alberta using SPOT imagery. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v.38, n.6, p.695–708, 2012.

GRUZSKA M, OHSE S, PEREIRA AB, DIAS CTDS. Corn yield as a function of amounts of nitrogen applied in bands. **African Journal of Agricultural Research**, v.11, n.20, p.1805-1814, 2016.

GUTH, T. L. F. Milho - Safra 2013/2014, Conab- Companhia Nacional de Abastecimento. **Perspectiva para agropecuária**, v.1, p.122-133, 2013.

HERMANS, S. S.; HAMMOND, J. P.; WHITE, P. J. VERBRUGGEN, N. How do plants respond to nutrient shortage by biomass allocation? **TRENDS in Plant Science**, v.11, n.12, p.610-617, 2006.

HERRMANN, I.; PIMSTEIN, A.; KARNIELI, A.; COHEN, Y.; ALCHANATIS, V.; BONFIL, D. J. LAI assessment of wheat and potato crops by VEN μ S and Sentinel-2 bands. **Remote Sensing of Environment**, v.115, n.8, p.2141–2151, 2011.

HOFFER, R.M. Biological and Physical Considerations in Applying Computer-Aided Analysis Techniques to Remote Sensor Data. In: SWAIN, P. H; DAVIS, S.M. **Remote Sensing: The Quantitative Approach**. New York: McGRAW-HILL, p.227-289, 1978.

HORN, D.; ERNANI, P. R.; SANGOI, L.; SCHWEITZER, C.; CASSOL, P. C. Parâmetros cinéticos e morfológicos da absorção de nutrientes em cultivares de milho com variabilidade genética contrastante. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, n.1, p.77-85, 2006.

HUNT, E. R.; DORAISWAMY, P. C.; MCMURTREY, J. E.; DAUGHTRY, C. S.; PERRY, E. M.; AKHMEDOV, B. A visible band index for remote sensing leaf chlorophyll content at the canopy scale. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.21, p.103-112, 2013.

JMP. Software JMP. Disponível em: https://www.jmp.com/pt_br/software.html. Acesso em 06/09/2022.

JONG, S. M.; ADDINK, E. A.; DOELMAN, J. C. Detecting leaf-water content in Mediterranean trees using high-resolution spectrometry. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.27, p.128-136, 2014.

JUNEAU, K. J. e TARASOFF, C. S. Leaf area and water content changes after permanent and temporary storage. **PLOS One**, v.7, n.8, p.1-6, 2012.

KANT, S.; BI, Y.; ROTHSTEIN, S. J. Understanding plant response to nitrogen limitation for the improvement of crop nitrogen use efficiency. **Journal of Experimental Botany**, v.62, n.4, p.1499- 1509, 2011.

KHAN, F.; KHAN, S.; FAHAD, S.; FAISAL, S.; HUSSAIN, S.; ALI, S.; ALI, A. Efeito de diferentes níveis de nitrogênio e fósforo na fenologia e produção de variedades de milho. **American Journal of Plant Sciences**, v.5, p.2582-2590, 2014.

KIM, H.Y.; LIM, S. S.; KWAK, J. H.; LEE, D. S.; LEE, S. M.; RO, H. M.; CHOI, W. J. Dry matter and nitrogen accumulation and partitioning in rice (*Oryza sativa* L.) exposed to experimental warming with elevated CO₂. **Plant Soil**, v. 342. p. 59-71, 2011.

LEBOURGEOISV.; BÉGUÉ, A.; LABBÉ, S.; HOULÈS, M.; MARTINÉ, J. F. A light-weight multi-spectral aerial imaging system for nitrogen crop monitoring. **Precision Agriculture**, v.13, n.5, p.525-541, 2012.

LI, F.; MIAO, Y.; HENNIG, S.D.; GNYP, M.L.; CHEN, X.; JIA, L.; BARETH, G. Evaluating hyperspectral vegetation indices for estimating nitrogen concentration of winter wheat at different growth stages. **Precision Agriculture**, v.11, n.4, p.335–357, 2010.

LI, F.; MIAO, Y.; FENG, G.; YUAN, F.; YUE, S.; GAO, X.; CHEN, X. Improving estimation of summer maize nitrogen status with red edge-based spectral vegetation indices. **Field Crops Research**, v.157, p.111-123, 2014a.

LI, L.; LU, J.; WANG, S.; MA, Y.; WEI, Q.; LI, X.; CONG, R. Methods for estimating leaf nitrogen concentration of winter oilseedrape (*Brassica napus* L.) using in situ leaf spectroscopy. **Industrial Crops and Products**, v.96, p.194-204, 2016.

