

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FITOTECNIA

ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA (NDVI) PARA
AVALIAÇÃO NUTRICIONAL DO NITROGÊNIO E SUA RELAÇÃO COM A
PRODUTIVIDADE DE GRÃOS EM ARROZ IRRIGADO

Gabriela Petry da Silva
Engenheira Agrônoma/UFRGS

Dissertação apresentada como um dos requisitos
à obtenção do Grau de Mestre em Fitotecnia
Área de Concentração Sistema de Produção Vegetal

Porto Alegre (RS), Brasil
Abril de 2024

CIP - Catalogação na Publicação

Petry da Silva, Gabriela
ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA
(NDVI) PARA AVALIAÇÃO NUTRICIONAL DO NITROGÊNIO E SUA
RELAÇÃO COM A PRODUTIVIDADE DE GRÃOS EM ARROZ IRRIGADO
/ Gabriela Petry da Silva. -- 2024.
90 f.
Orientador: Christian Bredemeier.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de
Pós-Graduação em Fitotecnia, Porto Alegre, BR-RS,
2024.

1. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada.
2. Arroz irrigado. 3. Sensoriamento remoto. 4.
Adubação nitrogenada. I. Bredemeier, Christian,
orient. II. Título.

GABRIELA PETRY DA SILVA
Engenheira Agrônoma - UFRGS

DISSERTAÇÃO

Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

MESTRE EM FITOTECNIA

Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia
Faculdade de Agronomia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovado em: 10.04.2024
Pela Banca Examinadora

Homologado em:
Por

CHRISTIAN BREDEMEIER
Orientador - PPG Fitotecnia

SIMONE MUNDSTOCK JAHNKE
Coordenadora do Programa de
Pós-Graduação em Fitotecnia

Renata Pereira da Cruz
PPG Fitotecnia/UFRGS

Claudio Wilson Mendes Junior
PPG Sensoriamento Remoto/UFRGS

Mara Grohs
Instituto Riograndense do
Arroz

CARLOS ALBERTO BISSANI
Diretor da Faculdade de
Agronomia

Aos meus queridos pais Eduarte Lopes da
Silva e Elvira Ines Petry para que ao lerem esta obra,
saibam que são minhas inspirações diárias. Vocês
sempre serão meu grande exemplo de força e
motivação.

OBRIGADA!

ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA (NDVI) PARA AVALIAÇÃO NUTRICIONAL DO NITROGÊNIO E SUA RELAÇÃO COM A PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DO ARROZ IRRIGADO¹

Autora: Gabriela Petry da Silva

Orientador: Christian Bredemeier

RESUMO

Na cultura do arroz irrigado o crescimento das plantas e a produtividade de grãos estão relacionados com a adequada disponibilidade de nitrogênio (N), entretanto, a atual recomendação da adubação nitrogenada não leva em consideração o *status* nutricional da cultura, reduzindo a eficiência de uso do N. Nesse contexto, a utilização de índices de vegetação é uma estratégia para auxiliar na detecção da variabilidade do estado nutricional das plantas, fornecendo uma alternativa no manejo do N. O objetivo deste trabalho foi estudar o comportamento da reflectância do dossel das plantas de arroz irrigado através do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e avaliar sua relação com o *status* nutricional de nitrogênio nas plantas e o rendimento de grãos, ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura. O experimento foi conduzido na Estação Experimental do Arroz do Instituto Rio Grandense do Arroz, em Cachoeirinha/RS, nas safras de 2021/2022 e 2022/2023 com o genótipo IRGA 424 RI. Os tratamentos consistiram em diferentes doses de adubação nitrogenada em cobertura, com o intuito de gerar variabilidade de crescimento nas plantas. O aumento na dose de N aplicada em cobertura proporcionou incrementos na produção da biomassa seca e na quantidade de N acumulado na parte aérea, rendimento de grãos e nos valores de NDVI. O NDVI apresentou relação com a dose de N aplicada, com a produção de biomassa seca e a quantidade de N acumulada na parte aérea e rendimento de grãos. De acordo com o presente estudo, o NDVI pode ser utilizado para prever o *status* nutricional das plantas em relação ao N e estimar a produtividade da cultura durante o ciclo de desenvolvimento, com maiores precisões entre os estádios de 8 e 9 folhas completamente expandidas e iniciação da panícula, sendo possível utilizar o índice para guiar a segunda aplicação da adubação nitrogenada em cobertura, levando em conta a variabilidade de crescimento das plantas. Esses resultados estabelecem critérios para futuros trabalhos de aplicação de adubação nitrogenada em cobertura em taxa variável na cultura do arroz irrigado.

Palavras-chaves: Arroz irrigado; *status* nutricional de N; índice de vegetação; biomassa; produtividade.

¹Dissertação de Mestrado em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. (90f.) Abril, 2024.

NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX (NDVI) FOR NUTRITIONAL NITROGEN ASSESSMENT AND ITS RELATIONSHIP WITH GRAIN YIELD IN FLOODED RICE²

Author: Gabriela Petry da Silva

Advisor: Christian Bredemeier

ABSTRACT

In flooded rice, plant growth and grain yield are related to the adequate availability of nitrogen (N), however, the current recommendation for nitrogen fertilization does not consider the nutritional status of the crop, reducing the N use efficiency. In this context, the use of vegetation indexes is a strategy to assist in detecting the variability of the nutritional status of plants, providing an alternative for nitrogen management. The objective of this work was to study the canopy reflectance of flooded rice plants using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) measured throughout the development cycle and evaluate its relationship with the N nutritional status and grain yield in rice plants. Field experiments were carried out at the Rice Experimental Station of the Instituto Rio Grandense do Arroz, in southern Brazil (Cachoeirinha/RS), in the 2021/2022 and 2022/2023 growing seasons with the genotype IRGA 424 RI. The treatments consisted of different doses of nitrogen fertilizer in topdressing, in order to create variability in plant growth. The increase in the N dose applied in topdressing provided increases in the production of shoot dry biomass and in the amount of N accumulated, grain yield and NDVI values. The NDVI was related to the dose of N applied, the production of dry biomass and the amount of N accumulated in the shoot aerial part and grain yield. According to the present study, NDVI can be used to predict the nutritional status of plants in relation to N and the grain yield of the crop during the development cycle, with greater precision between the stages of 8 and 9 fully expanded leaves and panicle initiation, being possible to use the index to guide the second application of nitrogen fertilizer in topdressing, taking into account the variability of plant growth. These results establish criteria for nitrogen topdressing in variable rate in flooded rice.

Keywords: Flooded rice; N nutritional status; vegetation index; biomass; grain yield.

²Master Dissertation in Plant Science, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil. (90p.) April, 2024.

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Aspectos gerais da cultura do arroz.....	4
2.2 Importância do nitrogênio (N) para a cultura do arroz.....	5
2.2.1 Recomendação da adubação nitrogenada na cultura do arroz irrigado...	6
2.3 Agricultura de precisão.....	8
2.3.1 Sensoriamento remoto como ferramenta na AP.....	9
2.3.1.1 Sensores remotos para identificação do <i>status</i> nutricional das plantas.....	10
2.3.1.2 NDVI como ferramenta para predizer a biomassa vegetal, N acumulado e produtividade em arroz.....	12
2.6 Referências.....	15
3 CAPÍTULO 1 – Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), para estimativa de parâmetros biofísico relacionados ao nitrogênio, em arroz irrigado.....	22
3.1 Introdução.....	23
3.2 Material e métodos.....	24
3.2.1 Localização e caracterização do local de execução do experimento.....	24
3.2.2 Caracterização do experimento.....	26
3.2.3 Variáveis analisadas.....	28
3.2.3.1 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI).....	28
3.2.3.2 Determinação do acúmulo de biomassa e nitrogênio na parte aérea.....	29
3.2.4 Análise estatística.....	30
3.3 Resultados e discussão.....	30
3.4 Conclusões.....	46

	Página
3.5 Referências.....	46
4 CAPÍTULO 2 – Estimativa da produtividade de grãos de arroz irrigado, ao longo do ciclo de desenvolvimento, pelo Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI).....	52
4.1 Introdução.....	53
4.2 Material e métodos.....	54
4.2.1 Localização e caracterização do local de execução do experimento.....	54
4.2.2 Caracterização do experimento.....	55
4.2.3 Variáveis analisadas.....	56
4.2.3.1 Determinação da reflectância do dossel do arroz.....	56
4.2.3.2 Determinação da área sob a curva do progresso do NDVI.....	57
4.3.3.3 Rendimento de grãos e componentes do rendimento.....	57
4.2.4 Análise estatística.....	58
4.3 Resultados e Discussão.....	58
4.4 Conclusões.....	73
4.5 Referências.....	73
5 CONCLUSÕES GERAIS.....	79

RELAÇÃO DE TABELAS

	Página
CAPÍTULO 1	
1. Manejo de plantas daninhas na área experimental, safra 2021/2022.....	28
2. Manejo de plantas daninhas na área experimental, safra 2022/2023.....	28
CAPÍTULO 2	
1. Práticas de manejo adotadas no experimento nas safras 2021/2022 e 2022/2023.....	56
2. Componentes de rendimento do arroz irrigado, em função de doses de nitrogênio aplicadas em cobertura, nas safras 2021/22 e 2022/23. Letras minúsculas comparam a média a 5 % de significância, entre os tratamentos. ns= não significativo.....	67

RELAÇÃO DE FIGURAS

	Página
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
1. Curva típica da reflectância da vegetação.....	11
CAPÍTULO 1	
1. Radiação solar (MJ m^2) nas safras 2021/2022 e 2022/2023 na Estação Experimental do Arroz (EEA/IRGA).....	25
2. Temperaturas médias mínima e máxima e precipitação pluvial nas safras 2021/2022 (a) e 2022/2023 (b) na Estação Experimental do Arroz (EEA/IRGA).....	26
3. Biomassa acumulada na parte aérea de plantas de arroz, nos estádios V_5 , V_8 e na diferenciação da panícula (R_1), em função de doses de nitrogênio aplicadas em cobertura, nas safras 2021/22 (a) e 2022/23 (b). Barras indicam o erro padrão da média.....	31
4. Nitrogênio acumulado na parte aérea de plantas de arroz, nos estádios V_5 , V_8 e na diferenciação da panícula (R_1), em função de doses de nitrogênio aplicadas em cobertura, nas safras 2021/22 (a) e 2022/23 (b). Barras indicam o erro padrão da média.....	34
5. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) de plantas de arroz, nos estádios V_5 , V_8 e na diferenciação da panícula (R_1), em função de doses de nitrogênio aplicadas em cobertura, nas safras 2021/22 (a) e 2022/23 (b). Barras indicam o erro padrão da média	36
6. Relação entre a biomassa (a) e nitrogênio acumulado (b) da parte aérea do arroz irrigado com o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) no estádio de cinco folhas completamente expandidas (V_5) nas safras 2021/22 e 2022/23. Linha tracejada indica safra 2021/22 e linha cheia indica safra 2022/23.....	38
7. Relação entre a biomassa (a) e nitrogênio acumulado (b) da parte aérea do arroz irrigado com o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) no estádio de oito folhas completamente expandidas (V_8) nas safras 2021/22 e 2022/23. Linha tracejada indica safra 2021/22 e linha cheia indica safra 2022/23.....	39

8. Relação entre a biomassa (a) e nitrogênio acumulado (b) da parte aérea do arroz irrigado com o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) no estágio de diferenciação da panícula (R1) nas safras 2021/22 e 2022/23. Linha tracejada indica safra 2021/22 e linha cheia indica safra 2022/23..... 40
9. Relação entre a biomassa (a) e nitrogênio acumulado (b) da parte aérea do arroz irrigado com o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) no estágio de oito folhas completamente expandidas (V8) em resposta a doses de N aplicadas em cobertura nas plantas. Todos os dados foram normalizados utilizando os valores médios para cada safra..... 44

CAPÍTULO 2

1. Dinâmica temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), obtido a partir de sensor óptico ativo, em função dos dias após a emergência (DAE) e a disponibilidade de nitrogênio, na safra 2021/22 (a) e 2022/23 (b). As setas indicam os momentos da aplicação de nitrogênio em cobertura. Barras indicam o erro padrão da média. Letras minúsculas comparam médias a 5 % de significância, dentro de cada avaliação. ns = não significativo..... 59
2. Precipitação pluvial e radiação solar, nas safras 2021/2022 e 2022/2023, na Estação Experimental do Arroz (EEA/IRGA)..... 61
3. Área sob a curva de progresso do NDVI, na safra 2021/22 nos tratamentos sem N (a), 60 kg N ha⁻¹ (b), 120 kg N ha⁻¹ (c), 180 kg N ha⁻¹ (d) e 240 kg N ha⁻¹ (e). As setas indicam os momentos da aplicação de nitrogênio em cobertura. Barras indicam o erro padrão da média. Letras minúsculas comparam a média a 5 % de significância, entre os tratamentos..... 64
4. Área sob a curva de progresso do NDVI, na safra 2022/23 nos tratamentos sem N (a), 60 kg N ha⁻¹ (b), 120 kg N ha⁻¹ (c), 180 kg N ha⁻¹ (d) e 240 kg N ha⁻¹ (e). As setas indicam os momentos da aplicação de nitrogênio em cobertura. Barras indicam o erro padrão da média. Letras minúsculas comparam a média a 5 % de significância, entre os tratamentos..... 65
5. Rendimento de grãos de arroz irrigado, em função de doses de nitrogênio aplicadas em cobertura, nas safras 2021/22 e 2022/23. Barras indicam o erro padrão da média. Linha tracejada indica safra 2021/22 e linha cheia indica safra 2022/23. Letras minúsculas comparam a média a 5 % de significância, entre os tratamentos em cada safra..... 67
6. Relação entre o rendimento de grãos de arroz e a área sob a curva do progresso do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), em função de doses de nitrogênio aplicadas em cobertura, nas safras 2021/22 (símbolos vazados) e 2022/23 (símbolos cheios)..... 69

7.	Relação entre o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) nos estágios de 7,8 e 9 folhas completamente expandidas e iniciação da panícula (R_0) com o rendimento de grãos de arroz, nas safras 2021/22 (a) e 2022/23 (b).....	71
----	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

1 INTRODUÇÃO

O arroz (*Oryza sativa* L.) é um dos cereais mais importantes para a alimentação humana, sendo superado apenas pelo trigo. É uma das culturas com maior importância socioeconômica, apresentando destaque considerável na economia, estando entre os cereais mais produzidos mundialmente. No Brasil, o arroz ocupa o terceiro lugar no *ranking* da produção de grãos, ficando apenas atrás da soja e do milho (CONAB, 2023a).

Nos últimos dez anos, observou-se redução na área e na produção de arroz no país, enquanto que a produtividade média da cultura aumentou cerca de 60% (CONAB, 2023b). O aumento da produtividade nas lavouras de arroz deu-se a partir da utilização de cultivares modernas com alto potencial produtivo, atreladas à correta adoção de práticas de manejo (Menezes, 2012). Contudo, apesar desse aumento ser expressivo, é necessário aumentar ainda mais o rendimento de grãos da cultura para que a segurança alimentar seja assegurada frente a desafios, tais como aumento da população, necessidade de preservação e uso mais eficiente de recursos naturais e mudanças climáticas (IRRI, 2019).

Considerando que a expansão da área agricultável é restrita, uma das alternativas mais viáveis para aumentar a quantidade produzida deste cereal é pelo aumento do rendimento de grãos, a partir da otimização dos recursos disponíveis, produzindo de forma mais eficiente através do ajuste e do manejo localizado dos fatores limitantes para o desenvolvimento das plantas. Entre os insumos, o nitrogênio (N) é um dos fatores mais limitantes para o aumento do potencial produtivo do arroz (Fageria & Stone & Santos, 2003) e, apesar da sua importância no ciclo de vida das plantas, ainda há poucos relatos de estratégias de manejo localizado na cultura do arroz irrigado.

O manejo da adubação nitrogenada nas lavouras de arroz irrigado é baseado em poucos indicadores, que conferem baixa precisão, levando em consideração somente o suprimento fornecido pelo solo, sem considerar o *status* de nitrogênio da cultura. O estado nutricional das plantas não é avaliado e nem a variabilidade espacial do solo e do crescimento da cultura na área, resultando na aplicação de uma dose média de nitrogênio na lavoura, beneficiando algumas áreas, enquanto que outras recebem super ou subdoses, o

que acaba afetando diretamente a produtividade da cultura, elevando os custos de produção e aumentando o risco de perdas de N e contaminação ambiental.

Para tornar mais eficiente a aplicação de N na cultura do arroz é de suma importância estimar o *status* nutricional das plantas em relação a este nutriente e a estimativa de produtividade da cultura durante o ciclo de desenvolvimento, já que diferentes áreas dentro de uma lavoura podem apresentar diferentes capacidades de suprimento de N, exigindo um manejo diferenciado do nutriente. A quantidade de massa seca por planta ou o teor de N no tecido vegetal são formas precisas de expressar a possível resposta da planta ao N aplicado (Tubaña *et al.*, 2011a) entretanto, sua amostragem a campo e o processo de determinação laboratorial são demorados e de custo elevado, o que acaba limitando sua aplicação.

Nesse contexto, ferramentas do sensoriamento remoto, como os sensores de vegetação, podem auxiliar na estimativa do *status* nutricional da cultura, em tempo real, ao longo do desenvolvimento das plantas à campo. O princípio de funcionalidades destes sensores é, basicamente, captar os diferentes comprimentos da radiação eletromagnética refletidos pelas plantas, gerando índices de vegetação que podem ser quantificados e, posteriormente, empregados na geração de informações sobre as condições nutricionais das plantas (Khanal *et al.*, 2017). O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) é um dos índices fornecidos pelos sensores de vegetação que tem ganhado destaque na utilização para avaliação da biomassa, conteúdo de clorofila e teor de nitrogênio nas plantas (Baral *et al.*, 2021; Islam *et al.*, 2021).

De acordo com estas informações levantou-se a hipótese de que a biomassa da parte aérea, a quantidade de nitrogênio acumulado e o rendimento final de grãos podem ser preditos durante o ciclo de desenvolvimento da cultura a partir da medição da reflectância do dossel pelo NDVI, oportunizando um melhor entendimento da variabilidade de desenvolvimento e produtividade das plantas, fornecendo uma alternativa no manejo da adubação nitrogenada no arroz irrigado.

O objetivo geral do presente trabalho foi estudar o comportamento da reflectância do dossel das plantas de arroz irrigado através do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), obtido pelo sensor óptico ativo GreenSeeker, e avaliar sua relação com o *status* nutricional de nitrogênio nas plantas e o rendimento de grãos, ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura. Como objetivos específicos buscou-se: a) determinar a dinâmica de acúmulo de biomassa seca, quantidade de nitrogênio acumulado na parte aérea e o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), em diferentes estádios

fenológicos, buscando avaliar, através destas variáveis, o *status* nutricional das plantas de arroz em relação ao N, comparando técnicas destrutivas de obtenção de dados com as leituras do NDVI realizadas pelo sensor óptico GreenSeeker; b) monitorar o desenvolvimento do arroz irrigado e prever a estimativa de produtividade da cultura, ao longo do ciclo, em função da reflectância do dossel das plantas pelo Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aspectos gerais da cultura do arroz

O arroz é o segundo cereal mais cultivado no mundo, ocupando uma área aproximada de 166 milhões de hectares (USDA, 2023). De acordo com relatório divulgado em junho de 2023 pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), a estimativa de produção de arroz beneficiado no mundo, para a safra 2022/2023, foi de 520,49 milhões de toneladas. O Brasil destaca-se como um dos principais países produtores deste cereal, ocupando o 9º lugar no *ranking* mundial (SOSBAI, 2022).

No Brasil, o arroz ocupa a terceira colocação entre as culturas produtoras de grãos e seu cultivo pode ser realizado sob dois sistemas, sendo estes o cultivo de sequeiro, conhecido também como “cultivo em terras altas”, e o cultivo irrigado, conduzido em “terras baixas” (CONAB, 2015) o qual é o mais utilizado, representando 78% da área cultivada no país (CONAB, 2023a).

De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2023a), a estimativa de produção para o arroz no ano agrícola 2022/2023 foi de 10.015,2 milhões de toneladas, com 1.473,7 milhões de hectares de área cultivada e produtividade média de 6.796 kg/ha. Entre os estados produtores, o Rio Grande do Sul destaca-se por ser o maior produtor nacional de arroz, responsável por 70% da produção nacional, seguido pelo estado de Santa Catarina, que representa 10% da produção total (CONAB, 2023b).

De maneira geral, a rizicultura brasileira vem demonstrando menor destinação de área nos últimos anos, porém com constante incremento na produtividade média (ANA, 2020), chegando a mais de 60% de aumento quando comparado à dez safras atrás (CONAB, 2023b). O alcance de maiores produtividades pode ser atribuído à utilização de cultivares modernas, de maior potencial produtivo, e ao uso de práticas de manejo mais eficientes (Menezes, 2012), perfazendo uma produção total com valores relativamente estáveis, em uma menor área plantada, reflexo da maior produtividade (ANA, 2020).

2.2 Importância do nitrogênio (N) na cultura do arroz

O arroz é uma das culturas de grãos com maior importância socioeconômica para o Brasil, em especial para o estado do Rio Grande do Sul, o qual detém 70% da produção nacional total, apresentando, nos últimos dez anos, rendimento médio de grãos entre 7,0 Mg ha⁻¹ a 8,7 Mg ha⁻¹ (CONAB, 2023a). No entanto, apesar do aumento de produtividade observado ao longo da última década, o potencial produtivo desta cultura é elevado, sendo que em experimentos conduzidos em áreas experimentais nos municípios de Cachoeirinha-RS, Cachoeira do Sul-RS e Santa Maria-RS, atingiu-se rendimentos de 10,40 Mg ha⁻¹ (Valente *et al.*, 2019), 12,5 Mg ha⁻¹ (Grohs *et al.*, 2019) e 14,80 Mg ha⁻¹ (Ribas *et al.*, 2021), respectivamente. Posto isso, destaca-se a lacuna existente entre o potencial produtivo e os rendimentos médios das lavouras comerciais, o qual pode ser atribuído a diversos fatores, entre estes o incorreto manejo da demanda nutricional, com destaque ao nitrogênio (SOSBAI, 2022).

O nitrogênio é um nutriente essencial aos vegetais. Destaca-se pela quantidade elevada em que é requerido e pelas severas limitações provocadas ao crescimento das plantas, quando deficiente, uma vez que é constituinte de muitos componentes celulares vegetais, incluindo clorofila, aminoácidos e ácidos nucleicos (Taiz *et al.*, 2017; Scivittaro *et al.*, 2018), além de desempenhar importantes funções bioquímicas e fisiológicas no metabolismo vegetal (Marschner & Marschner, 2012). A ocorrência de baixa disponibilidade de N no ambiente causa deficiência nas plantas, resultando em menor área foliar, teor de clorofila e produção de biomassa, levando à redução do crescimento e produtividade das culturas (Lin *et al.*, 2010).

Especificamente para a cultura do arroz irrigado, o nitrogênio é o nutriente de maior importância para a produtividade, propiciando as maiores respostas à adubação (Scivittaro *et al.*, 2018). A quantidade requerida de nitrogênio pelas plantas pode variar à medida em que crescem e se desenvolvem, sendo fundamental determinar os níveis de nutrientes em determinados estádios de desenvolvimento (Taiz *et al.*, 2017). O aporte de N via adubação mineral é responsável pelo aumento no rendimento de grãos e pela maximização dos componentes do rendimento do arroz, como o número de perfilhos e de panículas por unidade de área (Singh & Pillai, 1996), o número de espiguetas por panícula e o peso de grãos (Marzari, 2005). Embora o arroz absorva nitrogênio durante todo o seu ciclo, as exigências são maiores nas fases de perfilhamento e início da fase reprodutiva (Scivittaro *et al.*, 2018).

Apesar da alta capacidade de resposta do arroz ao nitrogênio, a eficiência agronômica de uso do nutriente (NUE) é bastante variável (Peng & Tang & Zou, 2009), em razão da complexa interação de fatores que determinam seu aproveitamento pela cultura, como a cultivar adotada, sistema de condução, condições climáticas (temperatura e radiação solar), além das inúmeras reações que o nutriente sofre no meio ambiente, resultando em perdas do N aplicado (Scivittaro *et al.*, 2018).

Em razão do menor custo por unidade de N e da alta concentração do nutriente, a ureia é a fonte mais utilizada na cultura do arroz (Cantarella, 2007) e apesar dos aspectos favoráveis deste fertilizante, a dissolução da ureia apresenta reação inicial alcalina, o que favorece as perdas do N aplicado por meio da volatilização de amônia para a atmosfera (Fageria & Baligar, 2005), quando aplicado sobre a superfície do solo ou sobre a lâmina de água, sendo essa a principal perda de N em solos alagados, cultivados com arroz (Buresh & Witt, 2007), seguido pela nitrificação e desnitrificação (Scivittaro *et al.*, 2018).

A quantidade de N aplicado, o estágio de desenvolvimento das plantas no momento da aplicação e o método da aplicação de N também interferem nas perdas de N (Vlek & Craswell, 1981; Mikkelsen, 1987; Fixen, 2010) ressaltando a dificuldade de manejar eficientemente o nitrogênio na agricultura (Amaral *et al.*, 2015) e importância da aplicação do nutriente nos estágios de desenvolvimento das plantas com maior resposta ao fertilizante, além da aplicação no local correto da lavoura (Fixen, 2010).

A aplicação de doses condizentes com as reais necessidades da cultura também se constitui em uma estratégia para melhorar a eficiência do uso do nitrogênio, possibilitando variar a quantidade de fertilizante nitrogenado que é ofertado para as plantas de acordo com sua necessidade (adubação em dose variada) (Bredemeier *et al.*, 2013). Swarbreck *et al.* (2019) propuseram que a capacidade de resposta e a eficiência de uso do N em cultivares de arroz em relação à dose aplicada também deveriam ser consideradas para um manejo eficiente do nutriente na cultura.

2.2.1 Recomendação da adubação nitrogenada na cultura do arroz irrigado

Potenciais diferenciados de produtividade da cultura e de resposta à adubação no arroz irrigado são determinados pelo potencial genético das cultivares, pelo manejo do solo e da cultura e pelas diferentes condições edafoclimáticas de cultivo. Em virtude disso, as recomendações de adubação nitrogenada para a cultura do arroz irrigado no Rio Grande do Sul, passaram por alterações significativas nos últimos 20 anos. Inicialmente (em 2004), a recomendação era baseada em diferentes expectativas de produtividade (SOSBAI, 2005),

na sequência (em 2007) para diferentes expectativas de incremento de produtividade (SOSBAI, 2007) e, a partir de 2010, para diferentes expectativas de resposta à adubação (SOSBAI, 2010).

As recomendações de adubação nitrogenada foram estabelecidas pela Comissão Técnica do Arroz Irrigado (CTAR), seguindo indicações contidas nas Recomendações Técnicas para a Cultura do Arroz Irrigado (SOSBAI, 2014). As doses de nitrogênio (N) recomendadas para o arroz no Rio Grande do Sul são baseadas no teor de matéria orgânica do solo amostrado na pré-semeadura e na expectativa de resposta da cultura à adubação. A expectativa de resposta é estabelecida em função do nível de adequação de todos os fatores que influenciam a produtividade do arroz, elevando-se o nível de expectativa de incremento de produtividade proporcionalmente à sua adequação. Assim, a expectativa de resposta à adubação pode variar de “baixa” a “muito alta” (SOSBAI, 2018). A partir de 2022 também propôs-se levar em consideração a inclusão de plantas de cobertura na entressafra para definir a dose de N a ser aplicada na cultura (SOSBAI, 2022). Portanto, de acordo com o teor de matéria orgânica do solo, da utilização ou não de plantas de cobertura e da expectativa de resposta à adubação da cultivar adotada, as doses de N aplicadas podem variar de 90 a 165 kg N ha⁻¹.

Para melhor aproveitamento da dose de N aplicada, os estádios de desenvolvimento da cultura que apresentam melhor resposta ao nutriente devem ser considerados. Com o objetivo de verificar a eficiência do parcelamento da dose e das épocas recomendadas de aplicação de N em arroz experimentos foram conduzidos, nos anos de 2016/2017 e 2017/2018, em seis localidades distintas do estado do Rio Grande do Sul, avaliando a resposta da adubação nitrogenada em cultivares modernas de arroz quanto à aplicação em dose única ou parcelada em diferentes épocas e a eficiência de aproveitamento do nitrogênio aplicado via fertilizante. Os melhores resultados foram obtidos com o parcelamento de $\frac{2}{3}$ da dose total no estádio V₃/V₄ e $\frac{1}{3}$ da dose entre V₈ e R₁, para rendimento de grãos, eficiência agrônômica do N e acúmulo de nitrogênio na parte aérea (Anghinoni & Carlos, 2019).

Esses resultados corroboram com a atual recomendação da aplicação de nitrogênio na cultura. De acordo com a SOSBAI (2022), a aplicação do N deve ser parcelada, recomendando-se aplicar uma pequena quantidade de N por ocasião da semeadura e o restante em cobertura. Nesta, deve-se aplicar em torno de $\frac{2}{3}$ da dose total no estádio V₃/V₄ (3 a 4 folhas completamente expandidas na planta), isto é, precedendo ou no início do perfilhamento e $\frac{1}{3}$ da dose restante deve ser aplicada em R₀ (iniciação da panícula).

Visando reduzir as perdas do nitrogênio aplicado, a primeira aplicação em cobertura deve ser realizada ainda em solo seco preconizando a entrada da lâmina de água em até três dias após a aplicação do fertilizante (SOSBAI, 2022). O atraso na entrada de água na lavoura potencializa as perdas que ocorrem por volatilização de amônia (NH₃) que aumenta à medida que a entrada de água na lavoura é atrasada (Knoblauch *et al.*, 2012). Comparativamente a primeira aplicação, segunda aplicação de nitrogênio em cobertura, ocorre sob a lâmina de água e apresenta perdas maiores por volatilização de amônia do que quando aplicado em solo seco com subsequente alagamento (Knoblauch *et al.*, 2012).

A aplicação do nitrogênio no momento adequado auxilia na melhoria da sua eficiência. Entretanto, para que o manejo seja mais assertivo, buscando a máxima eficiência do uso do nutriente e reduzindo as perdas no ambiente por sub ou superfertilização, é necessário que as doses aplicadas sejam ajustadas com as necessidades reais da cultura em diferentes partes da lavoura, levando em consideração as variações de disponibilidade do N no solo e a demanda nutricional da planta ao longo do seu desenvolvimento (Molin, 2001; Poletto, 2004). Neste contexto, a utilização de ferramentas para identificar tais variabilidades e aprimorar a aplicação de fertilizantes nitrogenados durante os estádios críticos de crescimento são necessárias para melhorar o rendimento de grãos e a eficiência do uso de nitrogênio, evitando perdas deste nutriente (Sathiya & Ramesh, 2009; Yoseftabar, 2013).

2.3 Agricultura de precisão

A agricultura tradicionalmente realizada no Brasil compreende que uma área na lavoura ou talhão apresenta comportamento homogêneo, sendo seu manejo realizado de acordo com as necessidades médias para aplicação dos insumos (fertilizantes, defensivos agrícolas, água), fazendo com que seja aplicada uma mesma quantidade destes em toda a área, sem considerar as necessidades específicas de cada zona da lavoura (Capelli, 1999). Entretanto, sabe-se que, mesmo dentro de uma pequena área, com poucos hectares, pode-se ter variações que vão desde o relevo até características intrínsecas do solo que afetam as necessidades específicas em cada local (Tschiedel & Ferreira, 2002). A partir disso, ao considerar que uma área é homogênea e realizar a aplicação de insumos pela necessidade média, muitos locais poderão receber menos ou mais insumos em relação às suas necessidades, reduzindo a eficiência do sistema, refletindo em uma lavoura desuniforme e menos produtiva (Molin, 2001).

Visando o aumento de eficiência e eficácia para manter a competitividade, juntamente com a evolução da informática e tecnologias em geoprocessamento, a agricultura de precisão (AP) surge como uma alternativa de gerenciamento da propriedade, alterando a forma como a agricultura pela média é aplicada (Tschiedel & Ferreira, 2002). A AP caracteriza-se por ser um conjunto de técnicas e procedimentos que permite conhecer, localizar geograficamente e delimitar áreas de diferentes produtividades, através do emprego da informática, programas específicos, sensores, controladores de máquinas e sistema de posicionamento global (GPS). É, pois, uma forma de gerenciamento agrícola que parte de informações exatas e precisas auxiliando nas decisões que o produtor tem que tomar ao longo das safras, considerando as variações espaciais e temporais dos fatores que afetam a produtividade (Cora *et al.*, 2004; Khanal *et al.*, 2017).

A agricultura de precisão apresenta as vantagens de possibilitar um melhor conhecimento do campo de produção, permitindo, desta forma, a tomada de decisões mais precisas (Capelli, 1999). Com isto, tem-se uma maior capacidade e flexibilidade para a distribuição dos insumos naqueles locais e no tempo em que são mais necessários, minimizando os custos de produção. A uniformidade na produtividade é alcançada pela correção dos fatores que contribuem para sua variabilidade, obtendo-se, com isto, um aumento da produtividade, além da preservação do meio ambiente, já que estes insumos são aplicados somente nos locais, quantidades e nos momentos necessários.

2.3.1 Sensoriamento remoto como ferramenta na AP

O sensoriamento remoto é uma das ferramentas disponíveis na AP e pode ser entendido como um conjunto de atividades que permite a obtenção de informações dos objetos que compõem a superfície terrestre sem a necessidade de contato direto com os mesmos. Estas atividades envolvem a detecção, aquisição e análise da energia eletromagnética emitida ou refletida pelos objetos terrestres e registradas por sensores remotos (Meneses & Almeida, 2012).

A quantidade e qualidade da energia eletromagnética refletida e emitida pelos objetos terrestres resulta das interações entre a energia eletromagnética e estes objetos. Essas interações são determinadas pelas propriedades físico-químicas e biológicas desses objetos e podem ser identificadas nas imagens e nos dados de sensores remotos. Portanto, a energia eletromagnética refletida e emitida pelos objetos terrestres é a base de dados para todo o processo de sua identificação, pois ela permite quantificar a energia espectral

refletida e/ou emitida por estes e, assim, avaliar suas principais características (Morais, 2002).

Com o avanço do estudo e das técnicas aplicadas a partir do sensoriamento remoto, o mesmo tornou-se uma importante ferramenta para auxiliar nos diagnósticos mais precisos de uma lavoura. Dessa forma, quando correlacionados com conhecimentos agrônômicos, instrumentos como sensores de solo, imagens digitais e sensores de vegetação contribuem no diagnóstico de variações do solo (teor de umidade, fertilidade, etc.), identificação de focos de plantas daninhas, pragas e doenças, bem como o acompanhamento do estado nutricional das plantas.

2.3.1.1 Sensores remotos para identificação do *status* nutricional das plantas

A reflectância (ρ) é definida como a razão entre a quantidade de radiação eletromagnética refletida e a radiação incidente (Meneses & Almeida, 2012), sendo essa uma técnica empregada no sensoriamento remoto para obtenção de informações sobre objetos terrestres sem contato físico com o mesmo (Molin, 2001).

A vegetação tem, na região do visível, um pico de absorção decorrente de forte absorção dos pigmentos do grupo da clorofila, apresentando duas bandas de absorção distintas. Uma delas situa-se próximo a 480 nm devido à presença de carotenoides e a outra próxima a 680 nm, relacionada ao processo da fotossíntese (presença de cloroplastos). Entre estes dois pontos de absorção existe um pico de reflectância em torno de 500-550 nm, correspondente à região da cor verde do espectro visível, o que explica a coloração verde das plantas. Outra característica marcante do comportamento espectral da vegetação é a existência de uma região de alta reflectância na região entre 700 nm a 1300 nm (infravermelho próximo, NIR) que está associada à estrutura celular interna da folha (Figueiredo, 2005).

Dessa forma, a quantidade de radiação refletida pelas plantas irá variar conforme o comprimento de onda. A baixa reflectância (10%) observada na região do visível, se caracteriza pela forte absorção da radiação incidente pelos pigmentos fotossintéticos presentes nos cloroplastos (Almeida & Fontana, 2009). A partir de 700 nm (infravermelho próximo) observa-se um aumento na reflectância, correspondente a um valor de 40% da radiação incidente (Figura 1).

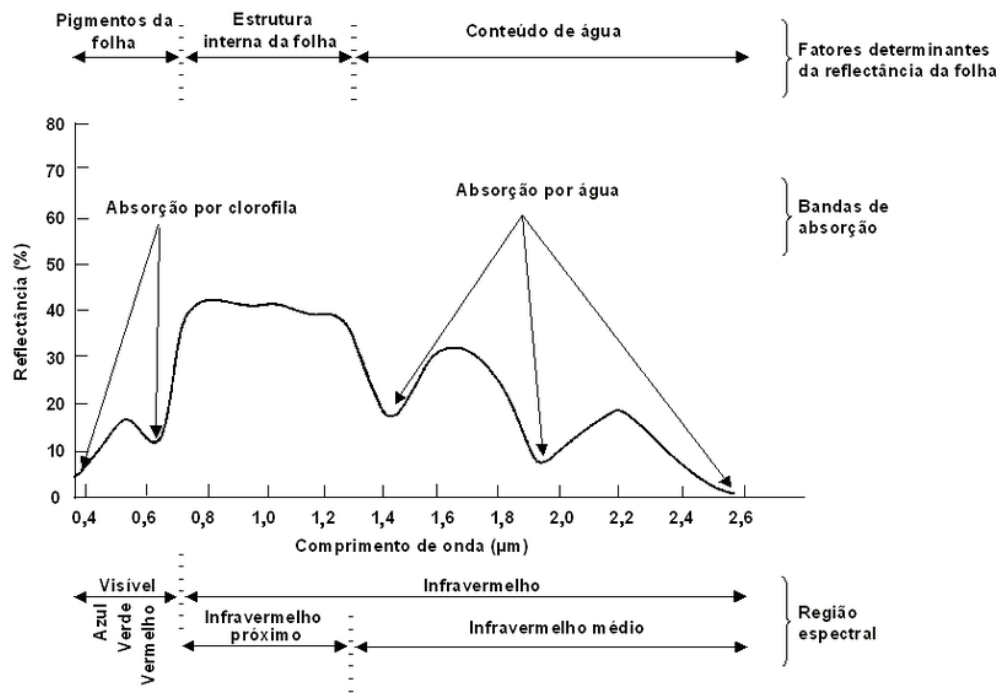


FIGURA 1. Curva típica da reflectância da vegetação. Fonte: Figueiredo (2005).

O sensoriamento remoto estuda determinadas porções do espectro eletromagnético, como a faixa do visível (400-700 nm), do infravermelho próximo (700-1300 nm) e do infravermelho emissivo (8000-14000 nm) (Figueiredo, 2005). A relação entre a reflectância na faixa do vermelho (660-700 nm) e a concentração de clorofila nas folhas é determinante na estimativa do estado nutricional das plantas em relação ao N (Gitelson & Merzlyak & Lichtenthaler, 1996), o qual pode ser estimado pela modificação da reflectância do dossel (Sembiring *et al.*, 2000), uma vez que existe uma relação inversa entre a reflectância e a quantidade de clorofila na planta (Serrano & Filella & Penuelas, 2000).

Sensores remotos, como os sensores de vegetação, permitem uma estimativa rápida, não destrutiva, econômica, confiável e representativa de toda a área do estado nutricional das plantas na lavoura (Xue *et al.*, 2004; Bajwa *et al.*, 2011). A capacidade dos sensores em captar as diferenças nutricionais que possam existir na planta, nos seus diferentes estádios de desenvolvimento, é um dos maiores determinantes da eficácia da utilização de taxas variáveis de fertilizantes, principalmente do nitrogênio (Bragagnolo & Amado & Bortolotto, 2016).

As leituras de reflectância do dossel usando duas ou mais bandas de ondas específicas são usadas para desenvolver índices de vegetação espectrais (SVI), que são expressos em formas normalizadas (por exemplo, o índice de vegetação de diferença

normalizada - NDVI). Xue *et al.* (2004) observaram que os índices de vegetação podem produzir uma estimativa precisa das propriedades biofísicas da cultura.

Entre os diversos índices de vegetação empregados no sensoriamento remoto, um dos mais utilizados é o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, obtido a partir da relação $(\rho_{ivp} - \rho_v)/(\rho_{ivp} + \rho_v)$, onde ρ_{ivp} e ρ_v se referem à reflectância do infravermelho próximo e vermelho, respectivamente. Este índice apresenta variação numérica de -1 a +1, sendo os valores positivos referentes ao vigor vegetativo da cultura, enquanto que os valores negativos indicam presença de água ou ausência de vegetação (Rouse *et al.*, 1974; Liu & Swinton & Miller, 2006; Vian, 2015). O uso do NDVI como indicador do estado nutricional da planta em relação ao N deve ser precedido pela análise da sua relação com as variáveis tradicionais usualmente utilizadas para quantificação da condição nutricional das plantas (Raun *et al.*, 2005; Cao *et al.*, 2017).

2.3.1.2 NDVI como ferramenta para prever a biomassa vegetal, N acumulado e produtividade em arroz

Vários métodos destrutivos e não destrutivos foram desenvolvidos para estabelecer o suprimento ótimo de nitrogênio através do monitoramento do estado nutricional das plantas (Tubaña *et al.*, 2011a). A quantidade de nitrogênio acumulado, o teor de N e a biomassa seca na parte aérea, apesar de serem indicadores eficientes da resposta à aplicação de fertilizantes nitrogenados, são metodologias pouco empregadas, uma vez que são destrutivas e exigentes em mão de obra para amostragens a campo, além de demandarem tempo para análise dos resultados (Bredemeier *et al.*, 2013).

A medição de variáveis do dossel durante o desenvolvimento da cultura, com o NDVI, é uma oportunidade para melhorar o rendimento de grãos, através da aplicação localizada de fertilizantes nitrogenados. Variáveis importantes neste contexto são a área foliar, a biomassa total e o nitrogênio acumulado na biomassa seca, os quais são indicadores da necessidade de N das culturas (Hansen & Schjoerring, 2003).

Sensores de vegetação, a exemplo do GreenSeeker, já são amplamente utilizados em algumas culturas comerciais ao longo das últimas décadas. A aplicação dos princípios que envolvem as medições realizadas por esses sensores pode ser observada no modelo de predição de potencial de afilhamento em trigo, criado com base no NDVI (Phillips *et al.*, 2004) e o modelo de estimativa da quantidade de N acumulada em trigo, desenvolvido por Serrano & Filella & Penuelas (2000). Na cultura do milho, Martin *et al.* (2012) observaram alta correlação entre os valores de NDVI, produção de biomassa e produtividade de grãos.

Na cana-de-açúcar, Lofton *et al.* (2012) encontraram alta correlação entre NDVI e produtividade de colmos, enquanto que Molin *et al.* (2010) e Portz & Molin & Jasper (2011) concluíram que o NDVI é um índice agrônomo eficiente visando detectar deficiências nutricionais nesta cultura.

Na cultura do arroz irrigado, Singh *et al.* (2015) relataram que o sensor óptico GreenSeeker pode prever o rendimento de grãos, através da medição de NDVI. Usando a estimativa de rendimento e o índice de resposta calculado a partir de medições de NDVI, a dose de N a ser aplicada no arroz pode ser calculada de acordo com a necessidade da cultura, o que resultou em maior eficiência de uso do N, com o uso de menores doses do fertilizante e sem reduções no rendimento de grãos, quando comparado a prática convencional de recomendação.

De acordo com Lu *et al.* (2022), o estágio de crescimento da cultura e a adubação de N são os fatores agrônômicos mais importantes para prever os indicadores do *status* de N, seguidos pelos fatores ambientais (clima e solo). As relações entre o NDVI, a biomassa na parte aérea, a quantidade N nas plantas e a produtividade de grãos variam de acordo com os estágios de crescimento do arroz (Zhou *et al.*, 2017). De acordo com Wang *et al.* (2019), realizar a combinação dessas informações em mais de um estágio da cultura possibilita encontrar o melhor momento de monitoramento do crescimento das plantas de arroz.

Padhan *et al.* (2023) e Qun *et al.* (2023) obtiveram bons resultados ao relacionar os valores de NDVI com a biomassa acumulada da parte aérea das plantas de arroz entre o final do perfilhamento e a iniciação da panícula. Yao *et al.* (2014) relatou que, no início do ciclo do arroz, a quantidade de N acumulada teve fraca relação com o NDVI, enquanto que, em estágios intermediários (entre V_7 e R_0), os valores de NDVI obtidos com o sensor GreenSeeker poderia explicar entre 73% e 76% da variação observada na biomassa aérea da cultura. Cao *et al.* (2016), entre o estágio de crescimento V_6 - R_0 , encontraram R^2 próximos a 0,70 para essa relação.

Zhang *et al.* (2019) revelaram que no estágio de sete folhas completamente expandidas, o NDVI resultou em uma boa relação com a produtividade de grãos de arroz. Entretanto, os autores destacam que, em estágios tardios de crescimento (entre R_2 e R_5), o NDVI apresentou menor eficiência na estimativa da produtividade, fato que pode ser explicado pela menor sensibilidade do índice quando a biomassa da cultura aumenta de forma significativa. Resultados semelhantes foram relatados por Cao *et al.* (2016).

Entre três a uma semana antes do estágio de iniciação da panícula (estádio R₀) do arroz, Nakano *et al.* (2023) observaram forte correlação positiva entre o NDVI medido pelo sensor GreenSeeker e o rendimento de grãos no arroz, para as diferentes doses de nitrogênio testadas. Eles também concluíram que as taxas ótimas de aplicação de N para aumentar o rendimento de grãos podem ser determinadas com base no diagnóstico de crescimento usando o NDVI, permitindo um ajuste da dose a ser aplicada. Em R₀, os valores de NDVI medidos se correlacionam positivamente com o rendimento de grãos de arroz (Harrell *et al.*, 2011; Xue *et al.*, 2014).

Islam *et al.* (2021) conseguiram prever o rendimento do arroz nas safras estudadas a partir do NDVI, com R²=0,91. Eles também destacaram que, entre os índices de vegetação testados no experimento, o NDVI foi o índice que apresentou maior correlação e precisão (R²=0,83).

Baral *et al.* (2021) reportaram que a utilização do índice NDVI, medido pelo sensor GreenSeeker, como ferramenta na tomada de decisão no manejo de N proporcionou uma eficiência agrônômica de uso de N de 93% em comparação à recomendação convencional de adubação nitrogenada. Esses resultados sugerem que a aplicação de fertilizantes nitrogenados guiada por essa ferramenta pode economizar uma quantidade significativa deste nutriente em comparação com a recomendação atual, sem comprometer a produção de grãos.

Yinyan *et al.* (2023) compararam áreas experimentais de arroz adubadas com nitrogênio seguindo a recomendação tradicional (taxa fixa) e áreas com doses diferenciadas, numa aplicação em taxa variável. Eles avaliaram o desenvolvimento das plantas ao longo do ciclo da cultura a partir do NDVI, obtido pelo sensor GreenSeeker, e concluíram que as áreas adubadas em taxa variável mostraram maior rendimento de grãos, além de apresentar uma economia significativa do fertilizante, demonstrando que é possível realizar uma aplicação variável da dose do nutriente a partir do *status* nutricional das plantas, em tempo real.

Resultados de experimentos de dez anos realizados por Lu *et al.* (2022) indicaram que o manejo preciso de N no arroz, com base no modelo de diagnóstico com índices de vegetação e recomendação personalizada de N na estação de crescimento, aumentou significativamente o rendimento de grãos do arroz.

Zhang *et al.* (2021) concluíram que o NDVI avaliado pelo sensor GreenSeeker pode ser usado como um preditor do estado nutricional da planta em relação ao N, uma vez que os resultados obtidos demonstram que o acúmulo de nitrogênio nos tecidos foi fortemente

correlacionado com os valores de NDVI. Um contraponto aos resultados obtidos por outros pesquisadores foi o encontrado por Cordero *et al.* (2018), o qual concluiu que o NDVI medido com o sensor GreenSeeker mostrou capacidade limitada de avaliar o *status* de N do arroz nas condições ambientais do estudo, devido à expressiva quantidade de biomassa produzida pela cultura, reduzindo a sensibilidade do índice em detectar a variabilidade de crescimento das plantas.

Embora a utilização de índices de vegetação já seja amplamente adotada para aplicação de N em taxa variável nas culturas do milho e trigo em diversos países (Baral *et al.*, 2021), na cultura do arroz irrigado os estudos para aplicação de nitrogênio em tempo real concentraram-se na última década. Os resultados que vêm sendo obtidos pelos pesquisadores, na sua grande maioria, são positivos e demonstram serem promissores para adoção em ampla escala nos próximos anos para aplicação de N com precisão, visando aumentar a eficiência do uso deste nutriente e a produtividade de grãos. No entanto, a eficácia das medições e dos índices obtidos depende das condições climáticas e de solo de cada local, além das características das cultivares adotadas, as quais podem interferir na precisão de tais índices. Portanto, salienta-se a importância de se realizar pesquisas considerando as condições locais as quais a cultura será submetida, permitindo a determinação do *status* nutricional de N nas plantas naquele ambiente, em tempo real, possibilitando o ajuste da dose conforme as necessidades da cultura.