LIU, W. T. H. **Aplicações do sensoriamento remoto**. 2 ed. Campo Grande: Oficina de Textos, 908p., 2015.

MA, B.L.; MORRISON, M.J.; DWYER, L.M. Canopy light reflectance and field greenness to assess nitrogen fertilization and yield of maize. **Agronomy Journal**, v.88, p.915- 920, 1996.

MAGALHÃES, B.G. et al. Mitigating the effects of future climate on maize productivity. **Agrometeoros**, v.27, n.2, 2020.

MAHAJAN, G. R.; SAHOO, R. N.; PANDEY, R. N.; GUPTA, V. K.; KUMAR, D. Using hyperspectral remote sensing techniques to monitor nitrogen, phosphorus, sulphur and potassium in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Precision Agriculture**, v.15, p.499–522, 2014.

MALAVOLTA, E. Elementos de nutrição mineral de plantas. São Paulo: **Agronômica Ceres**, 1980. 251p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1997. 319 p

MARKOVIC, M.; JOSIPOVIC, M.; SOSTARIC, J.; JAMBROVI, A.; BRKIC, A. Resposta da produção de grãos e componentes da produção de milho (*Zea mays* L.) à irrigação e adubação nitrogenada. **J. Central Europ. Agrícola**, v.18, n.1, p.55 – 72, 2017.

MARTINS, J. A., FIORIO, P. R., BARROS, P. P. D. S., DEMATTÊ, J. A. M., MOLIN, J. P., CANTARELLA, H., & NEALE, C. M. U. Potential use of hyperspectral data to monitor sugarcane nitrogen status. **Acta Scientiarum. Agronomy**, V.43, 2020.

MENG, S.; PENG, J. S.; HE, Y. N.; ZHABG, G. B.; YI, H. Y.; FU, Y. L.; GONG, J. M. Arabidopsis NRT1.5 mediates the suppression of nitrate starvation-induced leaf senescence by modulating foliar potassium level. **Molecular Plant**, v.9, n.3, p.461-470, 2016.

MERIGOUT, P.; GAUDON, V.; QUILLERÉ, I.; BRIAND, X.; DANIEL-VEDELE, F. Urea use efficiency of hydroponically grown maize and wheat. **Journal of Plant Nutrition**, v.31, n.3, p.427-443, 2008.

MIRANDA, R. A. de. Uma história de sucesso da civilização. **A Granja**, v.74, n.829, p.24-27, 2018.

MOHARANA, S. e DUTTA, S. Spatial variability of chlorophyll and nitrogen content of rice from hyperspectral imagery. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing.**, 2016.

MOLIN, J. P., FRASSON, F. R., AMARAL, L. R., POVH, F. P., SALVI, J. V. Capacidade de um sensor ótico em quantificar a resposta da cana-de-açúcar a doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.12, p.1345-1349, 2010.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto**. 4 ed. Viçosa: Editora UFV, 422 p.2011.

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**, v.5, n.1, p.1-6, 2018.

MOTA, M. R.; SANGOI, L.; SCHENATTO, D. E.; GIORDANI, W.; BONIATTI, C. M.; DALL'IGNA, L. Fontes estabilizadas de nitrogênio como alternativa para aumentar o rendimento de grãos e a eficiência de uso do nitrogênio pelo milho. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.39, n.2, p.512-522, 2015.

MULLA, D. J. Twenty-five years of remote sensing in precision agriculture: key advances and remaining knowledge gaps. **Biosystems Engineering**, v.114, n.4, p.358-371, 2013.

MUNNÉ-BOSCH, S. & ALEGRE, L. Die and let live: leaf senescence contributes to plant survival under drought stress. **Functional Plant Biology**, v.31, n.3, p.203-216, 2004.

OKUMURA R. S.; MARIANO, D. C.; ZACCHEO, P. V. C. Uso de fertilizante nitrogenado na cultura do milho: uma revisão. **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, v.4, n.2, p.26-244, 2011.

OLIVEIRA, F. A.; OLIVEIRA, F. R. A.; CAMPOS, M. S.; DE OLIVEIRA, M. K. T.; MEDEIROS, J. F.; SILVA, O. M. P. Interação entre salinidade e fontes de nitrogênio no desenvolvimento inicial da cultura do girassol. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.5, p.479-484, 2010.

OLNESS, A.; BENOIT, G. R. A closer look at corn nutrient demand. **Better Crops with Plant Food**, v.76, n.2, p.18-20, 1992.