2.4 Referências

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Mapeamento do arroz irrigado no Brasil**. Brasília, DF: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2020. 40 p.

ALMEIDA, T. S.; FONTANA, D. C. Desempenho dos índices de vegetação NDVI e PVI para a cultura da soja em diferentes condições hídricas e de sistema de manejo do solo. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais**. Natal: INPE, 2009. p. 17-22.

AMARAL, T. A. *et al.* Nitrogen management strategies for smallholder maize production systems: yield and profitability variability. **International Journal of Plant Production**, Cham, v. 9, n. 1, p. 75-98, 2015.

ANGHINONI, I.; CARLOS, F. S. **Manejo da adubação nitrogenada de cobertura no arroz irrigado no sul do Brasil**. Cachoeirinha: IRGA, 2019. (Circular Técnica, n. 1).

BAJWA, S. G. *et al.* Canopy reflectance response to plant nitrogen accumulation in rice. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 11, p. 488-506, 2011.

- BALIGAR, V. C. *et al.* Soil-plant interaction on nutrient efficiency in plants: an overview. *In: BALIGAR, R. V.; DUNCAN, R. R. (ed.). Crops as enhancers of nutrient use.* San Diego: Academic, 1990. p. 351-373.
- BARAL, B. R. *et al.* Real-time nitrogen management using decision support-tools increases nitrogen use efficiency of rice. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 119, p. 355–368, 2021.
- BRAGAGNOLO, J.; AMADO, T. J. C.; BORTOLOTTI, R. P. Use efficiency of variable rate of nitrogen prescribed by optical sensor in corn. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 6, n. 1, p. 103-111, 2016.
- BREDEMEIER, C. *et al.* Estimativa do potencial produtivo em trigo utilizando sensor óptico ativo para adubação nitrogenada em taxa variável. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, p. 1147-1154, 2013.
- BURESH, R. J.; WITT, C. **Site-specific nutrient management.** Paris: International Fertilizer Industry Association, 2007.
- CANTARELA, H. Nitrogênio. *In: NOVAIS, R. F et al. Fertilidade do solo.* Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 375-470.
- CAO, Q. *et al.* Improving in-season estimation of rice yield potential and responsiveness to topdressing nitrogen application with Crop Circle active crop canopy sensor. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 17, p. 136–154, 2016.
- CAO, Q. *et al.* Developing a new crop circle active canopy sensor-based precision nitrogen management strategy for winter wheat in North China Plain. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 18, p. 2-18, 2017.
- CAPELLI, N. L. **Agricultura de precisão – novas tecnologias para o processo produtivo.** [São Paulo]: LIE/DMAQAG/FEAGRI/UNICAMP, 1999. Disponível em: <http://www.bases.cnptia.embrapa.br/cria/gip/gipap/capelli.doc>. Acesso em: 10 set. 2021.
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Safra 2022/23: décimo segundo levantamento. **Acompanhamento da Safra Brasileira: grãos**, Brasília, DF, v. 10, p. 34-38, 2023a. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Acesso em: 7 set. 2023.
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Produção de arroz no Brasil. *In: CONAB. A cultura do arroz.* Brasília, DF: CONAB, 2015. p. 24-96.
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Série histórica das safras – Arroz Total (Irrigado e Sequeiro).** Brasília, DF: CONAB, 2023b. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras/itemlist/category/900-arroz>. Acesso em: 18 out. 2023.
- CORA, J. E. *et al.* Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, p. 1013-1021, 2004.

CORDERO, C. *et al.* Fertilization strategy and ground sensor measurements to optimise rice yield. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 99, p. 177-185, 2018.

FAGERIA, N. K.; STONE, L. F.; SANTOS, A. B. **Manejo do nitrogênio em arroz irrigado**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2003.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. **Advances in Agronomy**, New York, v. 88, n. 1, p. 97-185, 2005.

FIGUEIREDO, D. **Conceitos de sensoriamento remoto**. [S. l.: s. n.], 2005. Disponível em: https://www.clickgeo.com.br/wp-content/uploads/2013/04/conceitos_sm.pdf. Acesso em: 12 set. 2021.

FIXEN, P. E. The four rights within a global fertilizer best management practices framework. *In*: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2010. p. 1-22.

GITELSON, A. A.; MERZLYAK, M. N.; LICHTENTHALER, H. K. Detection of red edge position and chlorophyll content by reflectance measurements near 700 nm. **Journal of Plant Physiology**, Stuttgart, v. 148, p. 501–508, 1996.

GROHS, M. *et al.* Resposta à expectativa de adubação das cultivares de arroz irrigado. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 11., 2019, Balneário Camburiú. **Anais**. Porto Alegre: SOSBAI, 2019.

HARRELL, D. L. *et al.* Estimating rice grain yield potential using normalized difference vegetation index. **Agronomy Journal**, Madison, v. 103, p. 1717–1723, 2011.

HANSEN, P. M.; SCHJOERRING, J. K. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 86, p. 542-553, 2003.

IRRI – INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE. **Annual report 2019: race for impact**. Manila: IRRI, 2019. Disponível em: <https://www.irri.org/resources-and-tools/publications#annual-reports>. Acesso em: 7 set. 2021.

ISLAM, M. D. *et al.* Development of remote sensing-based yield prediction models at the maturity stage of boro rice using parametric and nonparametric approaches. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, Amsterdam, v. 22, [art.] 100494, 2021.

JULIANO, B. O. **Rice in human nutrition**. Rome: FAO, 1993. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/t0567e/T0567E00.htm#Contents>. Acesso em: 7 set. 2021.

KHANAL, S. *et al.* An overview of current and potential applications of thermal remote sensing in precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 139, p. 22-32, 2017.

KNOBLAUCH, R. *et al.* Ammonia volatilization in waterlogged soils influenced by the form of ureia application. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 36, p. 813-821, 2012.

- LIN, F. F. *et al.* Investigation of SPAD meter-based indices for estimating rice nitrogen status. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 71, p. S60-S65, 2010. Supl. 1.
- LIU, Y.; SWINTON, S. M.; MILLER, N. R. In site-specific yield response consistent over time? Does it pay? **American Journal of Agricultural Economics**, St. Paul, v. 88, n. 2, p. 471-483, 2006.
- LOFTON, J. *et al.* Predicting sugarcane response to nitrogen using a canopy reflectance-based response index value. **Agronomy Journal**, Madison, v. 104, n. 1, p. 106-113, 2012.
- LU, J. *et al.* Improving active canopy sensor-based in-season rice nitrogen status diagnosis and recommendation using multi-source data fusion with machine learning. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 380, pt. 1, [art.] 134926, 2022.
- MARSCHNER, H.; MARSCHNER, P. **Mineral nutrition of higher plants**. 3rd ed. London: Academic Press, 2012.
- MARTIN, K. L. *et al.* By-plant prediction of corn grain yield using optical sensor readings and measured plant height. **Journal of Plant Nutrition**, Athens, v. 35, n. 9, p. 1429-1439, 2012.
- MARZARI, V. **Influência da população de plantas, doses de nitrogênio e controle de doenças na produção e qualidade de grãos e sementes de arroz irrigado**. 2005. 75 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.
- MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. (org.). **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília, DF: UnB/CNPq, 2012. Disponível em: <http://memoria.cnpq.br/documents/10157/56b578c4-0fd5-4b9f-b82a-e9693e4f69d8>. Acesso em: 10 set. 2021.
- MENEZES, V. G. *et al.* **Projeto 10: estratégias de manejo para aumento da produtividade e sustentabilidade da lavoura de arroz irrigado do RS: avanços e novos desafios**. Cachoeirinha: IRGA, 2012.
- MOLIN, J. P. **Agricultura de precisão: o gerenciamento da variabilidade**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2001. 83 p.
- MOLIN, J. P. *et al.* Capacidade de um sensor óptico em quantificar a resposta da cana-de-açúcar a doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 12, p. 1345-1349, 2010.
- MORAIS, E. C. **Fundamentos de sensoriamento remoto**. São José dos Campos: INPE, 2002. (INPE-8984-PUD/62). Disponível em: http://mtcm12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2005/06.14.12.18/doc/CAP1_ECMoraes.pdf. Acesso em: 10 set. 2021.

- NAKANO, H. *et al.* Predicting rice grain yield using normalized difference vegetation index from UAV and GreenSeeker. **Crop and Environment**, London, v. 2, n. 2, p. 59-65, 2023.
- NTECH INDUSTRIES. **Greenseeker manuals downloads**. [S. l.]: Ntech Industries, 2013. Disponível em: <https://agriculture.trimble.com/product/greenseeker-system/>. Acesso em: 19 out. 2021.
- PADHAN, B. K. *et al.* Variation in nitrogen partitioning and reproductive stage nitrogen remobilization determines nitrogen grain production efficiency (NUEg) in diverse rice genotypes under varying nitrogen supply. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 14, [art.] 1093581, 2023.
- PENG, S.; TANG, Q.; ZOU, Y. Current status and challenges of rice production in China. **Plant Production Science**, Kyoto, v. 12, n. 1, p. 3-8, 2009.
- PHILLIPS, S. B. *et al.* Estimating winter wheat tiller density using spectral reflectance sensors for early-spring, variable-rate nitrogen applications. **Agronomy Journal**, Madison, v. 96, p. 591-600, 2004.
- POLETO, N. **Disponibilidade de nitrogênio no solo e sua relação com o manejo da adubação nitrogenada**. 2004. 119 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- PORTZ, G.; MOLIN, J. P.; JASPER, J. Active crop sensor to detect variability of nitrogen supply and biomass on sugarcane fields. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 13, n. 1, p. 33-44, 2011.
- QUN, Z. *et al.* Grain yield, nitrogen use efficiency and physiological performance of indica/japonica hybrid rice in response to various nitrogen rates. **Journal of Integrative Agriculture**, Beijing, v. 22, p. 63-79, 2023.
- RAUN, W. R. *et al.* Optical sensor-based algorithm for crop nitrogen fertilization. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 36, p. 2759-2781, 2005.
- RIBAS, G. G. *et al.* Assessing yield and economic impact of introducing soybean to the lowland rice system in southern Brazil. **Agricultural Systems**, Barking, v. 188, [art.] 103036, 2021.
- ROUSE, J. W. Jr. *et al.* Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: EARTS RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 3., 1973, Washington, D. C. **The proceedings of a [...]**. Washington, D.C.: NASA, 1974. v. 1, paper A20, p. 309-317.
- SATHIYA, K.; RAMESH, T. Effect of split application of nitrogen on growth and yield of aerobic rice. **Asian Journal of Experimental Sciences**, Madhya Pradesh, v. 23, n. 1, p. 303-306, 2009.

SCIVITTARO, W. B. *et al.* **Adubação nitrogenada e potássica para cultivares de arroz irrigado**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, dez. 2018. (Circular Técnica, n. 197).

SEMBIRING, H. *et al.* Effect of growth stage and variety on spectral radiance in winter wheat. **Journal of Plant Nutrition**, Athens, v. 23, p. 141–149, 2000.

SERRANO, L.; FILELLA, I.; PENUELAS, J. Remote sensing of biomass and yield of winter wheat under different nitrogen supplies. **Crop Science**, Madison, v. 40, p. 723–731, 2000.

SINGH, S. P.; PILLAI, K. G. Response of scented rice varieties to nitrogen. **Oryza**, Cuttack, v. 33, n. 3/4, p. 193–195, 1996.

SINGH, B. *et al.* Site-specific fertilizer nitrogen management in irrigated transplanted rice (*Oryza sativa*) using an optical sensor. **Precision Agriculture**, Dordrecht, 16, p. 455–475, 2015.

SOSBAI - SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Santa Maria: SOSBAI, 2005. 159 p.

SOSBAI - SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Pelotas: SOSBAI, 2007. 164 p.

SOSBAI - SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Bento Gonçalves: SOSBAI, 2014. 179 p.

SOSBAI - SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Farroupilha: SOSBAI, 2018. 205 p.

SOSBAI - SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Restinga Seca: SOSBAI, 2022. 199 p.

SWARBRECK, S. M. *et al.* A roadmap for lowering crop nitrogen requirement. **Trends in Plant Science**, Kidlington, v. 24, n. 10, p. 892–904, 2019.

TAIZ, L. *et al.* **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

TSCHIEDEL, M.; FERREIRA, M. Introdução à agricultura de precisão: conceitos e vantagens. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n. 1, p. 159–163, 2002.

TUBAÑA, B. *et al.* Midseason nitrogen fertilization rate decision tool for rice using remote sensing technology. **Better Crops**, [s. l.], v. 95, n. 1, p. 22–24, 2011a.

TUBAÑA, B. *et al.* Relationships of spectral vegetation indices with rice biomass and grain yield at different sensor view angles. **Agronomy Journal**, Madison, v. 103, p. 1405–1403, 2011b.

USDA - UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Production, supply and distribution**. Washington, DC: USDA, 2023. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/compositeViz>. Acesso em: 12 jul. 2023.

VALENTE, G. B. *et al.* Fracionamento da adubação nitrogenada em cultivar de ciclo médio de arroz irrigado em gleissolo. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO*, 11., 2019, Balneário Camburiú. **Anais**. Porto Alegre: SOSBAI, 2019.

VLECK, P. L. G.; CRASWELL, E. T. Ammonia volatilization from flooded soils. **Fertilizer Research**, The Hague, v. 2, p. 27-245, 1981.

VIAN, A. L. **Sensores de vegetação para estimativa in situ do potencial produtivo na cultura do milho**. 2015. 68 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

WANG, F. *et al.* Rice yield estimation using parcel-level relative spectral variables from UAV-based hyperspectral imagery. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 10, [art.] 453, 2019.

XUE, L. *et al.* Monitoring leaf nitrogen status in rice with canopy spectral reflectance. **Agronomy Journal**, Madison, v. 96, p. 135-142, 2004.

XUE, L. *et al.* Topdressing nitrogen recommendation for early rice with an active sensor in South China. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 15, p. 95–110, 2014.

YAO, Y. *et al.* In-season estimation of rice nitrogen status with an active crop canopy sensor. **Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, Piscataway, v. 7, p. 4403-4413, 2014.

YINYAN, S. *et al.* Efficiency analysis and evaluation of centrifugal variable-rate fertilizer spreading based on real-time spectral information on rice. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 204, [art.] 107505, 2023.

YOSEFTABAR, S. Effect nitrogen management on panicle structure and yield in rice (*Oryza sativa* L.). **International Journal of Agriculture and Crop Sciences**, London, v. 5, p. 1224-1227, 2013.

ZHANG, K. *et al.* Predicting rice grain yield based on dynamic changes in vegetation indexes during early to mid-growth stages. **Remote Sensing**, Basel, v. 11, n. 4, [art.] 387, 2019.

ZHANG, K. *et al.* A new canopy chlorophyll index-based paddy rice critical nitrogen dilution curve in eastern China. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 266, [art.] 108139, 2021.

ZHOU, X. *et al.* Predicting grain yield in rice using multi-temporal vegetation indices from UAV-based multispectral and digital imagery. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdam, v. 130, p. 246-255, 2017.

3 CAPÍTULO 1

Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), para a estimativa de parâmetros biofísicos relacionados ao nitrogênio, em arroz irrigado.

3.1 Introdução

O nitrogênio é um nutriente essencial aos vegetais. Destaca-se pela quantidade elevada em que é requerido e pelas severas limitações provocadas ao crescimento das plantas quando deficiente, uma vez que é constituinte de muitos componentes celulares além de desempenhar importantes funções bioquímicas e fisiológicas no metabolismo vegetal (Marschner & Marschner, 2012; Taiz *et al.*, 2017).

Na cultura do arroz irrigado, o nitrogênio é o nutriente de maior importância, sendo responsável pelo aumento no rendimento de grãos e pela maximização dos componentes do rendimento, como o número de perfilhos e de panículas por unidade de área (Singh & Pillai, 1996), o número de espiguetas por panícula e o peso de grãos (Marzari, 2005).

Apesar da importância crucial para as plantas, o N é um dos nutrientes mais difíceis de serem manejados eficientemente na agricultura (Amaral *et al.*, 2015). A quantidade requerida de nitrogênio pelas plantas pode variar à medida que elas crescem e se desenvolvem, sendo fundamental determinar os níveis de nutrientes em determinados estádios de desenvolvimento. Embora o arroz absorva nitrogênio durante todo o seu ciclo, as exigências são maiores nas fases de perfilhamento e início da fase reprodutiva (Scivittaro *et al.*, 2018).

Atualmente, as doses de nitrogênio (N) recomendadas para o arroz são baseadas em poucos indicadores, levando em consideração o suprimento exercido pelo solo, sem considerar o *status* de nitrogênio da cultura. Para tornar mais eficiente a aplicação de nitrogênio na cultura do arroz, é de suma importância estimar o *status* nutricional das plantas em relação ao nitrogênio durante o ciclo de desenvolvimento da cultura.

A quantidade de biomassa acumulada e nitrogênio acumulado no tecido vegetal pelas plantas são indicadores típicos do estado fisiológico da cultura e refletem no acúmulo de nutrientes no arroz (Li *et al.*, 2020; Xu *et al.*, 2023), sendo uma forma precisa de expressar a possível resposta da planta ao N aplicado (Tubaña *et al.*, 2011). Entretanto, sua amostragem a campo e o processo de determinação laboratorial são demorados e de custo elevado, o que acaba limitando sua aplicação.

Nesse contexto, ferramentas do sensoriamento remoto, como os sensores de vegetação, podem auxiliar na estimativa do *status* nutricional da cultura, em tempo real, ao longo do desenvolvimento das plantas, à campo, realizando um monitoramento não destrutivo, não invasivo, rápido e econômico e correlacionado com características agrônomicas e fisiológicas importantes das culturas, através de índices de vegetação.

Um dos índices mais utilizados para essa finalidade é o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), que é obtido a partir da relação $(\rho_{ivp} - \rho_v)/(\rho_{ivp} + \rho_v)$, onde ρ_{ivp} e ρ_v se referem à reflectância do infravermelho próximo e vermelho, respectivamente. Este índice apresenta variação numérica de -1 a +1, sendo os valores positivos referentes ao vigor vegetativo da cultura, enquanto que os valores negativos indicam presença de água ou ausência de vegetação (Rouse *et al.*, 1974; Liu & Swinton & Miller, 2006; Vian, 2015).

A medição de variáveis do dossel durante o desenvolvimento da cultura com o NDVI é uma oportunidade para detecção da variabilidade do estado nutricional das plantas de arroz irrigado, fornecendo uma alternativa no manejo da adubação nitrogenada na cultura. Estabelecer as relações quantitativas de reflectância do dossel, biomassa e quantidade de nitrogênio acumulada nas plantas é o primeiro passo para integrar o uso do NDVI como indicador do estado nutricional da planta em relação ao N.

Resultados promissores vêm sendo encontrados por diversos autores nos últimos anos. Padhan *et al.* (2023) e Qun *et al.* (2023) relataram boas relações entre o NDVI e a biomassa acumulada e o NDVI com o nitrogênio acumulado nas plantas de arroz. Forte relação entre o NDVI e o rendimento de grãos da cultura foram constatados por Zhang *et al.* (2019), Baral *et al.* (2021), Islam *et al.* (2021), Nakano *et al.* (2023) e Nakano *et al.* (2023).

Posto isto, o objetivo do presente estudo foi determinar a dinâmica de acúmulo de biomassa seca, quantidade de nitrogênio acumulado na parte aérea e o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) em diferentes estádios fenológicos, buscando avaliar, através destas variáveis, o *status* nutricional das plantas de arroz em relação ao N, comparando técnicas destrutivas de obtenção de dados com as leituras do NDVI realizadas pelo sensor óptico GreenSeeker.

3.2 Material e métodos

3.2.1 Localização e caracterização do local de execução do experimento

Os trabalhos de campo foram conduzidos nas safras de 2021/2022 e 2022/2023, na Estação Experimental do Arroz (EEA/IRGA), localizada no município de Cachoeirinha (RS), nas coordenadas de 29°55'30'' de latitude sul e 50°58'21'' de longitude oeste.

O município de Cachoeirinha está localizado na região fisiográfica Depressão Central do Estado do Rio Grande do Sul (RS). Segundo a classificação de Köppen, o clima é caracterizado como subtropical úmido (Cfa), com precipitação pluvial e temperatura média anual de 1.470,4 mm e 19,6 °C, respectivamente. O solo da área experimental é classificado como Gleissolo Háptico Distrófico Típico (Santos *et al.*, 2013).

Os dados meteorológicos, disponibilizados pela Estação Meteorológica Automática do Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA, 2023b), referente à radiação solar, precipitação pluvial e temperatura do ar, nas safras estudadas, estão apresentados na Figura 1 e 2, respectivamente.

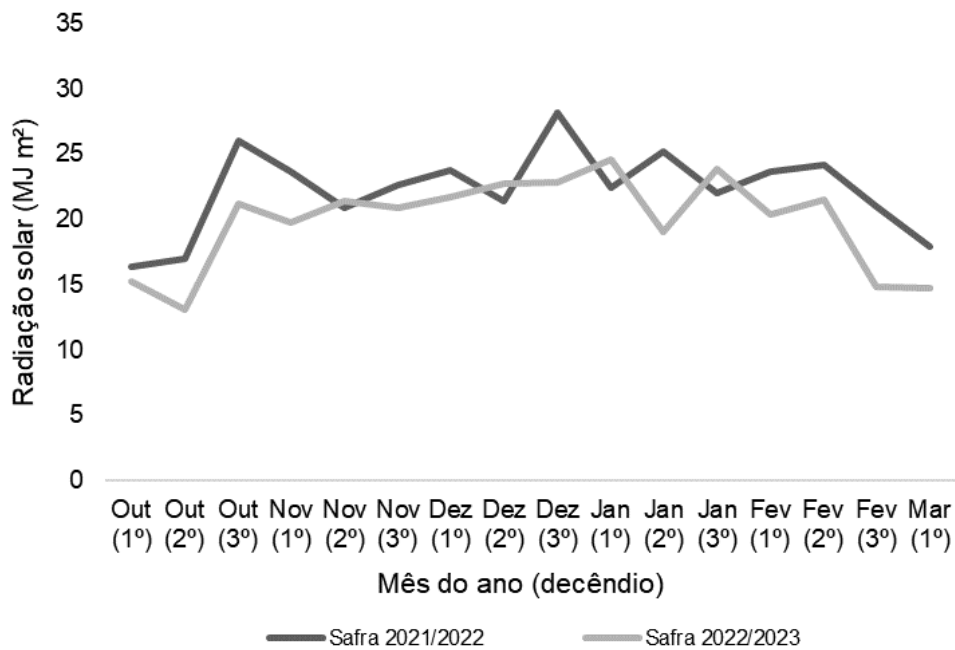


FIGURA 1. Radiação solar (MJ m²) nas safras 2021/2022 e 2022/2023 na Estação Experimental do Arroz (EEA/IRGA).

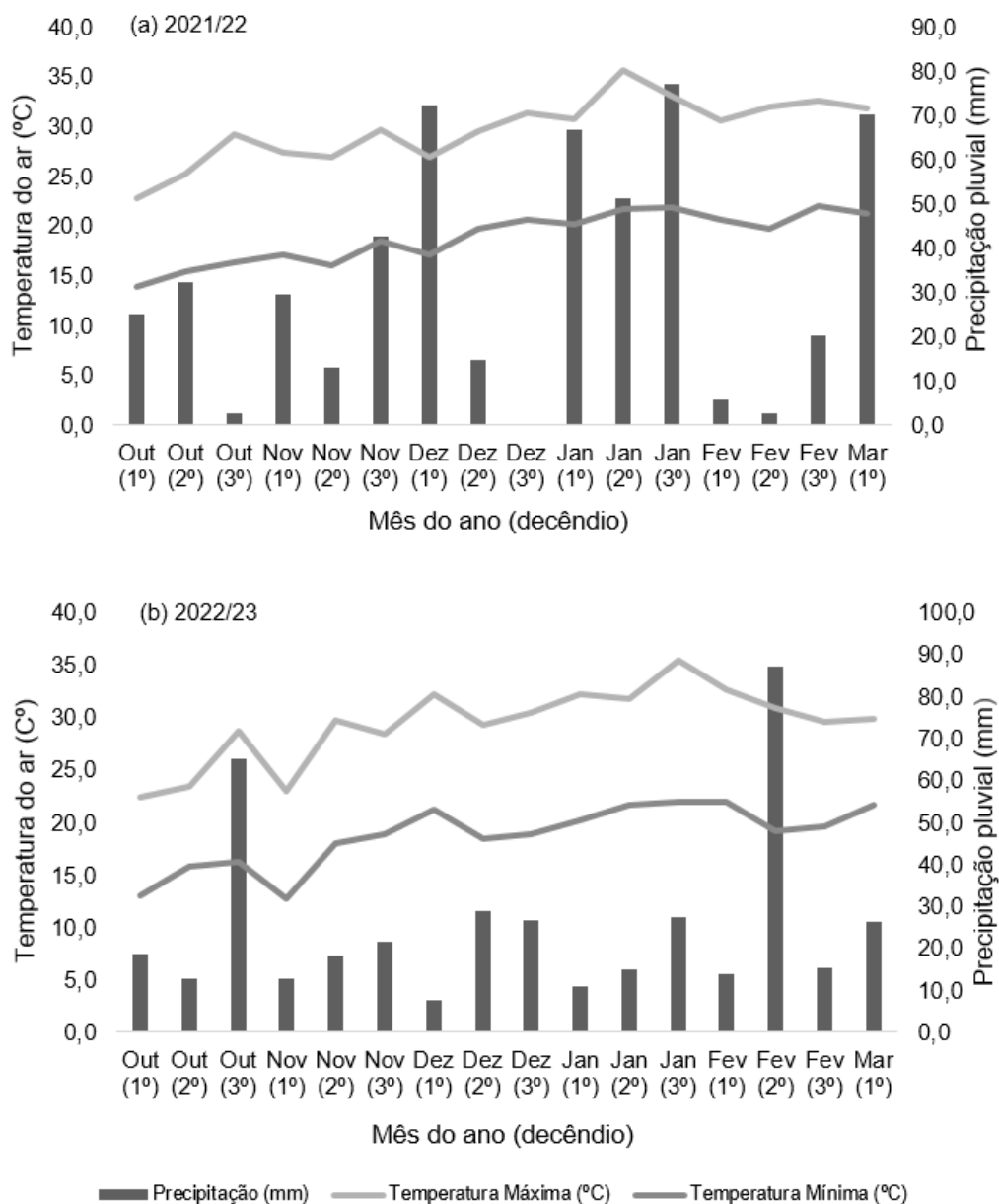


FIGURA 2. Temperaturas médias mínima e máxima e precipitação pluvial nas safras 2021/2022 (a) e 2022/2023 (b) na Estação Experimental do Arroz (EEA/IRGA).

3.2.2 Caracterização do experimento

O experimento foi conduzido com a cultivar IRGA 424 RI e diferentes doses de adubação nitrogenada em cobertura (0, 60, 120, 180 e 240 kg N ha⁻¹), parceladas em duas épocas.

A escolha por essa cultivar deu-se pela importância da mesma para a orizicultura, uma vez que a cv. IRGA 424 RI foi a cultivar com maior área plantada na safra 2020/2021, ano de início do experimento, detendo 49% da área (IRGA, 2021). Atualmente, esta cultivar ocupa 55% da área cultivada em lavouras comerciais (IRGA, 2023a). Em relação

aos níveis de adubação nitrogenada, a escolha pela aplicação dessas doses foi para gerar variabilidade de crescimento entre as plantas, ao longo do ciclo da cultura, permitindo que se constate diferenças no *status* de N.

Os tratamentos foram alocados no delineamento experimental de blocos casualizados, com quatro repetições, totalizando 20 unidades experimentais. A unidade experimental correspondeu a nove linhas com 7 m de comprimento e espaçamento entrelinhas de 0,17 m, totalizando 10,70 m².

Na safra 2021/2022, a semeadura do arroz foi realizada no dia 11 de outubro de 2021, com emergência em 26 de outubro de 2021 e, na safra 2022/2023, no dia 18 de outubro de 2022, com emergência das plantas no dia 29 de outubro de 2022. As sementes foram tratadas com permit e a densidade de semeadura adotada foi de 105 kg ha⁻¹ nas duas safras. Em ambas as safras o sistema adotado foi o de cultivo mínimo, após 30 dias da dessecação das plantas voluntárias presentes na área experimental e roçada da mesma.

A adubação de base para o primeiro ano de experimento foi de 64 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 102 kg ha⁻¹ de K₂O, por ocasião da semeadura. No segundo ano, a adubação de base correspondeu a 68 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 108 kg de ha⁻¹ K₂O, ambas considerando análise de solo. A dose alta de recomendação para fósforo e potássio foi devido aos tratamentos com adubação nitrogenada, visando garantir que os demais nutrientes não fossem limitantes à cultura e não afetassem as variáveis avaliadas.

O parcelamento do N em cobertura deu-se pela aplicação de ureia em ²/₃ da respectiva dose no estágio V₃, conforme indicações técnicas da cultura e ¹/₃ no estágio V₈₋₉, nesse caso, visando que as plantas tivessem a máxima disponibilidade de N antes da formação da panícula. Na primeira safra, a aplicação da primeira dose foi realizada no dia 08 de novembro de 2021 e, a segunda aplicação, com o restante da dose, no dia 07 de dezembro de 2021. No segundo ano de experimento, a primeira dose foi aplicada no dia 17 de novembro de 2022 e a segunda no dia 14 de dezembro de 2022. Em ambas as safras, a entrada de água para irrigação por inundação deu-se no mesmo dia da aplicação da primeira dose de ureia (estádio V₃). A água utilizada em ambos os anos de experimento foi proveniente do açude da estação.

Os tratos culturais visando o controle de plantas daninhas estão descritos na Tabela 1 e 2. Conforme as indicações técnicas da cultura do arroz irrigado, não foi necessário realizar o controle de pragas, pois o nível de dano econômico não foi atingido com a população de insetos presentes, em ambos os anos, na área do experimento. Também não foi realizado o manejo de doenças, devido às características da cultivar escolhida, que

apresenta boa tolerância às principais doenças do arroz e também porque não havia pressão de inóculo na área para desenvolvimento das mesmas.

TABELA 1. Manejo de plantas daninhas na área experimental, safra 2021/2022.

Data	Manejo	Herbicidas utilizados
17/09/2021	Dessecação pré-semeadura	Glifosato (4 L ha ⁻¹) + Finale (3 L ha ⁻¹)
19/10/2021	Aplicação no “ponto de agulha”	Glifosato (3,5 L ha ⁻¹) + Gamit (1,5 L ha ⁻¹)
08/11/2021	Aplicação pós-emergência	Ricer (200 mL ha ⁻¹) + Clincher (2,5 L ha ⁻¹) + Assist (1,5 L ha ⁻¹)

TABELA 2. Manejo de plantas daninhas na área experimental, safra 2022/2023.

Data	Manejo	Herbicidas utilizados
23/09/2022	Dessecação pré-semeadura	Glifosato (4 L ha ⁻¹) + Poquer (0,8 L ha ⁻¹) + Óleo mineral (150 mL ha ⁻¹)
21/10/2022	Aplicação no “ponto de agulha”	Glifosato (3,5 L ha ⁻¹) + Gamit (1,5 L ha ⁻¹)
18/11/2022	Aplicação pós-emergência	Ricer (200 mL ha ⁻¹) + Clincher (2,0 L ha ⁻¹) + Assist (0,5 L ha ⁻¹)

A colheita ocorreu de forma manual, em área útil de 5 linhas de dois metros de comprimento (área de 1,7 m²), em 23 de fevereiro de 2022 e 13 de março de 2023, no primeiro e segundo ano do experimento, respectivamente.

3.2.3 Variáveis analisadas

3.2.3.1 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)

O índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) foi avaliado pelo sensor ativo de dossel Greenseeker. Seu funcionamento é baseado em diodos de emissão de radiação na faixa do vermelho e do infravermelho próximo (770 nm), onde a radiação emitida no dossel da cultura é refletida e, então, medida por um fotodiodo do equipamento. Os dados gerados a partir destas informações são calculados por um microprocessador interno, e assim, fornecem o valor do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) (Ntech Industries, 2013).

Foram realizadas três leituras do índice, sendo estas nos estádios de cinco folhas completamente expandidas (estádio V₅), oito folhas completamente expandidas (estádio V₈) e diferenciação da panícula (estádio R₁) em todo o comprimento da linha central de

cada parcela. O aparelho foi posicionado paralelamente às linhas da cultura, em uma altura entre 0,8 e 1,0 m acima do topo do dossel. As leituras foram realizadas por ocasião do deslocamento linear do equipamento sobre a unidade experimental e largura útil captada pelo sensor (0,7 m). Após o acionamento do sensor, são realizadas as leituras a cada 0,1 segundo, totalizando cerca de 60 pontos medidos em toda a extensão da unidade experimental.

3.2.3.2 Determinação do acúmulo de biomassa e nitrogênio na parte aérea

O rendimento de massa seca da parte aérea foi avaliado em três estádios de desenvolvimento da cultura (V_5 , V_8 e diferenciação da panícula - R_1). A coleta da biomassa foi realizada em uma área correspondente a $0,25 \text{ m}^2$ (3 linhas de 0,5 m). Após a coleta, as amostras foram acondicionadas em sacos de papel Kraft e secas em estufa de circulação de ar forçado à temperatura de 65°C , até atingirem o peso constante, que foi obtido após cinco dias. O valor obtido a partir da pesagem das amostras de biomassa foi extrapolado para hectare (kg ha^{-1}).

Após a pesagem da biomassa, foi determinado o teor de N total no tecido vegetal, pelo método do semi-micro-Kjeldahl, conforme descrito por Tedesco *et al.* (1995). O N acumulado na parte aérea (kg ha^{-1}) foi obtido a partir da multiplicação entre o teor de N no tecido vegetal e o rendimento de massa seca.

3.2.4 Análise estatística

Os dados foram previamente analisados para detectar a presença de *outliers*. Posteriormente, foi realizado o teste de normalidade dos resíduos e homogeneidade das variâncias, os quais atenderam os pressupostos da análise paramétrica, sendo então submetidos à análise de variância pelo teste F ($p \leq 0,05$). Foi realizada análise de regressão, com o auxílio do programa estatístico Sigma Plot versão 14.0, sendo a quantidade de nitrogênio acumulada no dossel, a biomassa da parte aérea e o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) as variáveis dependentes (eixo Y) e a quantidade de nitrogênio aplicada a variável independente (eixo X), em três estádios fenológicos diferentes (V_5 , V_8 e R_1).

Posteriormente foi realizada a análise de regressão, para verificar a relação entre o NDVI e a biomassa da parte aérea e o nitrogênio acumulado nestes estádios. Nesse caso, o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) foi a variável independente (eixo

X) enquanto que as variáveis dependentes (eixo Y) foram a biomassa acumulada e a quantidade de nitrogênio nas plantas de arroz.

Além disso, para permitir que os dados fossem submetidos à análise de regressão única, buscando um modelo para avaliar ambos os anos do experimentos de forma conjunta, os valores de NDVI, biomassa seca e nitrogênio acumulado foram normalizados, usando os valores médios de cada experimento em função dos valores absolutos de cada tratamento (Amaral *et al.*, 2015). Os dados normalizados são expressos em porcentagem e foram obtidos com base na relação entre o valor absoluto obtido para a variável analisada e seu valor médio calculado no experimento considerando todos os tratamentos, para cada ano individualmente. Este conceito é equivalente ao rendimento de grãos normalizado proposto por Vian *et al.* (2018) e Molin (2002) para a comparação da variabilidade espacial da produtividade de grãos em uma determinada área.

A partir disso, foi realizada a análise de regressão integrando ambos os anos. Com a obtenção da curva de regressão única, foram determinados valores críticos, os quais foram utilizados na geração de classes de desenvolvimento da cultura, baseado na resposta às doses de N utilizadas. Os dados normalizados foram classificados nas seguintes classes, conforme os intervalos do valor da variável em questão em relação à média do experimento para a mesma variável: Baixo (<90% da média), Médio (entre 90 e 110% da média) e Alto (>110% da média) geral do experimento.

3.3 Resultados e Discussão

As diferentes doses de nitrogênio utilizadas foram capazes de gerar variabilidade de crescimento entre as plantas. Verificou-se efeito significativo ($P \leq 0,05$) das doses de nitrogênio aplicadas em cobertura para as variáveis biomassa acumulada, nitrogênio acumulado na parte aérea e o índice de vegetação por diferença normalizada nos estádios estudados.

A biomassa da parte aérea é um indicador típico do estado fisiológico da cultura e reflete o acúmulo de nutrientes no arroz (Li *et al.*, 2020). A dinâmica do acúmulo de biomassa seca na parte aérea do arroz em função das doses de N aplicadas em cobertura para os estádios de cinco folhas completamente expandidas (V_5), oito folhas completamente expandidas (V_8) e diferenciação da panícula (R_1), pode ser observado na Figura 3. Observou-se similaridade no progresso de acúmulo de biomassa em ambos os anos estudados.

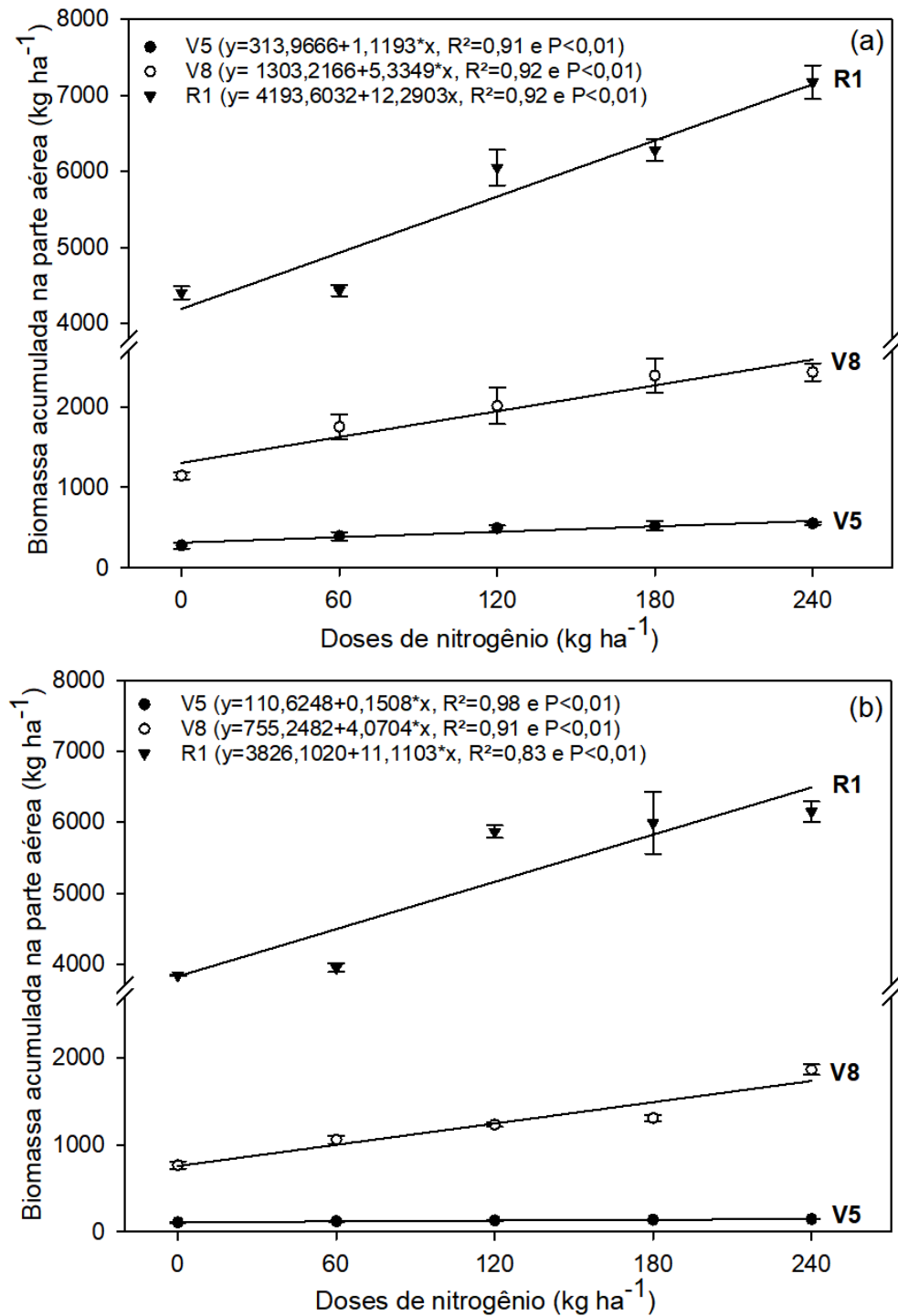


FIGURA 3. Biomassa acumulada na parte aérea de plantas de arroz, nos estádios V₅, V₈ e na diferenciação da panícula (R₁), em função de doses de nitrogênio aplicadas em cobertura, nas safras 2021/22 (a) e 2022/23 (b). Barras indicam o erro padrão da média.

Os resultados evidenciaram que a dinâmica de acúmulo de biomassa é mais lenta no início do ciclo, no estágio de cinco folhas completamente expandidas (V₅), onde as diferenças entre as doses de nitrogênio aplicadas e quantidade de biomassa acumulada são menores, quando comparado com estádios mais avançados, onde há diferenças evidentemente maiores entre a biomassa acumulada e as doses de N.

Na safra 2021/22, nos três estádios estudados, o modelo de regressão linear foi aquele que apresentou melhor ajuste para a relação entre a biomassa acumulada e a dose de nitrogênio aplicada, com elevados coeficientes de determinação, onde para o estádio V₅, 91% da variabilidade da biomassa observada pode ser explicada pelas doses de nitrogênios utilizadas, enquanto que, para os estádios V₈ e R₁, 92% da variabilidade da biomassa é justificada pelas doses de N (Figura 3a). Na safra 2022/23, altos coeficientes de determinação de $R^2=0,98$, $R^2=0,91$ e $R^2= 0,83$ também foram verificados para a relação entre a biomassa acumulada e a dose de N aplicada em cobertura para os estádios V₅, V₈ e R₁, respectivamente. Da mesma forma que para o primeiro ano, o modelo de regressão linear foi aquele que apresentou melhor ajuste nas três situações (Figura 3b). Em ambos os anos, coeficientes positivos e fortes de correlação foram encontrados, sendo na primeira safra, acima de $r=0,95$ e, na segunda safra, acima de $r=0,91$, demonstrando a resposta linear e positiva do nitrogênio no crescimento da cultura.

A baixa disponibilidade de N nas plantas resulta em menor área foliar, teor de clorofila e produção de biomassa, levando à redução do crescimento e produtividade da cultura (Lin *et al.*, 2010) conforme constatado no presente estudo, onde tratamentos sem N ou com menores doses tiveram um baixo acúmulo de biomassa, reflexo da deficiência do nutriente na planta, que manteve seu crescimento em função da disponibilidade de nitrogênio do solo.

A produção, acumulação e distribuição de biomassa nas plantas depende principalmente da fotossíntese foliar e da capacidade de assimilação de CO₂ (Chen *et al.* 2023), onde a taxa fotossintética é dependente, em grande parte, da concentração de nitrogênio nas plantas (Cao *et al.* 2017b). O maior acúmulo de biomassa apresentado nas plantas de arroz (Figura 3), é resultado do efeito positivo que o nitrogênio tem no aumento do número de perfilhos, associado ao crescimento da altura das plantas, área foliar e espessura foliar que proporcionam quantidades de biomassa aérea elevadas (Padhan *et al.*, 2023). Resultados similares foram encontrados por Chen *et al.* (2023) onde, para doses disponibilizadas de N superiores a 150 kg ha⁻¹, a biomassa seca das plantas de arroz, no período reprodutivo, chegou a mais de 8.000 kg ha⁻¹. Cao *et al.* (2017), Padhan *et al.* (2023) e Qun *et al.* (2023) também obtiveram resultados semelhantes, com incrementos na biomassa da parte aérea das plantas de arroz com aumento das doses de N aplicadas.

Apesar da similaridade da relação do acúmulo de biomassa em função das doses de N aplicadas e dos estádios de crescimento avaliados, diferenças na quantidade da massa seca foram encontradas nas safras estudadas (Figura 3), evidenciando a influência do ano,

principalmente em relação às variáveis climáticas, no desenvolvimento e crescimento do arroz. No segundo ano de estudo condições ideais de desenvolvimento para o arroz não foram observadas à campo, diferindo da primeira safra que apresentou condições de precipitação, luminosidade e temperatura dentro do esperado para o desenvolvimento da cultura. Durante a safra 2022/23 menores acumulados de precipitação foram registrados (Figura 3), o que levou a uma redução da disponibilidade de água para manter a lâmina de irrigação, entre V₇ e R₄, com alternância entre solo seco e com lâmina levando a perdas de nutrientes, como o nitrogênio (Knoblauch *et al.*, 2011), principalmente em relação a segunda aplicação em cobertura e estresse hídrico nas plantas. Ainda, menor disponibilidade de radiação solar também foi registrada nesta safra, diminuindo a atividade fotossintética e a capacidade de assimilação de nitrogênio, implicando, principalmente, na quantidade de biomassa e N acumulado (Luan *et al.*, 2009), o que pode justificar as diferenças de um ano para o outro. Duan *et al.* (2021) também identificaram diferenças na dinâmica de acúmulo de biomassa em anos e locais com diferenças climáticas, principalmente em anos com maior nebulosidade e temperaturas mais baixas.

A quantidade de nitrogênio acumulado na biomassa das plantas também é considerada um bom indicador para verificar o *status* nutricional da cultura em relação a este nutriente (Fageria & Baligar, 2005). De acordo com Carvalho *et al.* (2016), a variação da quantidade de nitrogênio acumulada no dossel está ligada com a disponibilidade do N no solo, pois, quando houver variabilidade do nutriente no solo, haverá diferenças no acúmulo deste nas plantas.

Na Figura 4 é apresentada a dinâmica de acúmulo de N na parte aérea das plantas de arroz em função das doses de N aplicadas, para as safras 2021/22 e 2022/23. Entre os anos avaliados, verificou-se comportamento similar na marcha de absorção de N, sendo que o modelo de regressão que apresentou o melhor ajuste, nos três estádios avaliados, foi o linear, com elevados coeficientes de determinação em todos estádios avaliados (Figura 4a e 4b). Coeficientes de correlação acima de 0,92 e acima de 0,98, foram encontrados para a primeira e segunda safra estudada, respectivamente.

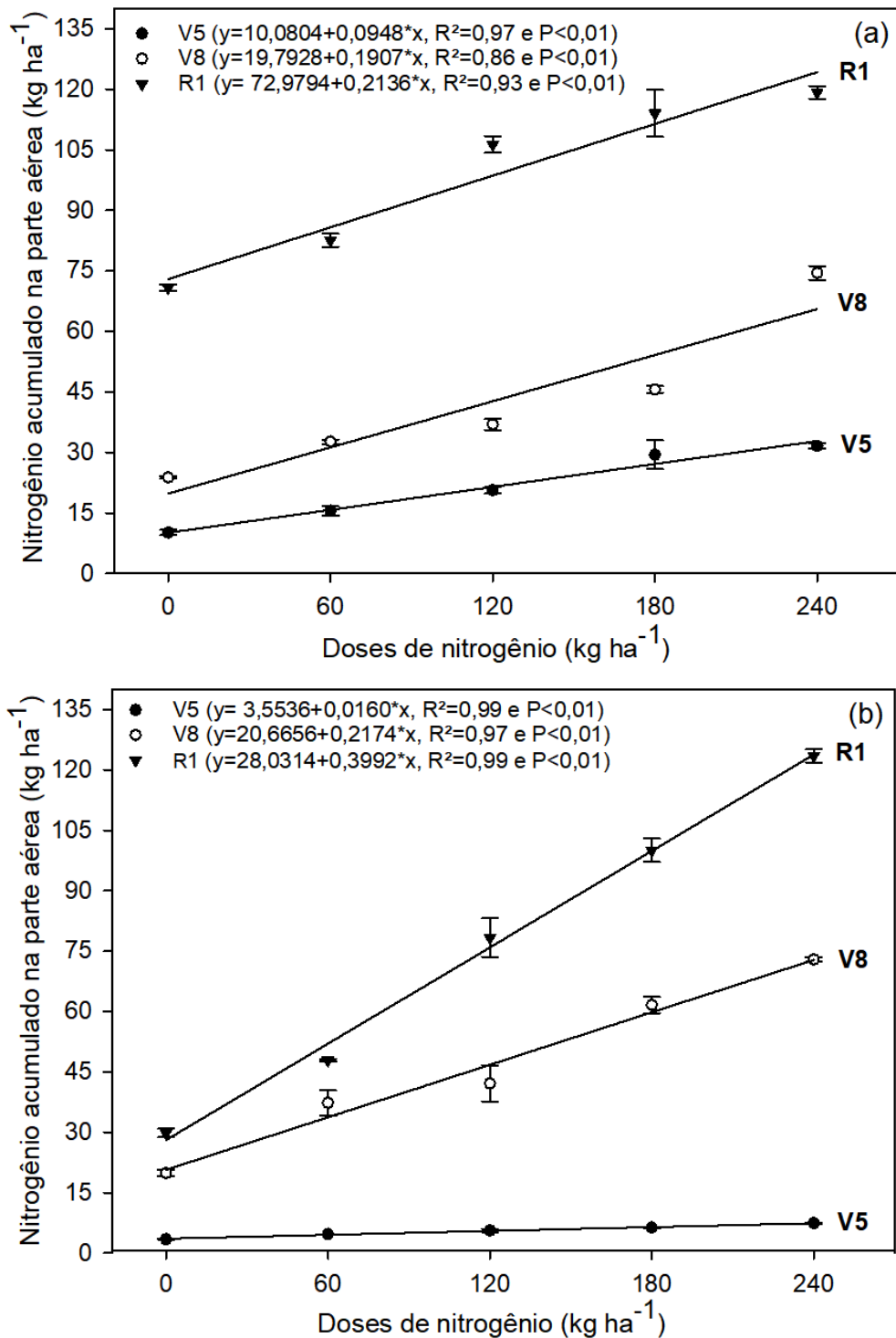


FIGURA 4. Nitrogênio acumulado na parte aérea de plantas de arroz, nos estádios V₅, V₈ e na diferenciação da panícula (R₁), em função de doses de nitrogênio aplicadas em cobertura, nas safras 2021/22 (a) e 2022/23 (b). Barras indicam o erro padrão da média.