PATEL, N. K. et al. Spectral response of rice crop and its relation to yield and yield attributes. **International Journal of Remote Sensing**, v.6, n.5, p. 657-664, 1985.

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

SABZI, S., POURDARBANI, R., ROHBAN, M. H., GARCÍA-MATEOS, G., & ARRIBAS, J. I. Estimation of nitrogen content in cucumber plant (*Cucumis sativus* L.) leaves using hyperspectral imaging data with neural network and partial least squares regressions. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v.217, p.104404, 2021.

PRADHAN, S.; BANDYOPADHYAY, K. K.; SAHOO, R. N.; SEHGAL, V. K.; SINGH, R.; GUPTA, V. K.; JOSHI, D. K. Predicting wheat grain and biomass yield using canopy reflectance of booting stage. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v.42, n.4, p.711–718, 2014.

PRADO, R. de M. **Nutrição de plantas**. São Paulo: Editora UNESP, 2008. 407p.

QUEMADA, M.; GABRIEL, J.; ZARCO-TEJADA, P. Airborne hyperspectral images and ground-level optical sensors as assessment tools for maize nitrogen fertilization. **Remote Sensing**, v.6, n.4, p.2940–2962, 2014.

RAIJ, B. V.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**, Instituto Agrônomo, 1997.

RANJAN, R.; CHOPRA, U. K.; SAHOO, R. N.; SINGH, A. K.; PRADHAN, S. Assessment of plant nitrogen stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) through hyperspectral indices. **International Journal of Remote Sensing**, v.33, n.20, p.6342–6360, 2012.

READ, J.J.; WHALEY, E.L.; TARPLEY, L. et al. Evaluation of a hand-held radiometer for field determination of nitrogen status in cotton. **American Society of Agronomy Special Publication**. n.66, p.177-195. 2003.

REDDY, K.R.; MATCHA, S.K. Remote sensing algorithms for castor bean nitrogen and pigment assessment for fertility management. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v.32, n.3, p.411–419, 2010.

REETZ, H. Heres how to estimate yields for corn and soybeans before harvest. **Better Crops With Plant Food**, v.71, p.18-19, 1987.

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

REYNOLDS, C. M.; WOLF, D. C.; ARMBRUSTER, J. A. Factors related to urea hydrolysis in soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.49, p.104-108, 1985.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**, v.359, 1999.

RODRIGUEZ-PEREZ, J. R.; ORDONEZ, C.; GONZALEZ-FERNANDEZ, A. B.; SANZABLANEDO, E.; VALENCIANO, J. B.; MARCELO, V. Leaf water content estimation by functional linear regression of field spectroscopy data. **Biosystems Engineering**, v.165, p.36-46, 2018.

RODRÍGUEZ, E. M. e RODRIGUEZ, I. R. Miller, G. L. Usando espectroscopia de refletância no infravermelho próximo para programar aplicações de nitrogênio em gramíneas anãs, **Agron. J**, v.92, p. 423 – 427, 2000.

ROSA, H. J. A.; AMARAL, L. R.; MOLIN, J. P.; CANTARELLA, H. Sugarcane response to nitrogen rates, measured by a canopy reflectance sensor. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.50, n 9, p.840-848, 2015.

RYU, C.; SUGURI, M.; UMEDA, M. Model for predicting the nitrogen content of rice at panicle initiation stage using data from airborne hyperspectral remote sensing. **Biosystems Engineering**, v.104, n.4, p.465–475, 2009.

SABZI, S., POURDARBANI, R., ROHBAN, M. H., GARCÍA-MATEOS, G., & ARRIBAS, J. I. Estimation of nitrogen content in cucumber plant (*Cucumis sativus* L.) leaves using hyperspectral imaging data with neural network and partial least squares regressions. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v.217, p.104404, 2021.

SAEYS, W.; MOUAZEN, A. M.; RAMON, H. Potential for Onsite and Online Analysis of Pig Manure using Visible and Near Infrared Reflectance Spectroscopy, **Biosystems Engineering**, v.91, ed.4, p.393-402, 2005

SANGOI, L.; SCHMITT, A.; SALDANHA, A.; FIORENTIN, C.F.; PLETSCHE, A.J.; VIEIRA, J.; GATELLI, M.A. Rendimento de grãos de híbridos de milho em duas densidades de plantas com e sem e sem a retirada dos perflhos. **Ciência Rural**, v.39, p.325-331, 2007.

SANTA HELENA SEMENTES. SHS. Características SHS 7939. Disponível em: <https://santahelenasementes.com.br/produtos/shs-7939>. Acesso em 23/09/2022.