A absorção de nitrogênio respondeu linearmente e positivamente a dose de N aplicada e com o processo de crescimento das plantas (Figura 4). Em doses mais baixas de N e nos mesmos estádios de crescimento, a absorção de N pelas plantas na safra 2021/22 foi maior do que na safra 2022/23, evidenciando, mais uma vez, a interferência do ano

(Duan *et al.*, 2021) e a importância da suplementação do nutriente para que as plantas consigam ter melhores condições de crescimento e desenvolvimento (Lin *et al.*, 2010) em anos sob algum estresse ambiental visto que, em doses superiores a 120 kg N ha^{-1} , a variação entre os anos foi muito pequena em relação ao acúmulo do nutriente na parte aérea das plantas.

O perfilhamento do arroz ocorre entre os estádios V_4 e V_8 (SOSBAI, 2022) e, durante esse período, a variação do nitrogênio acumulado, em relação à dose de N aplicada, foi similar aos resultados de Qun *et al.* (2023), o qual obteve valores médios variando de 23 kg ha^{-1} até 70 kg ha^{-1} , em doses crescente de nitrogênio aplicadas, respectivamente. No estágio de diferenciação da panícula, os autores também encontraram valores semelhantes ao deste estudo, variando de 30 kg ha^{-1} até 100 kg ha^{-1} . Chen *et al.* (2023) encontrou valores próximos a 40 kg ha^{-1} em aplicações de 150 kg N ha^{-1} e, em média, 70 kg ha^{-1} em doses de 225 kg ha^{-1} , estando esses valores um pouco abaixo dos observados nas safras estudadas.

O aumento na produção de biomassa e na quantidade acumulada de N na parte aérea ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura se refletiu, de maneira geral, em incrementos lineares no valor do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) (Figura 5). As faixas espectrais que compõem o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) são a do vermelho e a do infravermelho próximo. Esses espectros são alterados de acordo com a quantidade de clorofila e biomassa das plantas, que afetam a reflectância do dossel (Serrano & Filella & Penuelas, 2000). A síntese de maior quantidade de clorofila se reflete em menor reflectância do dossel na faixa do vermelho, enquanto que a faixa do infravermelho próximo tem sua reflectância aumentada pela presença de maior quantidade de biomassa. O GreenSeeker, sensor óptico ativo utilizado para medir o NDVI neste trabalho, mede a reflectância do dossel na região do vermelho ($650 \pm 10 \text{ nm}$) e na região do infravermelho próximo – NIR ($770 \pm 15 \text{ nm}$). No presente estudo, as alterações observadas tanto na dinâmica de produção de biomassa quanto no acúmulo de N no tecido vegetal modificaram a reflectância do dossel ao aumentar a reflectância da radiação no infravermelho próximo e reduzir a reflectância no vermelho (Smith *et al.*, 2017).

Em todos os locais e anos dos experimentos conduzidos por Rehman *et al.* (2019), o NDVI aumentou com o aumento da dose de N até um ponto que depois se estabilizou, contabilizando menores valores de NDVI em doses inferiores de N, enquanto os maiores valores de NDVI representaram as maiores taxas de N. O NDVI mínimo variou de 0,15 a 0,58, enquanto o NDVI máximo variou de 0,72 a 0,82. Padhan *et al.* (2023) também

constataram que a aplicação de doses crescentes de N aumentou o valor do NDVI. No presente estudo a relação entre o NDVI e a dose de N aplicada foi testada e está apresentada na Figura 5.

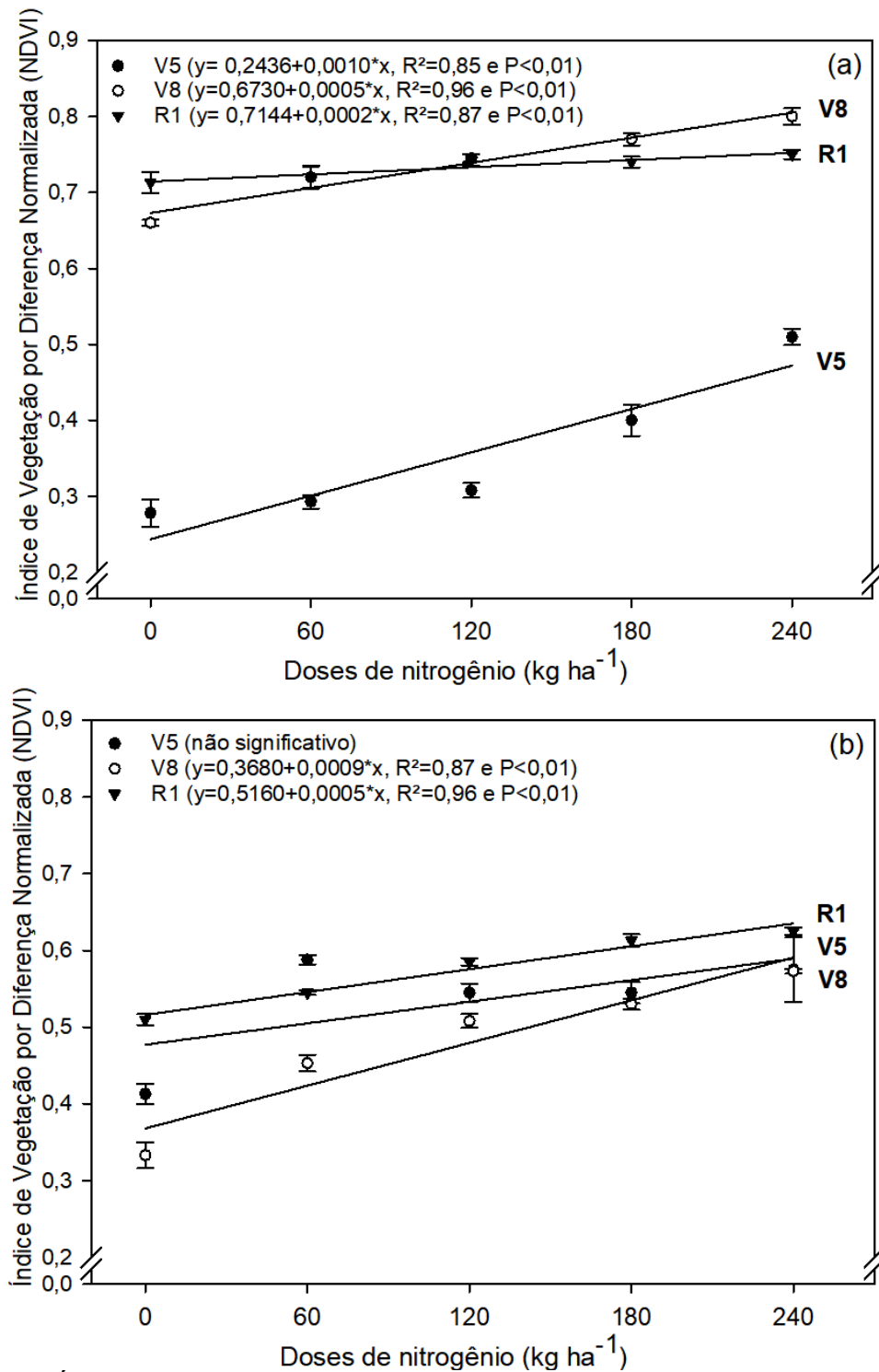


FIGURA 5. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) de plantas de arroz, nos estádios V₅, V₈ e na diferenciação da panícula (R₁), em função de doses de nitrogênio aplicadas em cobertura, nas safras 2021/22 (a) e 2022/23 (b). Barras indicam o erro padrão da média.

Em ambas as safras, os incrementos no valores de NDVI com o aumento das doses de nitrogênio aplicadas é resultado da maior eficiência fotossintética das plantas, proporcionado pelo maior teor de clorofila, nitrogênio no tecido vegetal e incremento de biomassa, nos três estádios analisados.

Na primeira safra, coeficientes de determinação de $R^2=0,85$, $R^2=0,96$ e $R^2=0,87$ foram encontrados para os estádios V_5 , V_8 e R_1 , respectivamente. Em V_5 , os valores variaram na faixa de 0,29 até 0,51, aumentando em V_8 para 0,66 a 0,80. Em R_1 , apenas os valores para doses inferiores de N continuaram aumentando, enquanto que em doses mais elevadas houve redução em relação ao estádio anterior, comportamento comum quando as plantas atingem maiores quantidades de biomassa, interferindo na capacidade de detecção do índice (Cao et. al., 2013). Na segunda safra, coeficientes de determinação de $R^2=0,87$, $R^2=0,96$ foram encontrados para os estádios V_8 e R_1 , enquanto que, para o estádio V_5 , a regressão não foi significativa, visto que os valores de NDVI variaram de 0,41, 0,59, 0,55, 0,55 e 0,58, para doses 0, 60, 120, 180 e 240 kg N ha⁻¹. Nesse caso, como as plantas apresentavam baixo acúmulo de biomassa, devido, principalmente, ao desenvolvimento inicial mais lento em virtude de menor radiação solar neste período, a medição pode ter sido influenciada pela exposição da superfície de fundo e/ou pela presença de plantas daninhas, não representando o valor real do NDVI (Kanke *et al.*, 2016). Os valores em V_8 e R_1 foram menores (Figura 5b) quando comparados à safra anterior, reflexo da menor quantidade de biomassa e N acumulado registrados nesta safra.

Entender a relação entre essas variáveis é um importante passo para propor novas metodologias de recomendação de doses de N a serem aplicadas em taxa variável, de acordo com a necessidade da cultura. As relações entre o NDVI, a biomassa na parte aérea e a quantidade N nas plantas variam de acordo com os estádios de crescimento do arroz, o que faz com que os modelos baseados em um único estádio de desenvolvimento possam não expressar a melhor relação entre essas variáveis (Zhou *et al.*, 2017). De acordo com Wang *et al.* (2019), realizar a combinação dessas informações em mais de um estádio da cultura possibilita encontrar o melhor momento de monitoramento do crescimento das plantas de arroz. A relação entre o índice de vegetação por diferença normalizada e a biomassa na parte aérea e o nitrogênio acumulado na biomassa está representada na Figura 6 e 7 e 8, para as safras 2021/22 e 2022/23, nos três estádios estudados. A regressão que melhor teve ajuste para as relações estudadas foi a linear. Os coeficientes de determinação encontrados variaram de baixo, médio a alto, assim como os coeficientes de correlação,

indicando períodos durante a safra que seriam mais apropriados para a utilização do índice como parâmetro para avaliar a biomassa e o nitrogênio na parte aérea da cultura do arroz.

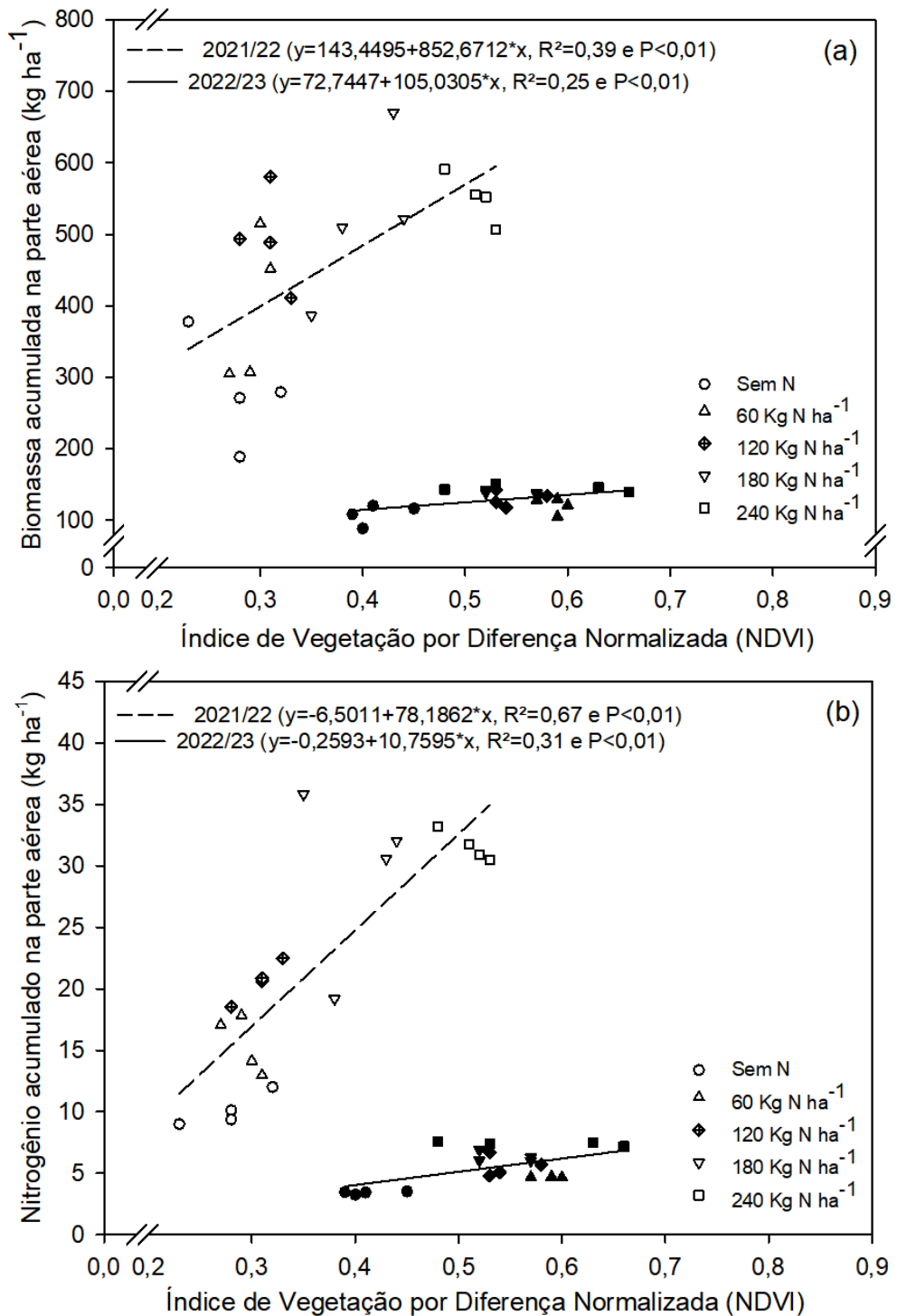


FIGURA 6. Relação entre a biomassa (a) e nitrogênio acumulado (b) da parte aérea do arroz irrigado com o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) no estágio de cinco folhas completamente expandidas (V_5) nas safras 2021/22 e 2022/23. Linha tracejada indica safra 2021/22 e linha cheia indica safra 2022/23.

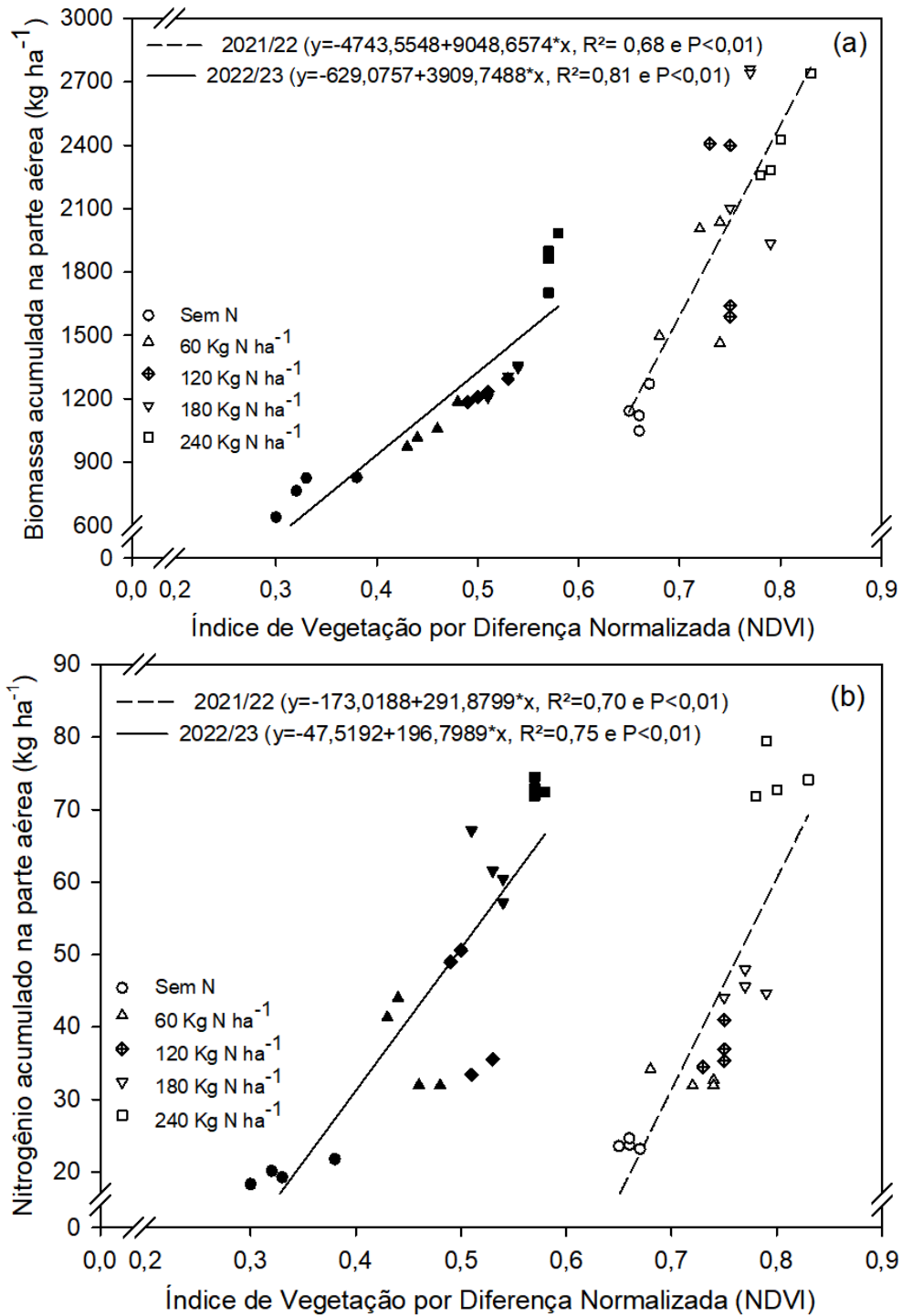


FIGURA 7. Relação entre a biomassa (a) e nitrogênio acumulado (b) da parte aérea do arroz irrigado com o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) no estágio de oito folhas completamente expandidas (V_8) nas safras 2021/22 e 2022/23. Linha tracejada indica safra 2021/22 e linha cheia indica safra 2022/23.

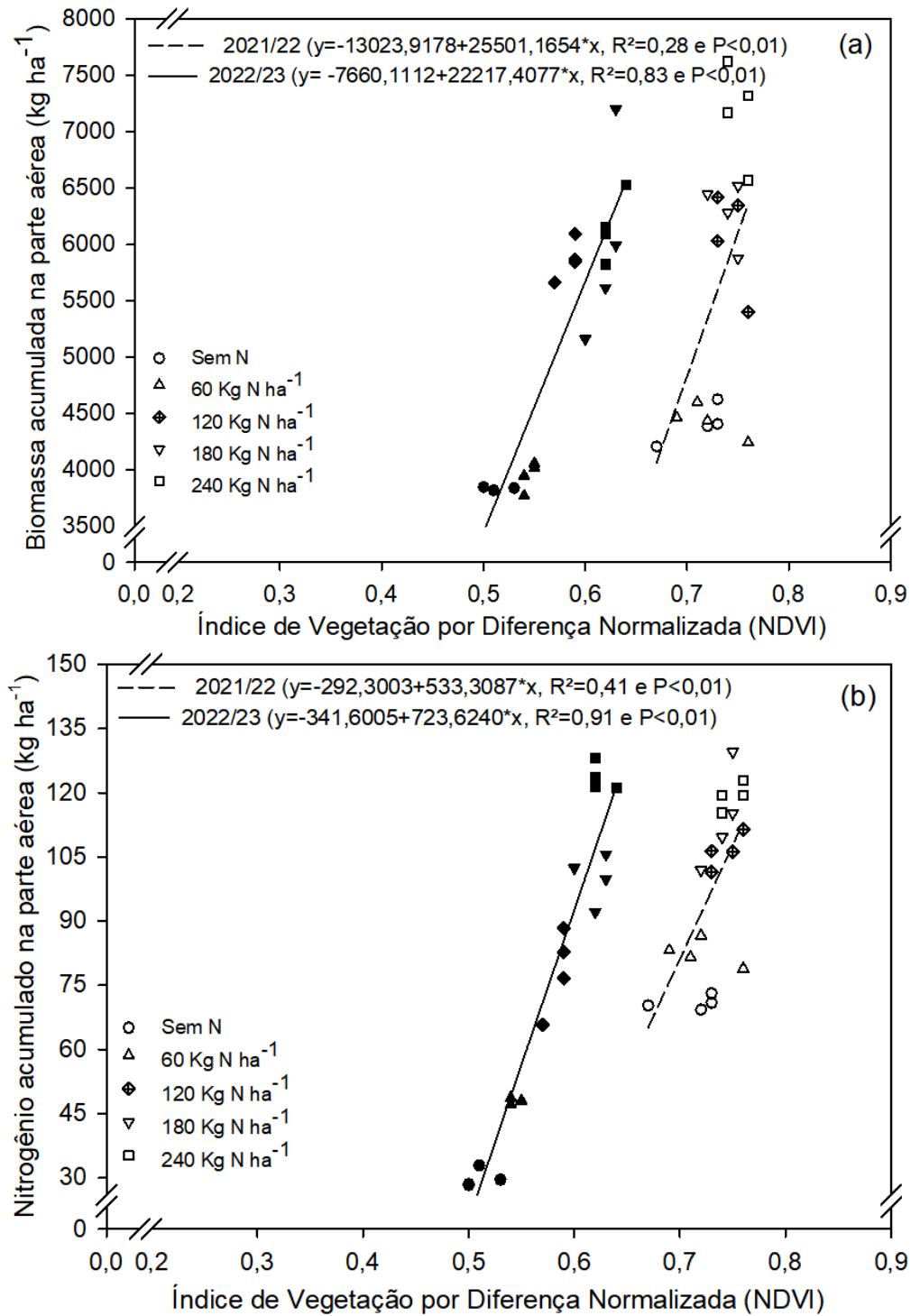


FIGURA 8. Relação entre a biomassa (a) e nitrogênio acumulado (b) da parte aérea do arroz irrigado com o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) no estágio de diferenciação da panícula (R₁) nas safras 2021/22 e 2022/23. Linha tracejada indica safra 2021/22 e linha cheia indica safra 2022/23.