SANTOS, G. R.; GAMA, F. R.; GONÇALVES, C. G.; RODRIGUES, A. C.; LEÃO, E. U.; CARDON, C. H.; BONIFACIO, A. Severidade de doenças foliares e produtividade de genótipos de milho em resposta à adubação nitrogenada. **Revista Ceres**, v.60, n.4, p.505-513, 2013b.

SANTOS, L. P. D.; AQUINO, L. A.; NUNES, P. H. M. P.; XAVIER, P. O. Doses de nitrogênio na cultura do milho para altas produtividades de grãos. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.12, n. 3, p.270-279, 2013a.

SANTOS, R. V.; CAVALCANTE, L. F.; VITAL, A. F.M. Interações salinidade-fertilidade do solo. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. **Manejo da salinidade na agricultura: Estudo básico e aplicados**, cap. 14, p.221-252, 2010.

SCHLEMMER, M.; GITELSON, A.; SCHEPERS, J.; FERGUSON, R.; PENG, Y.; SHANAHAN, J.; RUNDQUIST, D. Remote estimation of nitrogen and chlorophyll contents in maize at leaf and canopy levels. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.25, p.47-54, 2013.

SCHRÖDER, J.J.; UENK, D.; HILHORST, G. J. Long-term nitrogen fertilizer replacement value of cattle manures applied to cut grassland. *Plant Soil* 299:83–99, 20017.

SEADH, S. E.; ATTIA, A. N.; EL-MOURSY, S. A.; SAID, E. M.; ELAZAB, A.A.S. Productivity of maize as affected by organic, foliar and nitrogen fertilization levels. **World Research Journal of Agronomy**, v.2, n.1, p.30-36, 2013.

SENTENHAS, P. C. **Estimativa diária da evapotranspiração de referência com dados de estação meteorológica convencional e automática**. Piracicaba, 97p., Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 1998.

SHANAHAN, J. F.; KITCHEN, N. R.; RAUN, W. R.; SCHEPERS, J. S. Responsive in-season nitrogen management for cereals. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.61, p.51-62, 2008.

SHAPIRO, S. S., AND M. B. WILK. “An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples).” **Biometrika**, v.52, n.3/4, 1965, p.591–611.

SHAVER, T.M.; KHOSLA, R.; WESTFALL, D.G. Evaluation of two crop canopy sensors for nitrogen variability determination in irrigated maize. **Precision Agriculture**, v.12, p.892–904, 2011.

SILOTO, R. C. **Danos e biologia de Spodoptera frugiperda (J. E. Smith, 1797) (Lepidoptera: Noctuidae) em genótipos de milho**. 2002. 93 f. Dissertação (Mestrado em Ciências, Área de concentração: Entomologia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba-SP, 2002.

SILVA, B. E. C. & SILVA, M. R. J. Viabilidade econômico-financeira da implantação da cultura do milho no município de Santa Teresa-ES. **Revista Univap.**, v.23, n.43, 2017.

SILVA, F. C.; SILVA, M. M.; LIBADI, P. L. Aplicação de nitrogênio no cultivo de milho, sob sistema plantio direto: efeitos na qualidade física do solo e características agrônômicas. **Semina: Ciências Agrárias**, v.34, n.6, p.3513-3528, 2013.

SIMS, D. A. e GAMON, J. A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. **Remote Sensing of Environment**, v.81, p.337-354, 2002.

SONOBE, R.; SANO, T.; HORIE, H. Estimating leaf carotenoid contents of shade-grown tea using hyperspectral indices and PROSPECT-D inversion. **International Journal of Remote Sensing**, 2018.

SOUSA, D. M. G. e LOBATO, E. Cerrado: Correção do solo e adubação. **2 Ed. Embrapa Informação Tecnológica**, Brasília, DF, 2004.

SOUSA, H. C.; SOUSA, G. G. **Crescimento e trocas gasosas do milho sob estresse salino e doses de nitrogênio**. tcc 16 pg. a Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB. 2020.

TAIZ, L. e ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5.ed. Porto Alegre:Artemed, 2013. 954p.

TAIZ, L. e ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Tradução Elaine Romanato Santarém. 3 ed. Porto Alegre: Artmed, 772 p. 2004.

TAVARES, T. R., FIORIO, P. R., SEIXAS, H. T., GARCIA, A. C., & BARROS, P. P. DA S. Effects of storage on vis-NIR-SWIR reflectance spectra of Mombasa grass leaf samples. **Ciência Rural**, v. 50, n. 3, p. 1-10, 2020.