No estágio de cinco folhas completamente expandidas, o NDVI foi capaz de explicar 39% da variação da biomassa das plantas de arroz no primeiro ano e 25% no segundo ano de estudo (Figura 6a), com coeficientes de correlação de 0,63 e 0,50, respectivamente. Ao contrário de outras culturas, como o trigo, que no estágio V₅₋₆ tem

apresentado R^2 acima de 0,80 (Raun *et al.* 2005; Povh *et al.*, 2008; Grohs *et al.*, 2009; Bredemeier *et al.*, 2013; Vian, 2015; Trentin *et al.*, 2021), a forma inundada como o arroz é cultivado representa uma característica única, exigindo consideração adicional devido a interferência que a água pode ter nessa relação. O mesmo também vale para plantas daninhas e aquáticas que podem estar presentes entre as plantas de arroz. Normalmente, a água transmite a maior parte da radiação incidente no comprimento de onda visível, o que resulta em uma pequena reflexão da luz. Em contraste com a água pura, a água do arroz pode ser turva devido aos sedimentos suspensos no solo (Hoshi *et al.*, 1984; Wu *et al.* 2014; Vinciková *et al.*, 2015). A baixa biomassa do arroz observada durante as fases iniciais de crescimento também pode gerar uma interferência potencial ainda maior da água na reflectância espectral, justificando a relação ainda mais fraca observada na segunda safra (Figura 6a), com altos valores de NDVI em contraste aos baixos acúmulos de biomassa.

Para o mesmo estágio, coeficientes de determinação para a relação NDVI e N acumulado foram superiores aos encontrados para a biomassa, mas ainda assim conflitantes. No primeiro ano (2021/22), a variação do nitrogênio acumulado nas plantas pode ser explicada em 67% pelo NDVI, enquanto que, para o segundo ano (2022/23), somente 31% (Figura 6b). O N acumulado depende do teor de N nas plantas e também da quantidade de biomassa, o que explica o maior coeficiente encontrado na primeira safra. Variações entre esta relação também foram diagnosticadas por Rehman *et al.* (2019) nos diferentes locais e anos de estudo. Yao *et al.* (2014) relatou que, no início do ciclo do arroz, a quantidade de N acumulada teve fraca relação com o NDVI.

No estágio V_5 , o uso do NDVI para a predição da biomassa e nitrogênio acumulado não fornece a precisão adequada para ser recomendada. Wang *et al.* (2021) encontraram valores inferiores ao deste estudo para a fase inicial do perfilhamento do arroz, onde somente 13% da variação do NDVI poderia explicar a variação da biomassa. Kanke *et al.* (2016) relataram que a água de fundo e a presença de daninhas aquáticas interferiu nas relações entre o NDVI e a biomassa quando a cobertura do dossel foi inferior a 50%. Harrell *et al.* (2011), Ali *et al.* (2014), Cao *et al.* (2016) e Singh *et al.* (2022) também relataram que estádios iniciais não são confiáveis para estimar a biomassa e o nitrogênio acumulado através do NDVI devido às interferências citadas.

O aumento da biomassa do arroz, à medida que as plantas se desenvolvem, melhora a competição com as plantas aquáticas e reduz a interferência do fundo de água nas leituras do NDVI. No presente estudo, as plantas, em ambas as safras, já apresentavam, em V_8 ,

mais de 50% de cobertura do dossel, minimizando a interferência da água e demais perturbações (Kanke *et al.*, 2016; Singh *et al.*, 2022). Neste estágio, o NDVI pode explicar 68 e 81% da variação da biomassa (Figura 7), com coeficientes de correlação de $r=0,82$ e $r=0,9$, em 2021/22 e 2022/23, respectivamente, demonstrando um valor forte e constante em ambos os anos. Entre os estádios V_8 e V_9 , Yao *et al.* (2014) constatou entre os locais e anos de seus estudos que o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) obtido com o sensor GreenSeeker poderia explicar entre 73% e 76% da variação da biomassa aérea do arroz, enquanto que Cao *et al.* (2016) encontrou R^2 próximos a 0,70 para essa relação. Gnyp *et al.* (2014), utilizando dados de sensor hiperespectral de dossel para simular o sensor GreenSeeker, reportaram que 64%-68% da variabilidade da biomassa acima do solo do arroz poderia ser explicada pelo NDVI.

Para o nitrogênio acumulado na biomassa, neste estágio, relações mais fracas foram encontradas em diversos estudos (Gnyp *et al.*, 2014; Cao *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2021 e Singh *et al.*, 2022). Yao *et al.* 2014 discutiu que apenas 40% da variabilidade do nitrogênio nas plantas de arroz poderiam ser explicadas pelo NDVI. Em contraste ao encontrado na literatura para a cultura do arroz irrigado, no presente estudo bons coeficientes foram encontrados, variando de $R^2=0,70$ e $r=0,83$ (safra 2021/22) e $R^2= 0,75$ e $r=0,86$ (safra 2022/23) (Figura 7b).

A forte relação NDVI e biomassa e NDVI e N acumulado, em safras diferentes, não se manteve para estádios mais avançados, principalmente em anos com alto aporte de biomassa, como o caso da safra 2021/22. No estágio de diferenciação da panícula (R_1), apenas 28% da variabilidade da biomassa pode ser explicada pelo NDVI enquanto que para o N acumulado, 41% desta variabilidade foi explicada pelo índice (Figura 8a). Os valores detectados pelo índice variaram de 0,70 a 0,75, enquanto que a biomassa partiu de 4.000 kg ha⁻¹ a 7.600 kg ha⁻¹ e o nitrogênio acumulado de 70 kg N ha⁻¹ a 135 kg N ha⁻¹. Diferente de outros índices de vegetação, a saturação do NDVI é um fenômeno comum que ocorre à medida que as plantas se desenvolvem. Uma vez que o dossel atinge 100% de cobertura, a reflectância do infravermelho próximo continua a aumentar, mas a reflectância do vermelho exibe uma discreta diminuição, resultando apenas em pequenas alterações no denominador, que tem impacto muito maior na proporção do que o numerador (Thenkabail *et al.*, 2002). A saturação do NDVI é reflexo do aumento da cobertura de solo, o que pode ser uma limitação no uso do sensor a partir de estádios mais avançados da cultura (Duan *et al.*, 2017). A saturação do NDVI a partir da iniciação da panícula (R_0) foi relatada por

Gnyp *et al.* (2014), Yao *et al.* (2014), Kanke *et al.* (2016), Rehman *et al.* (2019) e Duan *et al.* (2021).

Na segunda safra de estudo (2022/23), coeficiente de determinação forte foi encontrado entre NDVI e biomassa ($R^2=0,83$) (Figura 8a) e NDVI e N acumulado ($R^2=0,91$) (Figura 8b), com valores superiores aos detectados na avaliação do estágio anterior. Esses valores conflitam com os encontrados na safra 2021/22 e com a literatura. Nesta safra, a biomassa apresentou menores acúmulos, o que pode justificar a maior sensibilidade do índice em detectar as diferenças entre os tratamentos, sem saturar, visto que os valores de NDVI variaram de 0,5 a 0,6. Outro fator que pode interferir nessa relação é a coloração das folhas, que estavam mais amareladas, especialmente em tratamentos com menores doses de N, devido a falta de lâmina de água, baixa radiação solar e também ventos noturnos que foram registrados em alguns períodos da safra.

De acordo com os dados apresentados para a relação do NDVI com as variáveis analisadas, dos três estádios avaliados, em ambos os anos do experimento, no estágio de oito folhas completamente expandidas que foram obtidas as melhores associações do índice com a biomassa e nitrogênio acumulado na parte aérea, corroborando também com os relatos encontrados na literatura. Considerando ainda que este estágio antecede ao estágio preconizado para a segunda aplicação do N em cobertura (SOSBAI, 2022), o NDVI obtido neste período pode ser utilizado como guia para detecção do estado nutricional da cultura e adequação da dose de acordo com as necessidades da cultura.

Embora a produção de biomassa seca e a quantidade de N acumulada na parte aérea expressem relação linear com os valores de NDVI, seus valores absolutos apresentaram resposta variável às doses de N entre as safras avaliadas (Figura 7). Dessa forma, modelos de prescrição de doses de N em cobertura baseados em valores absolutos de NDVI que não considerem as diferenças observadas nas leituras entre as safras estudadas, podem resultar em sub ou superestimação da variabilidade no desenvolvimento das plantas em função da disponibilidade de N (Solie *et al.*, 2012; Aranguren *et al.*, 2019).

Para reduzir os efeitos das variações entre os valores observados uma alternativa é realizar a normalização dos dados com base no valor médio do experimento, permitindo que as duas safras estudadas sejam analisadas em conjunto (Amaral *et al.*, 2015) e assim proposto um modelo único que reduza as variabilidades nos anos estudados. Visando obter uma regressão única para caracterizar a variabilidade espacial no desenvolvimento da cultura do arroz irrigado, para auxiliar no ajuste da adubação nitrogenada em cobertura, no estágio de oito folhas expandidas, os dados de biomassa seca e da quantidade de N acumulado na parte aérea foram normalizados (Figura 9).

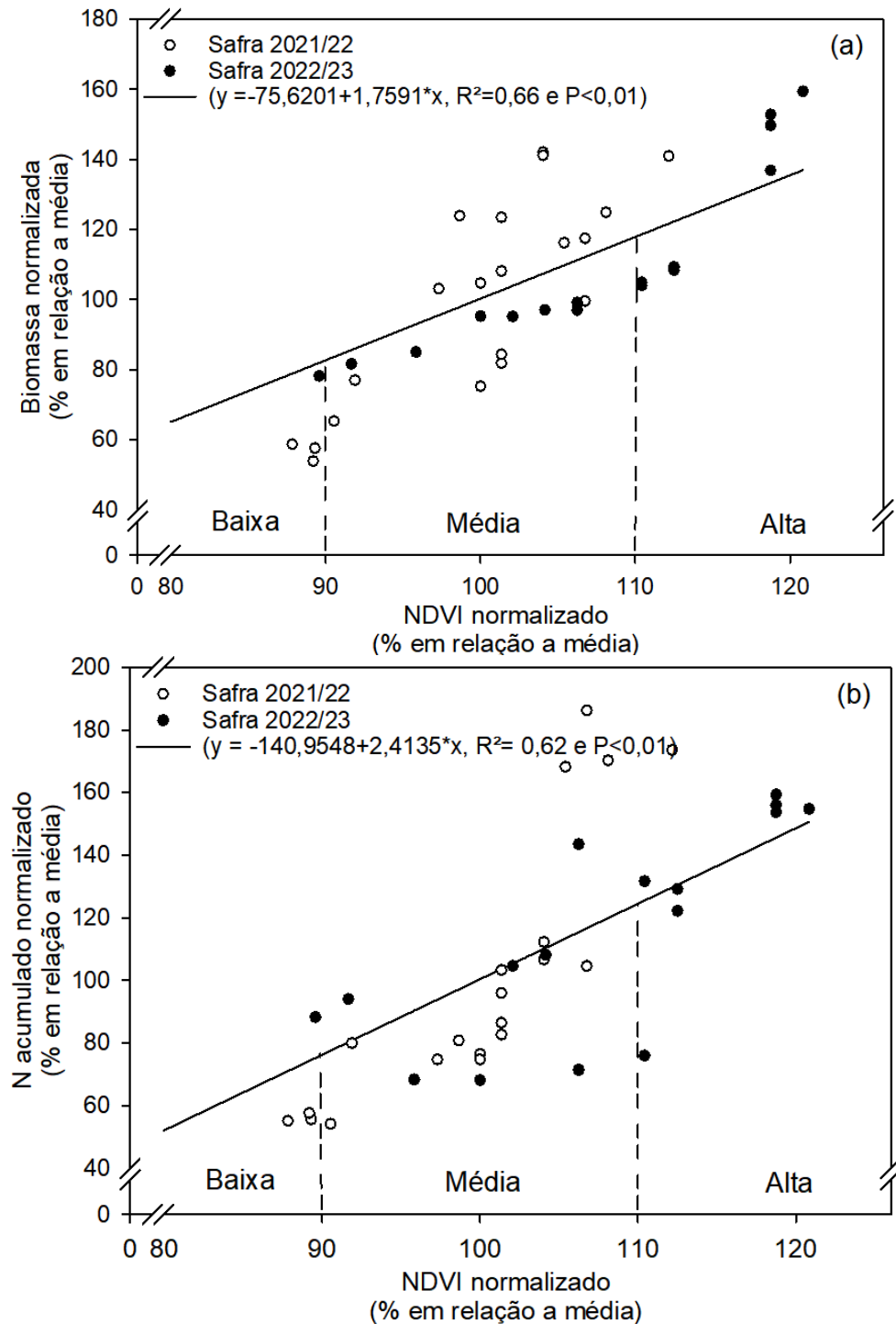


FIGURA 9. Relação entre a biomassa (a) e nitrogênio acumulado (b) da parte aérea de arroz irrigado com o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e no estágio de oito folhas completamente expandidas (V_8) em resposta a doses de N aplicadas em cobertura nas plantas. Todos os dados foram normalizados utilizando os valores médios para cada safra.

Os dados normalizados foram classificados em três classes distintas que foram adaptadas a partir do modelo proposto por Vian *et al.* (2018) para a cultura do trigo. Assim, o modelo proposto na Figura 9 define zonas críticas de desenvolvimento baseadas na produção de biomassa seca (Figura 9a) e na quantidade de N acumulada na parte aérea

(Figura 9b), visando a definição de “zonas de manejo” para a redistribuição da dose de N em cobertura, com base no NDVI médio da lavoura, sendo determinadas as seguintes classes do índice NDVI normalizado: “baixa” (<90%), “média” (90 a 110%) e “alta” (>110%). Com base nessas informações, a definição da dose de N através do modelo pode ser aplicada em qualquer lavoura, reduzindo o efeito do ano.

De acordo com a relação mostrada na Figura 9, verifica-se que a classe “baixo” em relação ao valor do NDVI normalizado (valores abaixo de 90% em relação à média) corresponde à produção de biomassa seca (Figura 9a) e acúmulo de N na parte aérea (Figura 9b) inferior a, aproximadamente, 80% e 70% em relação à média, respectivamente, caracterizando plantas com menor desenvolvimento vegetativo e déficit na quantidade de N acumulada. Por outro lado, a classe “alto” do valor de NDVI normalizado (valores acima de 110% em relação à média), condiz com produção de biomassa seca e acúmulo de N de aproximadamente 115 e 120% em relação à média, respectivamente. Assim, as zonas críticas de desenvolvimento definidas no modelo proposto apresentam-se como uma metodologia viável para auxiliar na correção da dose de N em cobertura.

Neste contexto, a classe com NDVI normalizado abaixo de 90%, por exemplo, apresenta déficit de aproximadamente 20% em relação à biomassa seca e 30% na quantidade de N acumulado na parte aérea no estágio de oito folhas completamente expandidas, em relação à média. Isso indica que, ao estimar a variabilidade espacial no acúmulo de biomassa seca e na quantidade de N acumulada na parte aérea na cultura do arroz irrigado no estágio de oito folhas completamente expandidas, através do NDVI normalizado pela média da lavoura, a redistribuição da dose de N em cobertura pode ser realizada de acordo com as classes apresentadas. Esse procedimento evitaria o déficit de N em regiões da lavoura com menor desenvolvimento até este estágio (“baixa”) ou o excesso de N em regiões com elevada produção de biomassa e elevada quantidade acumulada de N neste estágio (“alta”), mantendo a dose definida pelas recomendações técnicas da cultura na classe intermediária (“média”).

Portanto, de acordo com o presente estudo, avaliar a biomassa e o teor de N das plantas de arroz através do NDVI, é uma alternativa viável para determinar o estado nutricional em relação ao nitrogênio durante o ciclo da cultura. O estágio de crescimento tem uma forte influência na sensibilidade a diferentes comprimentos de onda e no desempenho do NDVI para estimar parâmetros biofísicos da cultura (Li *et al.*, 2010; Yu *et al.*, 2013), sendo que o estágio preconizado nas recomendações técnicas do arroz irrigado para a segunda aplicação nitrogenada em cobertura foi o estágio que apresentou resultados

positivos para este monitoramento, podendo ser utilizado como parâmetro para variar a dose de N a ser aplicada de acordo com as necessidades reais das plantas.

A utilização de doses de N condizentes com a real demanda nutricional das plantas no momento da aplicação possibilita que a absorção de N seja maximizada, aumentando o potencial produtivo nas áreas da lavoura onde esse nutriente seria limitante, assim como reduzindo os custos com o fertilizante e as perdas de N (lixiviação, volatilização, desnitrificação) em regiões da lavoura onde a quantidade aplicada seria superior à demandada pelas plantas (Diacono *et al.*, 2013; Castoldi *et al.*, 2019).

3.4 Conclusões

As doses de nitrogênio utilizadas geraram variabilidade no acúmulo de biomassa, N acumulado e NDVI nas plantas, as quais apresentaram uma relação linear significativa com a dose de N aplicada nos três estádios avaliados (V₅, V₈ e R₁).

As relações entre o NDVI, biomassa da parte aérea e o nitrogênio acumulado variam de acordo com os estádios de crescimento do arroz, influenciando significativamente o desempenho do índice para estimar os parâmetros biofísicos do dossel da cultura.

Em fases iniciais do ciclo da cultura, a presença da água interfere nas medições do índice e, em estádios mais avançados, o NDVI tende a saturar, reduzindo a eficácia do índice para esta finalidade.

Há forte relação entre o NDVI e a biomassa e o N acumulado no estádio de oito folhas completamente expandidas, indicando que o uso NDVI pode ser uma ferramenta eficaz para estimar estas variáveis nas plantas de arroz e assim determinar o *status* nutricional das plantas.

Através da normalização dos dados, a abordagem proposta no presente estudo define um modelo geral para classificação da variabilidade no crescimento das plantas e acúmulo de nitrogênio na parte aérea da cultura do arroz irrigado, no estádio de oito folhas completamente expandidas, entre os diferentes anos de cultivo analisados, orientando nas decisões da dose adequada na segunda aplicação em cobertura de nitrogênio.

3.5 Referências

ALI, A.M. *et al.* Prediction of dry direct-seeded rice yields using chlorophyll meter, leaf color chart and GreenSeeker optical sensor in northwestern India. **Field Crops Research**, v. 161, p. 11-15, 2014.

- AMARAL, T.A. *et al.* Nitrogen management strategies for smallholder maize production systems: Yield and profitability variability. **International Journal of Plant Production**, Cham, v.9, n.1, p.75-98, 2015.
- ARANGUREN, M. *et al.* Crop Sensor-Based In-Season Nitrogen Management of Wheat with Manure Application. **Remote sensing**, v. 11, n. 1094, p. 1-22, 2019
- BREDEMEIER, C. *et al.* Estimativa do potencial produtivo em trigo utilizando sensor óptico ativo para adubação nitrogenada em taxa variável. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, p. 1147-1154, 2013.
- CAO, Q. *et al.* Non-destructive estimation of rice plant nitrogen status with Crop Circle multispectral active canopy sensor. **Field Crops Research**, v.154, p. 133-144, 2013.
- CAO, Q. *et al.* Improving in-season estimation of rice yield potential and responsiveness to topdressing nitrogen application with Crop Circle active crop canopy sensor. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 17, p. 136–154, 2016.
- CAO, Q. *et al.* Developing a new crop circle active canopy sensor-based precision nitrogen management strategy for winter wheat in North China Plain. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 18, p. 2-18, 2017a.
- CAO, X. *et al.* Effects of watering regime and nitrogen application rate on the photosynthetic parameters, physiological characteristics, and agronomic traits of rice. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 39, 2017b.
- CARVALHO, J.M.G. *et al.* Nitrogen and potassium in production, nutrition and water use efficiency in wheat plants. **Ciencia e Investigación Agraria**, v. 43, n. 3, p. 442-451, 2016.
- CASTOLDI, G. *et al.* Eficiência do Uso do Nitrogênio em Agroecossistemas. **Tópicos em Ciência do Solo**. 1ed. Viçosa: SBCS, 2019, v. 10, p. 141-238.
- CHEN, K. *et al.* Effects of straw return with nitrogen fertilizer reduction on rice (*Oryza sativa* L.) morphology, photosynthetic capacity, yield and water–nitrogen use efficiency traits under different water regimes. **Agronomy**, v. 13, 2023.
- DIACONO *et al.* Precision nitrogen management of wheat. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 33, p. 219-241, 2013.
- DUAN, B. *et al.* Remote estimation of grain yield based on UAV data in different rice cultivars under contrasting climatic zone. **Field Crops Research**, v. 267, 2021.
- DUAN, T. *et al.* Dynamic monitoring of NDVI in wheat agronomy and breeding trials using an unmanned aerial vehicle. **Field Crops Research**, v. 210, p. 71-80, 2017.
- FAGERIA, N.K.; BALIGAR, V.C. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. **Advances in Agronomy**. New York, v. 88, n.1, p. 97-185, 2005.
- GNYP, M. L. *et al.* Hyperspectral canopy sensing of paddy rice aboveground biomass at different growth stages. **Field Crops Research**, v. 155, p. 42-55, 2014.

GROHS, D.S. *et al.* Modelo para estimativa do potencial produtivo em trigo e cevada por meio do sensor GreenSeeker. **Engenharia Agrícola**, v. 29, n. 1, p. 101-112, 2009.

HARRELL, D. L. *et al.* Estimating Rice Grain Yield Potential Using Normalized Difference Vegetation Index. **Agronomy Journal**. v. 103, p. 1717-1723, 2011.

HOSHI, T. *et al.* Experimental study on the spectral reflectance of paddy soils in the field survey. **Institute of Information Science and Electronics**, 1984.

IRGA - INSTITUDO RIO GRANDENSE DO ARROZ. **Custo de produção arroz irrigado Rio Grande do Sul**. Disponível em:

<<https://irga.rs.gov.br/upload/arquivos/202106/10125554-custos-de-producao-2020-2021.pdf>>. Acesso em 23 ago. 2021.

IRGA - INSTITUDO RIO GRANDENSE DO ARROZ. **Boletim de resultados da safra 2022/23 em terras baixas: arroz irrigado e, soja e milho em rotação**. Disponível em: <<https://irga.rs.gov.br/boletim-de-resultados>>. Acesso em 13 dez. 2023a.

IRGA - INSTITUDO RIO GRANDENSE DO ARROZ. **Médias climatológicas**. Disponível em: <<https://irga.rs.gov.br/medias-climatologicas>>. Acesso em 12 set. 2023b.

KANKE, Y. *et al.* Evaluation of red and red-edge reflectance-based vegetation indices for rice biomass and grain yield prediction models in paddy fields. **Precision Agriculture**, v. 17, p. 507-530, 2016.

KNOBLAUCH, R. *et al.* Ammonia volatilization in waterlogged soils influenced by the form of ureia application. **Revista Brasileira de Ciências do solo**, v.36, p.813-821, 2012.

LI, B. *et al.* Above-ground biomass estimation and yield prediction in potato by using UAV-based RGB and hyperspectral imaging. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 162, p. 161-172, 2020.

LI, F. *et al.* Evaluating hyperspectral vegetation indices for estimating nitrogen concentration of winter wheat at different growth stages. **Precision Agriculture**, v.11, p. 335-357, 2010.

LIN, F. F. *et al.* Investigation of SPAD meter-based indices for estimating rice nitrogen status. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 71, p. S60-S65, 2010. Supl. 1.

LIU, Y.; SWINTON, S. M.; MILLER, N. R. In site-specific yield response consistent over time? Does it pay? **American Journal of Agricultural Economics**, St. Paul, v. 88, n. 2, p. 471-483, 2006.

LUAN, W. The effect of the crosstalk between photoperiod and temperature on the heading-date in rice. **PLoS One**, 2009.

MARSCHNER, H.; MARSCHNER, P. **Mineral nutrition of higher plants**. 3^oed. London, UK: Academic Press; 2012.

MARZARI, V. **Influência da população de plantas, doses de nitrogênio e controle de doenças na produção e qualidade de grãos e sementes de arroz irrigado**. 2005. 75 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

MOLIN, J. P. **Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade**. Engenharia Agrícola, v. 22, n. 1, p. 83-92, 2002.

NTECH INDUSTRIES. **Greenseeker manuals downloads**. [S.l.]: Ntech Industries, 2013. Disponível em: <https://agriculture.trimble.com/product/greenseeker-system/>. Acesso em: 19 out. 2021.

PADHAN, B. K. *et al.* Variation in nitrogen partitioning and reproductive stage nitrogen remobilization determines nitrogen grain production efficiency (NUE_g) in diverse rice genotypes under varying nitrogen supply. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 14, [art.] 1093581, 2023.

POVH, F.P. *et al.* Comportamento do NDVI obtido por sensor ótico ativo em cereais. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 43, p. 1075-1083, 2008.

QUN, Z. *et al.* Grain yield, nitrogen use efficiency and physiological performance of indica/japonica hybrid rice in response to various nitrogen rates. **Journal of Integrative Agriculture**, Beijing, v. 22, p. 63-79, 2023.

RAUN, W. R. *et al.* Optical sensor based algorithm for crop nitrogen fertilization. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 36, p. 2759-2781, 2005.

REHMAN, T. H. *et al.* Use of normalized difference vegetation index to assess n status and predict grain yield in rice. **Agronomy Journal**, v. 111, p. 2889-2898, 2019.

ROUSE, J. W. *et al.* Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: NASA ERTS SYMPOSIUM, 3., 1973. [**Proceedings of the...**]. Washington, DC: NASA, 1974. Paper A20. p. 309-317.

SANTOS, H.G. *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Brasília: Embrapa Solos, 2013. 353 p.

SCIVITTARO, W. B. *et al.* **Adubação Nitrogenada e Potássica para Cultivares de Arroz Irrigado**. Circular Técnica n. 197, Embrapa Clima Temperado, Pelotas-RS, dez. 2018.

SERRANO, L.; FILELLA, I.; PENUELAS, J. Remote sensing of biomass and yield of winter wheat under different nitrogen supplies. **Crop Science**, Madison, v.40, p.723-731, 2000.

SMITH, H. L. *et al.* Don't ignore the green light: exploring diverse roles in plant processes. **Journal of Experimental Botany**, v. 68, n.9, p. 2099-2110, 2017.

SINGH, S. P.; PILLAI, K. G. Response of scented rice varieties to nitrogen. **Oryza**, Cuttack, v. 33, n.3, p. 193-195, 1996.

- SINGH, V. *et al.* Prediction of grain yield and nitrogen uptake by basmati rice through in-season proximal sensing with a canopy reflectance sensor. **Precision Agriculture**, v.23, p. 733-747, 2022.
- SOSBAI - SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO.. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Restinga Seca: SOSBAI, 2022, p. 199.
- SOLIE, J.B. *et al.* Generalized Algorithm for Variable-Rate Nitrogen Application in Cereal Grains. **Agronomy Journal**, v. 104, n. 2, p. 378-387, 2012.
- TAIZ, L. *et al.* **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed Editora Ltda., p. 126-140, 2017.
- TEDESCO, M.J. *et al.* **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS, 176p., 1995.
- THENKABAIL, P.S. *et al.* Evaluation of narrowband and broadband vegetation indices for determining optimal hyperspectral wavebands for agricultural crop characterization. **Photogramm. Eng. Remote Sens.**, v. 68, p. 607-621, 2002.
- TRENTIN, C. *et al.* Biomass production and wheat grain yield and its relationship with NDVI as a function of nitrogen availability. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 16, n. 4, e34, p. 1-7, 2021.
- TUBAÑA, B. *et al.* Midseason nitrogen fertilization rate decision tool for rice using remote sensing technology. **Better Crops**, [S.l.], v. 95, n. 1, p. 22-24, 2011.
- VIAN, A. L. *et al.*, **Limites críticos de NDVI para estimativa do potencial produtivo do milho**. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v.17, n.1, p. 91-100, 2018.
- VIAN, A. L. **Sensores de vegetação para estimativa in situ do potencial produtivo na cultura do milho**. 2015. 68 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- VINCIKOVÁ, H. *et al.* Spectral reflectance is a reliable water-quality estimator for small, highly turbid wetlands. **Wetlands Ecology and Management**, v. 23, p. 933-946, 2015.
- WANG, F.L. *et al.* Rice yield estimation using parcel-level relative spectra variables from UAV-based hyperspectral imagery. **Front. Plant Sci.**, v. 10, 453, 2019.
- WANG, F.M. *et al.* Combining spectral and textural information in UAV hyperspectral images to estimate rice grain yield. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 102, 2021.
- WU, J.L. *et al.* Hyperspectral sensing for turbid water quality monitoring in freshwater rivers: empirical relationship between reflectance and turbidity and total solids. **Sensors**, v.14, p. 22670-22688, 2014.

XU, T. *et al.* Dynamic estimation of rice aboveground biomass based on spectral and spatial information extracted from hyperspectral remote sensing images at different combinations of growth stages. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 202, p. 169-183, 2023.

YAO, Y. *et al.* In-season estimation of rice nitrogen status with an active crop canopy sensor. **Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 7, p. 4403-4413, 2014.

YU, K. *et al.* Remotely detecting canopy nitrogen concentration and uptake of paddy rice in the Northeast China Plain. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 78, p. 102-115, 2013.

ZHOU, X. *et al.* Predicting grain yield in rice using multi-temporal vegetation indices from UAV-based multispectral and digital imagery. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.130, p. 246-255, 2017.

4 CAPÍTULO 2

Estimativa de produtividade de grãos de arroz irrigado, ao longo do ciclo de desenvolvimento, pelo Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI).

4.1 Introdução

A lacuna existente entre o potencial produtivo e os rendimentos médios das lavouras de arroz pode ser atribuída a diversos fatores, mas, em especial, ao impreciso manejo da demanda nutricional, com destaque ao nitrogênio (SOSBAI, 2022).

Atualmente, a recomendação para a adubação nitrogenada leva em consideração apenas parâmetros do solo e a expectativa de resposta da cultura à adubação, sem considerar o *status* de nitrogênio da cultura no momento da adubação (SOSBAI, 2018). Como o estado nutricional das plantas não é avaliado e nem a variabilidade espacial do solo e do crescimento da cultura na área, o resultado é a aplicação de uma dose média de nitrogênio em cobertura na lavoura, beneficiando algumas áreas, enquanto que outras recebem super ou subdoses.

Devido à sua alta mobilidade no solo e na planta, parte do N aplicado é perdido por processos de lixiviação, volatilização e desnitrificação (Fageria & Baligar, 2005), com aproveitamento apenas de 30–50% pelas lavouras (Peng & Tang & Zou, 2009). Além disso, a aplicação excessiva de N também reduz a eficiência de uso deste nutriente e causa poluição ambiental (Swarbreck *et al.*, 2019).

Assim, é necessário que as doses aplicadas sejam ajustadas com as necessidades reais da cultura em diferentes partes da lavoura, levando em consideração as variações de disponibilidade do N no solo e a demanda nutricional da planta ao longo do seu desenvolvimento (Molin, 2001; Poletto, 2004). Portanto, ferramentas para aprimorar a aplicação de fertilizantes nitrogenados durante os estádios críticos de crescimento são necessárias para melhorar o rendimento de grãos, a eficiência do uso de nitrogênio e reduzir o impacto ambiental causado pelas perdas de N (Sathiya & Ramesh, 2009; Yoseftabar, 2013).

Com o advento da agricultura de precisão, através de ferramentas do sensoriamento remoto, diferenças no desenvolvimento das plantas podem ser identificadas e manejadas de forma localizada durante o ciclo de desenvolvimento da cultura, sendo uma importante ferramenta para auxiliar nos diagnósticos mais precisos de uma lavoura (Bredemeier *et al.*, 2013). Tais informações são captadas a partir das características espectrais do dossel das plantas e representadas por índices de vegetação. O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) é um dos índices mais aplicados na agricultura para estimativa do *status* nutricional das culturas, auxiliando no manejo nutricional do nitrogênio em diversas culturas produtoras de grãos (Lofton *et al.*, 2012; Martin *et al.*, 2012; Bredemeier *et al.*, 2013; Singh *et al.*, 2015; Trentin *et al.*, 2021).

O NDVI vem sendo estudado para monitoramento do *status* de N no desenvolvimento das plantas de arroz e prever o potencial produtivo da cultura por vários autores nos últimos anos (Baral *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2021; Lu *et al.*, 2022; Yinyan *et al.* 2023), com resultados positivos quanto à possibilidade da aplicação variável da dose de N, a partir do *status* nutricional das plantas, em tempo real. O índice é calculado a partir da relação $(\rho_{ivp} - \rho_v)/(\rho_{ivp} + \rho_v)$, onde ρ_{ivp} e ρ_v se referem à reflectância do infravermelho próximo e vermelho, respectivamente, e pode assumir valores entre -1 a +1, sendo que os valores positivos se relacionam ao vigor vegetativo da cultura, enquanto os valores negativos indicam ausência de vegetação (Rouse *et al.*, 1974).

Posto isso, a utilização do NDVI, por meio de sensores de vegetação, possibilita a identificação de diferenças no desenvolvimento da cultura na lavoura e seu manejo de forma localizada durante o ciclo. O objetivo do presente trabalho foi monitorar o desenvolvimento do arroz irrigado e prever a estimativa de produtividade da cultura, ao longo do ciclo, em função da reflectância do dossel das plantas, pelo Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI).

4.2 Material e Métodos

4.2.1 Localização e caracterização do local de execução do experimento

Os trabalhos de campo foram conduzidos em duas safras, 2021/2022 e 2022/2023, na Estação Experimental do Arroz (EEA/IRGA), que fica localizada no município de Cachoeirinha (RS), nas coordenadas de 29°55'30'' de latitude sul e 50°58'21'' de longitude oeste, na região fisiográfica Central do Estado do Rio Grande do Sul (RS).

O clima na área do experimento é caracterizado como subtropical úmido (Cfa), de acordo com a classificação de Köppen, com precipitação pluvial e temperatura média anual de 1.470,4 mm e 19,6 °C, respectivamente. Segundo Santos *et al.* (2013), o solo da área experimental é classificado como Gleissolo Háptico Distrófico Típico.

De acordo com os dados meteorológicos disponibilizados pela Estação Meteorológica Automática do Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA, 2023b), na safra 2021/22, a temperatura média nos meses de outubro a março foi de 24,2 °C, com média máxima neste período de 29,7 °C e temperatura média mínima de 18,8 °C. A precipitação pluvial nesse período correspondeu a 527,2 mm. A safra 2022/23 foi marcada por temperatura média de 24 °C, com média máxima de 29,4 °C e média mínima de 18,7 °C. Embora as temperaturas médias sejam muito similares às da safra anterior, foram

registrados alguns períodos com noites mais frias. Ainda, foi um ano mais seco, com menores acumulados de precipitação, principalmente entre outubro e novembro, registrando 407,8 mm durante o ciclo de desenvolvimento do arroz. Apesar de ter sido um ano mais seco, a disponibilidade de radiação solar média durante a safra no segundo ano foi menor (19,85 MJ.m²) do que no primeiro ano de estudo (22,26 MJ.m²).

4.2.2 Caracterização do experimento

O experimento foi realizado com a cultura do arroz irrigado, utilizando a cultivar IRGA 424 RI, que foi a cultivar com maior área plantada nas últimas safras (IRGA, 2023a).

Os tratamentos utilizados no experimento visavam gerar variabilidade de crescimento nas plantas, ao longo do ciclo da cultura, permitindo com que se observe diferenças no *status* nutricional de N, por isso, foi proposto a aplicação de diferentes doses de nitrogênio em cobertura (0, 60, 120, 180 e 240 kg N ha⁻¹), parceladas em duas épocas.

O delineamento experimental adotado foi o de blocos casualizados, com quatro repetições, totalizando 20 unidades experimentais. A unidade experimental correspondeu a nove linhas de plantas com 7 m de comprimento e espaçamento entrelinhas de 0,17 m, totalizando 10,70 m².

As práticas de manejo adotadas durante o experimento consistiram em semeadura, adubação de base, adubação de N em cobertura (tratamentos), entrada de água, manejo de plantas daninhas, pragas e doenças e colheita. A Tabela 1 detalha o momento, o manejo e o insumo utilizado em cada atividade.

Os tratos culturais visando o controle de plantas daninhas foram realizados em pré e pós-semeadura do arroz. Para o primeiro ano de experimento, no dia 17 de setembro de 2021, foi realizada a dessecação pré-semeadura, com a utilização de glifosato (4 L ha⁻¹) + finale (3 L ha⁻¹) e, no segundo ano, no dia 23 de setembro de 2022, com glifosato (4 L ha⁻¹) + poquer (0,8 L ha⁻¹) + óleo mineral (150 mL ha⁻¹). Para a aplicação no ponto de agulha foram utilizados os herbicidas glifosato (3,5 L ha⁻¹) + gamit (1,5 L ha⁻¹), nos dias 19 de outubro de 2021 e 21 de outubro de 2022. No controle de daninhas pós-emergente, as aplicações consistiram em ricer (200 mL ha⁻¹) + clincher (2,5 L ha⁻¹) + assist (1,5 L ha⁻¹) em 08 de novembro de 2021 e ricer (200 mL ha⁻¹) + clincher (2,0 L ha⁻¹) + assist (0,5 L ha⁻¹), em 18 de novembro de 2022.

Conforme as indicações técnicas da cultura do arroz irrigado (SOSBAI, 2022), não foi necessário realizar o controle de pragas, pois o nível de dano econômico não foi

atingido com a população de insetos presentes, em ambos os anos, na área do experimento. Também não foi realizado o manejo de doenças, devido às características da cultivar escolhida, que apresenta boa tolerância às principais doenças do arroz e também porque não havia pressão de inóculo na área para desenvolvimento das mesmas. O monitoramento foi realizado semanalmente até o final do ciclo da cultura, não sendo observado redução do vigor das plantas e nem sintomas de danos por pragas e doenças.

TABELA 1. Práticas de manejo adotadas no experimento nas safras 2021/22 e 2022/23.

Safra	Data	Manejo	Insumos utilizados
2021/22	11/10/2021	Semeadura do arroz	Sementes tratadas (105 kg ha ⁻¹)
	11/10/2021	Adubação de base*	64 kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅ + 102 kg ha ⁻¹ de K ₂ O
	26/10/2021	Emergência do arroz	-
	08/11/2021	Entrada de água	Irrigação por inundação
	08/11/2021	1º adubação de cobertura	² / ₃ da dose de N (ureia)
	07/12/2021	2º adubação de cobertura	¹ / ₃ da dose de N (ureia)
	23/02/2022	Colheita	Colheita manual
2022/23	18/10/2022	Semeadura do arroz	Sementes tratadas (105 kg ha ⁻¹)
	18/10/2022	Adubação de base*	68 kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅ + 108 kg ha ⁻¹ de K ₂ O
	29/10/2022	Emergência do arroz	-
	17/11/2022	Entrada de água	Irrigação por inundação
	17/11/2022	1º adubação de cobertura	² / ₃ da dose de N (ureia)
	14/12/2022	2º adubação de cobertura	¹ / ₃ da dose de N (ureia)
	13/03/2023	Colheita	Colheita manual

* Considerado a análise de solo. A alta de recomendação para fósforo e potássio visou garantir que os demais nutrientes não fossem limitantes à cultura e não afetassem as variáveis avaliadas.

4.2.3 Variáveis analisadas

4.2.3.1 Determinação da reflectância do dossel do arroz

A avaliação da reflectância do dossel foi realizada através do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) obtido pelo sensor ativo de dossel Greenseeker. O funcionamento do sensor é baseado em diodos de emissão de radiação na faixa do vermelho (650 ± 10 nm) e infravermelho próximo (770 ± 15 nm) para determinação da reflectância, onde a radiação emitida no dossel da cultura é refletida e, então, medida por um fotodiodo do equipamento. Os dados gerados a partir destas informações são

calculados por um microprocessador interno, e assim, fornecem o valor do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) (Ntech Industries, 2013).

Ao longo das safras foram realizadas 9 leituras, entre os estádios de desenvolvimento de quatro folhas completamente expandidas (V_4), até o florescimento pleno (R4), em todo o comprimento das linhas de cada parcela. As avaliações foram realizadas com o aparelho posicionado paralelamente às linhas da cultura, em uma altura entre 0,8 e 1,0 m acima do topo do dossel. As leituras foram realizadas por ocasião do deslocamento linear do equipamento sobre a unidade experimental e largura útil captada pelo sensor (0,7 m). Após o acionamento do sensor, são realizadas as leituras a cada 0,1 segundo, totalizando cerca de 60 pontos medidos em toda a extensão da unidade experimental. O NDVI é calculado a partir da relação $(\rho_{ivp} - \rho_v)/(\rho_{ivp} + \rho_v)$, onde ρ_{ivp} e ρ_v se referem à reflectância do infravermelho próximo e vermelho, respectivamente (Rouse *et al.*, 1974).

4.2.3.2 Determinação da área sob a curva de progresso do NDVI

A área sob a curva de progresso é uma metodologia utilizada na área de fitopatologia para avaliar a taxa de progresso de uma determinada doença em diferentes genótipos (Amorim, 1995). No presente estudo essa metodologia foi adaptada para avaliar o progresso do NDVI em relação às doses de nitrogênio utilizadas e a resposta no crescimento das plantas.

A partir dos dados coletados nas nove avaliações de NDVI ao longo do ciclo da cultura foi realizado o cálculo integral da área abaixo da curva do progresso do NDVI, baseado no método Simpson, com o auxílio do pacote Bolstad2 do software R Studio (Bolstad, 2009).

4.2.3.3 Rendimento de grãos e componentes de rendimento

O rendimento de grãos foi obtido a partir da colheita da área útil da parcela (1,7 m²), após desconsiderar as bordaduras, totalizando 5 linhas, com dois metros lineares de comprimento. Após a trilha, a massa dos grãos de cada parcela foi pesada e corrigida a umidade para 140 g kg⁻¹, sendo o valor extrapolado para kg por hectare.

A determinação dos componentes de rendimento foi realizada pela contagem do número de panículas m⁻², do número de grãos cheios por panícula e do peso dos grãos. Foram coletadas 10 panículas para as determinações do número de grãos por panícula e do peso dos grãos.

4.2.4 Análise estatística

Os dados foram previamente analisados para detectar a presença de *outliers*. Posteriormente, foi realizado o teste de normalidade dos resíduos e homogeneidade das variâncias, os quais atenderam os pressupostos da análise paramétrica, sendo então submetidos à análise de variância pelo teste F ($p \leq 0,05$).

Foi realizada a diferença das médias dos valores do NDVI pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$) em cada tratamento considerando os estádios fenológicos da cultura (progressão do NDVI ao longo do ciclo). Foi calculado a integral da área abaixo da curva do progresso de NDVI, individualmente, em cada tratamento. Após, foi realizado o teste de Tukey, a nível de 5% de significância, para verificar se houve diferença entre as áreas do NDVI em função das doses de N aplicadas.

Através do teste de Tukey, comparou-se o rendimento final de grãos e os componentes do rendimento em cada tratamento, para cada safra estudada. Também verificou a relação entre a dose de N aplicada e o rendimento de grãos. Verificou-se também a relação entre a área abaixo da curva com o rendimento final de grãos e as médias de NDVI nos estádios de 7,8 e 9 folhas completamente expandidas e a diferenciação da panícula com o rendimento de grãos, através da análise de regressão, com o auxílio do programa estatístico Sigma Plot versão 14.0.

4.3 Resultados e Discussão

As variações nas doses de nitrogênio utilizadas foram eficientes em criar a variabilidade para detecção da disponibilidade de nitrogênio e o crescimento das plantas de arroz irrigado ao longo do ciclo da cultura.

A variação nos valores do NDVI ao longo do ciclo de desenvolvimento do arroz, para as safras 2021/22 e 2022/23, podem ser observadas na Figura 1. As variações observadas ao longo do ciclo em relação ao valor do NDVI ocorrem devido às diferenças no acúmulo de biomassa na parte aérea e também no acúmulo de nitrogênio no tecido vegetal (Li *et al.*, 2020) em função das doses de N utilizadas. A maior disponibilidade de nitrogênio proporciona incrementos no acúmulo de biomassa e na quantidade de moléculas de clorofila nas plantas (Cao *et al.*, 2017). A maior quantidade de biomassa aumenta a reflectância na região do infravermelho próximo (NIR; 770 ± 15 nm) enquanto que a maior quantidade de clorofila diminui a reflectância do dossel na faixa do vermelho (650 ± 10 nm) (Serrano & Filella & Penuelas, 2000), como consequência maiores valores de NDVI são obtidos quando há essa combinação.

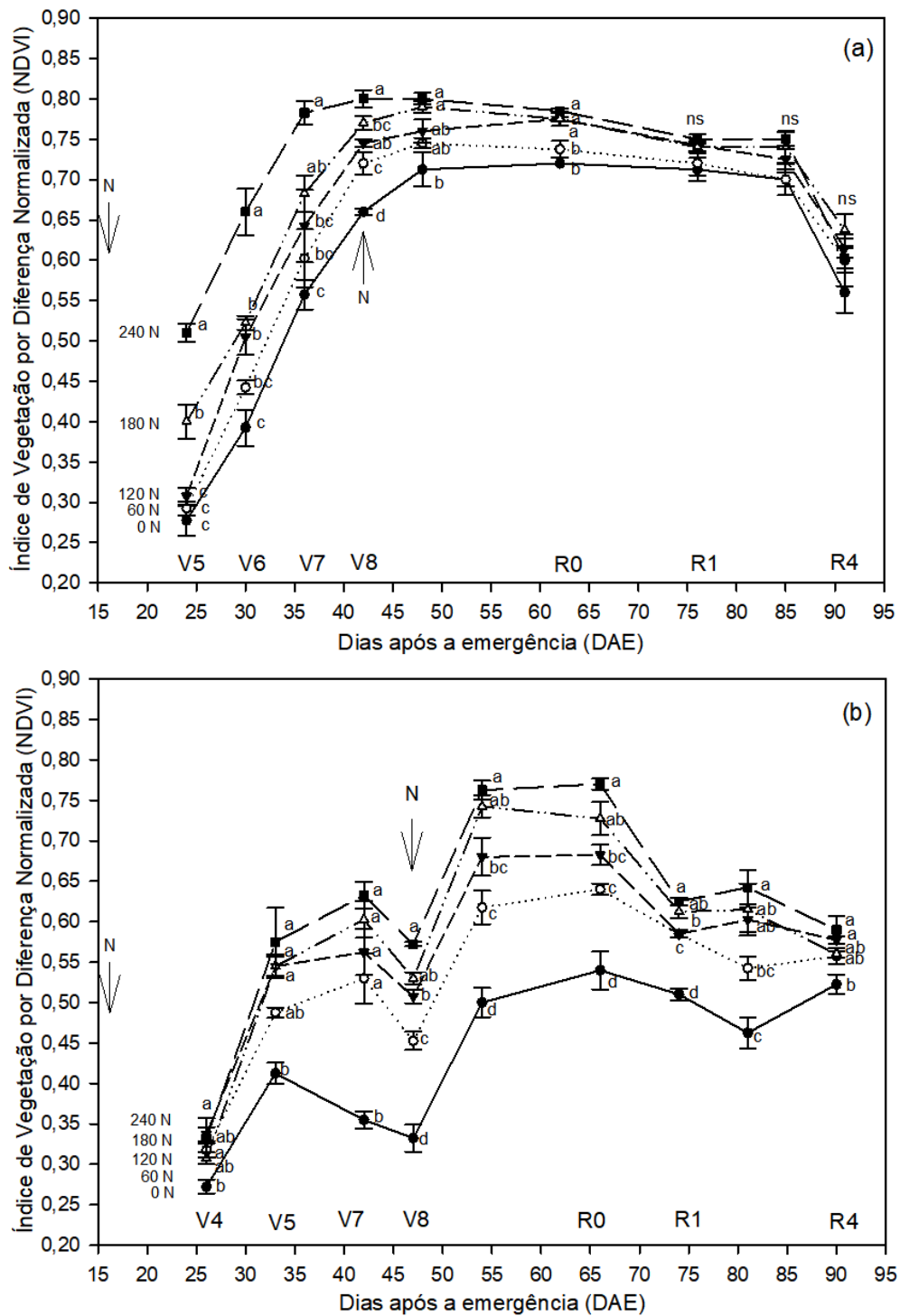


FIGURA 1. Dinâmica temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), obtido a partir de sensor óptico ativo, em função dos dias após a emergência (DAE) e a disponibilidade de nitrogênio, nas safras 2021/22 (a) e 2022/23 (b). As setas indicam os momentos da aplicação de nitrogênio em cobertura. Barras indicam o erro padrão da média. Letras minúsculas comparam médias a 5 % de significância, dentro de cada data de avaliação. ns = não significativo.

Os valores de NDVI, em todos os tratamentos, aumentaram, de maneira geral, na safra 2021/2022, desde o estágio de quatro a cinco folhas completamente expandidas

(aproximadamente aos 20-25 DAE) até a iniciação da panícula (estádio R₀, aproximadamente 60-65 DAE). Nos estádios reprodutivos, entre R₁ até próximo ao florescimento pleno (R₄, 91 DAE) houveram pequenas variações entre aumento ou queda do NDVI nos tratamentos e, em R₄, observa-se uma queda no valor do NDVI, independente do tratamento (Figura 1a). Os menores acréscimos nos valores de NDVI ao longo do ciclo da cultura foram observados nos tratamentos que não receberam N ou que receberam uma dose pequena (60 kg N ha⁻¹), enquanto que valores superiores foram advindos dos tratamentos com maiores doses de N. As diferenças de NDVI são resultantes das diferentes doses de N aplicadas, ocasionando variação na disponibilidade deste nutriente, as quais afetam a quantidade absorvida pela planta (Smith *et al.*, 2017).