TIAN, Y.; YAO, X.; YANG, J.; CAO, W.; ZHU, Y. Extracting red edge position parameters from ground and space-based hyperspectral data for estimation of canopy leaf nitrogen concentration in rice. **Plant Production Sciences**, v.14, p.270–281, 2011.

TRACHSEL, S.; SAN VICENTE, F. M.; SUAREZ, E. A.; RODRIGUEZ, C. S.; ATLIN, G. N. Effects of planting density and nitrogen fertilization level on grain yield and harvest index in seven modern tropical maize hybrids (*Zea mays* L.). **The Journal of Agricultural Science**, v.154, n.4, p.689-704, 2016.

TRICKER, P. J.; CALFAPIETRA, C.; KUZMINSKY, E.; PULEGGI, R.; FERRIS, R.; NATHOO, M.; PLEASANTS, L. J.; ALSTON, V.; ANGELIS, P.; TAYLOR, G. Long-term acclimation of leaf production, development, longevity and quality following 3 yr exposure to free-air CO₂ enrichment during canopy closure in *Populus*. **New Phytologist**, v. 162, n. 2, p. 413-426, 2004.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). Maiores produtores mundiais de milho: dados atualizados em maio de 2022. Disponível em: <https://www.farmnews.com.br/mercado/maiores-produtores-mundiais-de-milho-dados-atualizados-em-maio-de-2022/>. Acesso em 23/09/2022.

VIGNEAU, N.; ECARNOT, M.; RABATEL, G.; ROUMET, P. Potential of field hyperspectral imaging as a non destructive method to assess leaf nitrogen content in Wheat. **Field Crops Research**, v. 122, n. 1, p. 25–31, 2011.

VISCARRA ROSSEL, R. A. ParLeS: Software for chemometric analysis of spectroscopic data. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 90, p. 72-83, 2008.

VON PINHO, R. G.; BORGES, I. D.; PEREIRA, J. L. D. A. R.; DOS REIS, M. C. Marcha de absorção de macronutrientes e acúmulo de matéria seca em milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 8, n. 02, 2010.

WANG, J.; SHEN, C.; LIU, N.; JIN, X.; XUESHAN, F.; DONG, C.; XU, Y. Avaliação não destrutiva da concentração de nitrogênio foliar por espectroscopia de campo visível/infravermelho próximo em pomares de pereira. **Sensores**, v. 17, n. 3, p. 538, 2017.

WEI, S.; WANG, X.; SHI, D.; LI, Y.; ZHANG, J.; LIU, P.; DONG, S. The mechanisms of low nitrogen induced weakened photosynthesis in summer maize (*Zea mays* L.) under field conditions. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.105, p.118-128, 2016.

WOLSCHICK, D.; CARLESSO, R.; PETRY, M. T; JADOSKI, S. O. Adubação nitrogenada na cultura do milho no sistema plantio direto em ano com precipitação pluvial normal e com “El Niño”. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.461-468, 2003.

WOLD, S.; SJÖSTRÖM, M.; ERIKSSON, L. PLS-regression: a basic tool of chemometrics. **Chemometrics Intelligent Laboratory Systems**, v. 58, p. 109-130, 2001.

WORDELL FILHO, J. A.; SPAGNOLLO, E. Sistema de cultivo e doses de nitrogênio na sanidade e no rendimento do milho. **Ciência Rural**, v.43, n.2, p.199-205, 2013.

YAMADA, T. Adubação nitrogenada do milho. **Informações Agronômicas**, n.71, p.1-3, 1995.

YAMADA, T. Como melhorar a eficiência da adubação nitrogenada do milho? **Biológica**. v.25, p.30, 2000.

YELLE, S.; BEESON, R. C.; TRUDEL, M. J.; GOSSELIN, A. Acclimation of to two tomato species to high atmospheric CO₂: I. sugar and starch concentrations. **Plant Physiology**, v.90, p.1465-1472, 1989.

YI, Q.; HUANG, J.; WANG, F.; X., W. Evaluating the performance of PC-ANN for the estimation of rice nitrogen concentration from canopy hyperspectral reflectance. **International Journal of Remote Sensing**, v.32, p.931–940, 2012.

YUAN, B. M.; COUTURE, J. J.; PHILIP, A.; TOWNSEND, M. D.; BLAND, W. L. Spectroscopic Determination of Leaf Nitrogen Concentration and Mass Per Area in Sweet Corn and Snap. **Soil fertility & crop nutrition**. V.108, ed.6, p. 2519-2526, 2016.