Comportamento semelhante foi observado na safra 2022/2023 (Figura 1b) porém, nessa última, é possível constatar quedas nos valores de NDVI em dois momentos do ciclo, nos estádios V₈ (47 DAE) e R₁ (74 DAE), em todos os tratamentos, com exceção do tratamento sem N, que apresentou essa queda um pouco mais cedo (aos 40 DAE e 60 DAE). As quedas nos valores mostram a sensibilidade da detecção, pelo NDVI, de estresses que ocorrem nas plantas (Figueiredo, 2005). Na segunda safra (2022/23), o manejo da irrigação foi prejudicado devido aos baixos acumulados de precipitação registrados em alguns momentos (Figura 2), o que levou à supressão da lâmina de água na área do experimento entre 40 a 75 DAE. A alternância da quantidade de água além de resultar em estresse hídrico as plantas também resulta em perdas de nutrientes, como o N (Knoblauch *et al.*, 2011), que conjuntamente com a menor disponibilidade de radiação solar (Figura 2) reduz ainda mais a sua assimilação (Taiz *et al.*, 2017). Ainda, foram registrados ventos noturnos frios, o que levou a queima das pontas das folhas, afetando a radiação refletida e absorvida pelas plantas (Figuereido, 2005). Duan *et al.* (2021) também identificaram diferenças significantes nos valores de NDVI em anos e locais com diferenças climáticas, reflexo da dinâmica de acúmulo de biomassa e nitrogênio, que afetam a reflectância do dossel.

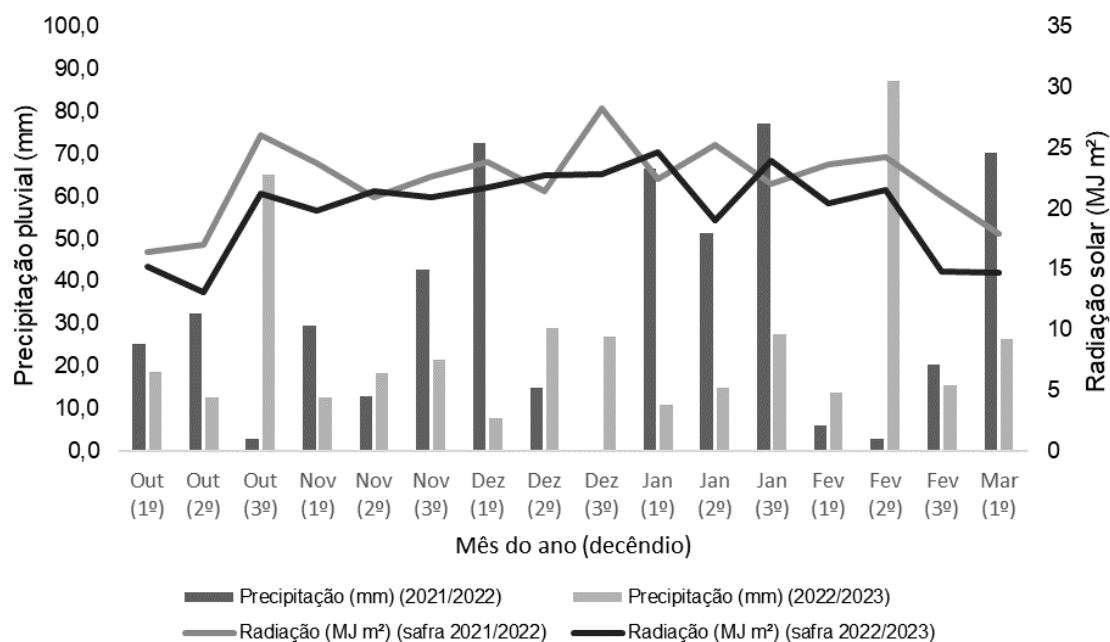


FIGURA 2. Precipitação pluvial e radiação solar, nas safras 2021/2022 e 2022/2023, na Estação Experimental do Arroz (EEA/IRGA).

O nitrogênio aplicado no estágio de três folhas completamente expandidas (V_3) foi rapidamente absorvido e utilizado pelas plantas, uma vez que cerca de 10 dias após a aplicação já é possível observar as diferenças dos valores de NDVI crescentes acompanhando o aumento das doses de nitrogênio (Figura 1). Maiores valores são observados nos tratamentos com maiores doses de nitrogênio, principalmente à medida que a planta foi se desenvolvendo. O maior aporte de N, na primeira aplicação, favorece o perfilhamento do arroz, bem como o desenvolvimento vegetativo, contribuindo para o aumento da densidade de moléculas de clorofila nas folhas e biomassa da cultura (Scivittaro *et al.*, 2018), o qual refletiu em aumentos no valor do NDVI.

A segunda aplicação de N em cobertura, realizada no estágio V_8 , favorece a manutenção viável dos perfilhos, alongação do colmo principal e formação da panícula (SOSBAI, 2022). Dessa forma, espera-se que, com o maior crescimento das plantas, maiores sejam os valores de NDVI, principalmente em doses maiores de N, em virtude da absorção e utilização do nutriente para acúmulo de biomassa. Todavia, na prática, quando as plantas apresentam alto aporte de biomassa, principalmente na fase reprodutiva, o índice pode saturar e não acompanhar progressivamente este aumento.

O fenômeno da saturação do NDVI é comum e ocorre quando o dossel atinge 100% de cobertura. Isso acontece porque a reflectância do infravermelho próximo continua a aumentar, mas a reflectância do vermelho exibe uma leve diminuição, resultando apenas em pequenas alterações no denominador que tem impacto muito maior na proporção do que o numerador (Thenkabail *et al.*, 2002).

Na safra 2021/22 constatou-se alto aporte de biomassa das plantas de arroz a partir de R₁ (74 DAE), ocasionando a saturação do NDVI que não foi mais capaz de detectar as diferenças entre o desenvolvimento das plantas nos diferentes tratamentos estudados. A saturação do NDVI, a partir da iniciação da panícula (R₀), também foi relatada por Gnyp *et al.* (2014), Yao *et al.* (2014), Kanke *et al.* (2016), Rehman *et al.* (2019) e Duan *et al.* (2021). Os valores do índice nestes trabalhos variaram de 0,73 a 0,90, enquanto que, no presente estudo, na safra 2021/22, foram encontrados valores entre 0,70 a 0,80. Em relação à queda dos valores registrado no florescimento pleno (R₄, 90 DAE), o mesmo ocorre em decorrência do início da senescência foliar e da extrusão das panículas, que, ao apresentarem coloração mais clara, aumentam a reflectância no vermelho, reduzindo o valor de NDVI (Variani, 2011).

Na segunda safra (2022/23) os valores de NDVI foram mais baixos, chegando a um valor máximo de 0,76 nos tratamentos com maiores doses de N (55-65 DAE) (Figura 1b). Neste ano, o fenômeno de saturação não foi observado uma vez que as plantas estavam apresentando acúmulos de biomassa menores e encontravam-se mais amareladas, com as pontas das folhas queimadas, o que possibilitou que o NDVI detectasse por um período de tempo maior as diferenças na reflectância do dossel das plantas.

De maneira geral, ao longo do ciclo da cultura para ambos os anos estudados, o NDVI mostrou alterações no seu valor em função da dose de N aplicada em que, quanto maior a dose, maior o NDVI, resultado do maior incremento da biomassa da parte aérea e N acumulado, que afetou a reflectância do dossel. Kanke *et al.* (2016), Rehman *et al.* (2019) e Padhan *et al.* (2023) também constataram que a aplicação de doses crescentes de N aumentou os valores de NDVI.

A avaliação do NDVI em vários momentos do ciclo da cultura é crucial para estimativas mais precisas deste monitoramento. De acordo com Lu *et al.* (2022), o estágio de crescimento da cultura e a adubação de N são os fatores agrônômicos mais importantes para prever os indicadores do *status* de N, seguidos pelos fatores ambientais (clima e solo). Dessa forma, para uma avaliação mais assertiva do estado nutricional, considerando os aspectos das plantas, deve-se avaliar três estádios ou mais.

Para quantificar o comportamento do NDVI ao longo do ciclo de desenvolvimento, nas diferentes doses de N, foi realizado o cálculo da área sob a curva de progresso do NDVI, considerando os 9 estádios avaliados, para cada dose e ano, individualmente. A área sob a curva de progresso é um parâmetro frequentemente utilizado para avaliar o progresso de doenças ao longo do desenvolvimento da cultura. A partir do valor obtido

nessa área é possível avaliar o progresso da doença, à campo, desde a primeira avaliação, permitindo comparar o comportamento de cada genótipo em função do tempo. Quanto maior a área obtida, em unidades de área, maior é a incidência ou severidade da doença na cultura. Essa associação também permite identificar o grau de resistência dos genótipos em relação às doenças (Amorim, 1995). No presente trabalho utilizou-se do mesmo princípio de análise para avaliar o progresso do NDVI e comparar as diferenças em relação ao *status* de N na cultura.

A área sob a curva do progresso do NDVI está apresentada nas Figuras 3 (safra 2021/22) e 4 (safra 2022/23). De maneira geral, quanto maior foi a dose de N aplicada, maiores foram os valores de NDVI e maior foi a área abaixo da curva, em ambos os anos estudados.

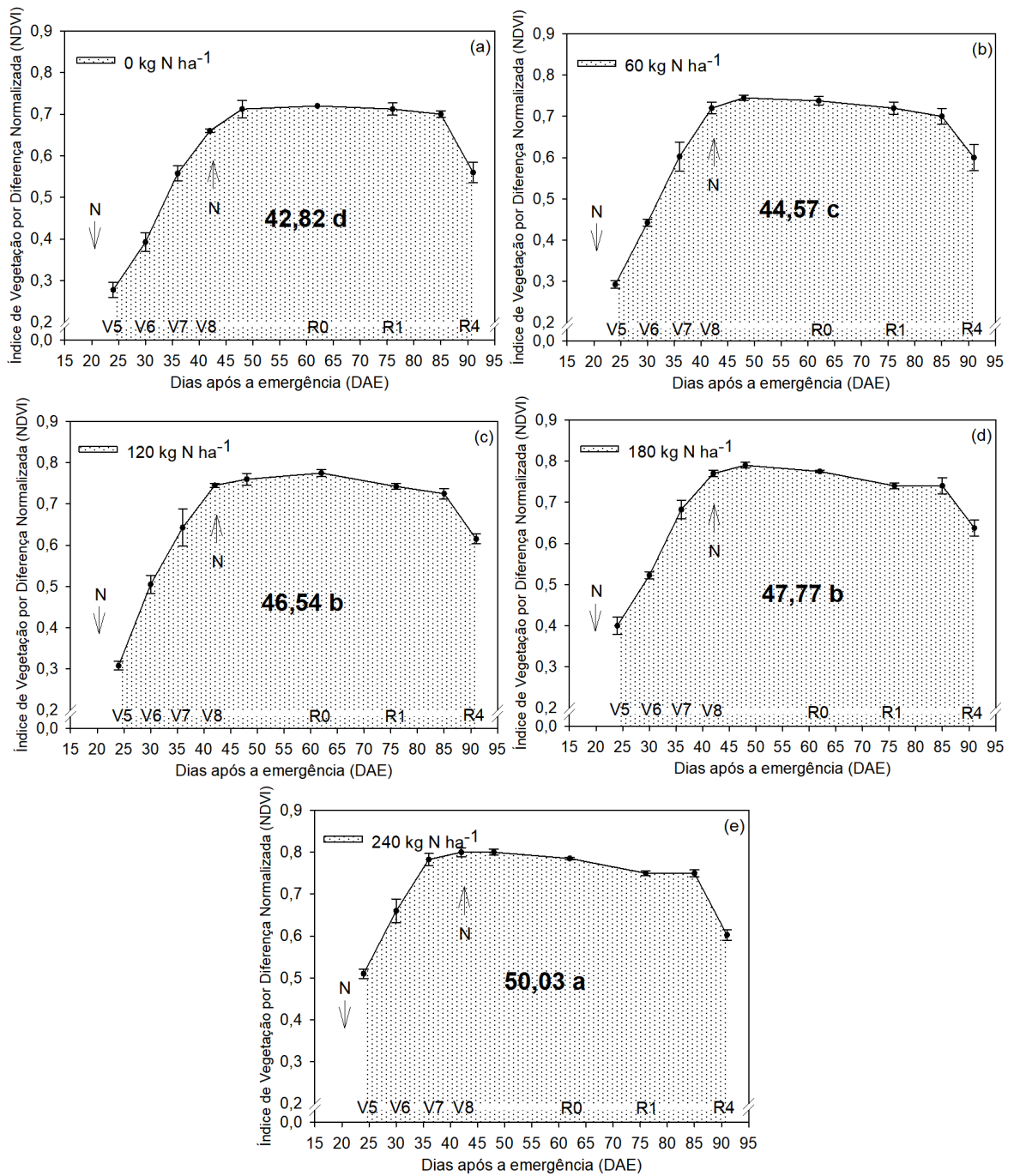


FIGURA 3. Área sob a curva de progresso do NDVI, na safra 2021/22, nos tratamentos sem N (a), 60 kg N ha⁻¹ (b), 120 kg N ha⁻¹ (c), 180 kg N ha⁻¹ (d) e 240 kg N ha⁻¹ (e). As setas indicam os momentos da aplicação de nitrogênio em cobertura. Barras indicam o erro padrão da média. Letras minúsculas comparam a média a 5 % de significância entre os tratamentos.

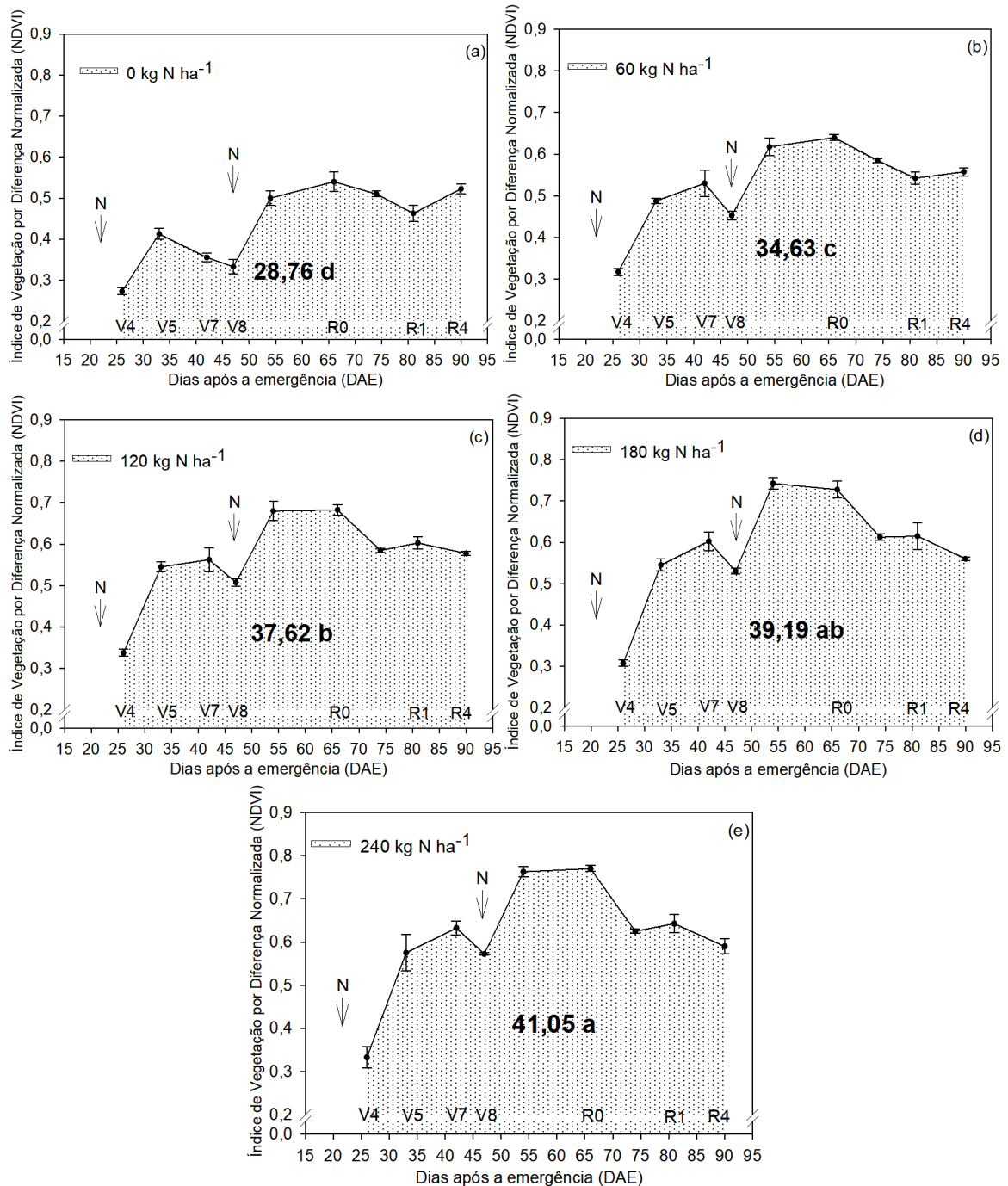


FIGURA 4. Área sob a curva de progresso do NDVI, na safra 2022/23 nos tratamentos sem N (a), 60 kg N ha⁻¹ (b), 120 kg N ha⁻¹ (c), 180 kg N ha⁻¹ (d) e 240 kg N ha⁻¹ (e). As setas indicam os momentos da aplicação de nitrogênio em cobertura. Letras minúsculas comparam a média a 5 % de significância, entre os tratamentos. Barras indicam o erro padrão da média.

O valor correspondente a unidades de área indica o comportamento do NDVI ao longo do ciclo da cultura. Na primeira safra (Figura 3), as diferenças da área sob a curva nos diferentes tratamentos são menores do que a safra 2022/23 (Figura 4), o que é justificado pelas diferenças de crescimento e desenvolvimento das plantas encontradas à campo nos diferentes anos.

Na safra 2022/23 foram constatados problemas decorrentes a falta de água para manutenção da lâmina de água para irrigação por inundação na área, o que pode ter causado além de estresse hídrico nas plantas, a perda do N aplicado pelo processo de volatilização de amônia, principalmente a partir de V₈. Ainda, temperaturas do ar mais baixas no início do ciclo com ventos noturnos atrasaram o desenvolvimento da cultura. Tais fatores afetaram a capacidade das plantas em acumular biomassa e produzir moléculas de clorofila, interferindo na reflectância do dossel. Com isso, a área calculada em cada estádio reduziu, principalmente nos tratamentos com doses mais baixas de nitrogênio. Maiores doses de nitrogênio proporcionaram maiores áreas sob a curva de progresso de NDVI, que está relacionado ao maior crescimento das plantas. Esta metodologia pode ser um guia para comparar diferentes áreas na lavoura de acordo com o estado nutricional da cultura.

As diferenças no crescimento das plantas, em virtude das diferentes doses de nitrogênio aplicadas em cobertura e detectadas pelo NDVI e área sob a curva, refletiram no rendimento final de grãos da cultura (Figura 5). Como o nitrogênio é o nutriente de maior importância para a produtividade do arroz, propiciando as maiores respostas à adubação (Scivittaro *et al.*, 2018), o seu aporte via adubação mineral é responsável pelo aumento no rendimento de grãos e pela maximização dos componentes do rendimento do arroz, como o número de perfilhos e de panículas por unidade de área (Singh & Pillai, 1996), o número de espiguetas por panícula e o peso de grãos (Marzari, 2005). Deste modo, o suprimento adequado de N para as plantas, considerando o seu estado nutricional em relação a este nutriente, se reflete diretamente em maiores rendimentos de grãos.

A relação entre o rendimento final de grãos e a dose de nitrogênio aplicada na cultura foi verificada no presente estudo. Para ambos os anos, a dose de nitrogênio utilizada pode explicar 87% (2021/22) e 86% (2022/23) da variação do rendimento de grãos, relacionando-se linearmente e positivamente com a produtividade de grãos da cultura (Figura 5). Os componentes de rendimento também responderam em função da dose de N aplicada, para ambas as safras (Tabela 2).

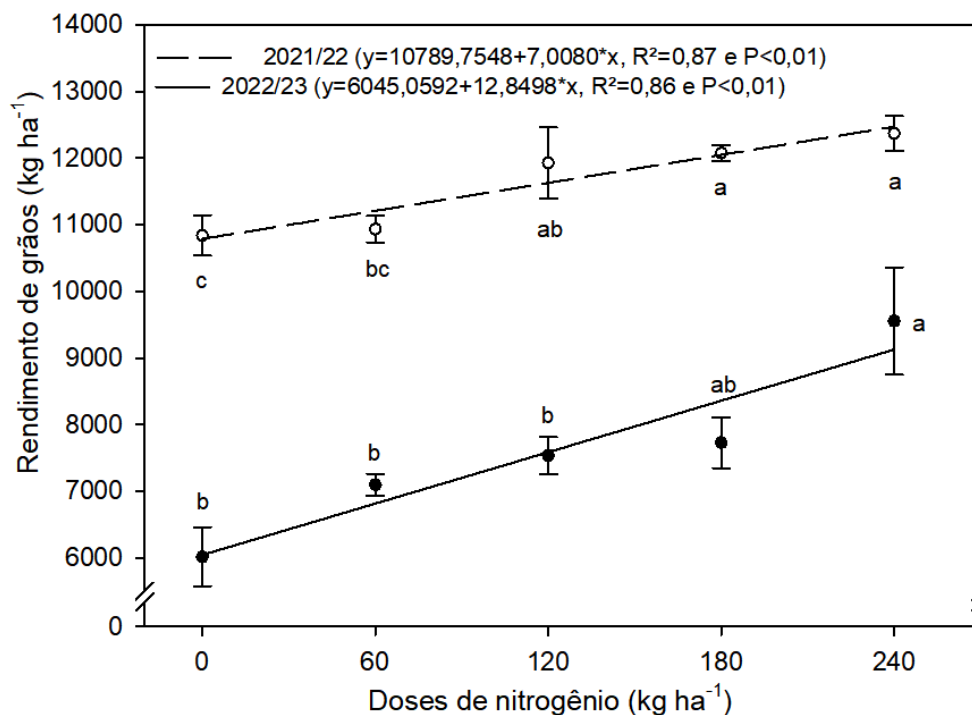


FIGURA 5. Rendimento de grãos de arroz irrigado, em função de doses de nitrogênio aplicadas em cobertura, nas safras 2021/22 e 2022/23. Barras indicam o erro padrão da média. Linha tracejada indica safra 2021/22 e linha cheia indica safra 2022/23. Letras minúsculas comparam a média a 5 % de significância, entre os tratamentos em cada safra.

TABELA 2. Componentes de rendimento do arroz irrigado, em função de doses de nitrogênio aplicadas em cobertura, nas safras 2021/22 e 2022/23. Letras minúsculas comparam a média a 5 % de significância, entre os tratamentos. ns= não significativo.

	Doses N	Plantas/m ²	Panículas/ plantas	Panículas/m ²	Peso do grão (g)	Grãos/ panícula	Esterilidade (%)
Safra 2021/22	0	154 ns	3,4 c	456 b	1,8 ns	76 ns	10,9 ns
	60	144	4,1 bc	533 b	2,1	89	10,6
	120	121	6,5 a	751 a	1,9	84	11,2
	180	126	6,1 ab	793 a	2,2	91	10,5
	240	143	6,5 a	877 a	2,2	89	8,3
Safra 2022/23	0	190 ns	2,2 b	448 b	1,5 b	64 b	4,5 ns
	60	213	2,4 ab	487 ab	1,7 ab	74 ab	4,6
	120	210	2,8 ab	510 ab	1,9 ab	84 ab	4,6
	180	215	3,3 ab	593 ab	2,0 a	88 a	4,3
	240	225	3,4 a	726 a	1,8 ab	74 ab	4,2

Na safra 2021/22, a produtividade da cultura foi alta mesmo em doses menores de nitrogênio. Por outro lado, no segundo ano de estudo (2022/23) produtividades abaixo do esperado foram encontradas, inclusive nos tratamentos com alto aporte de N aplicado. Estas diferenças de produtividade entre os anos ocorreu em decorrência do manejo da irrigação e das condições climáticas registradas.

Na primeira safra a cultura encontrou boas condições para seu desenvolvimento, com acumulados de precipitação (Figura 2) suficientes para manutenção da lâmina de água na área do experimento, maior disponibilidade de radiação solar, maximizando processos fotossintéticos e assimilação de N (Taiz *et al.*, 2017) e temperatura do ar dentro da faixa do ideal para o arroz (Yoshida, 1981), o que resultou na maximização dos os componentes de rendimento (Tabela 2) e incrementos no rendimento de grãos (Figura 5).

Em contrapartida, na safra 2022/23, condições opostas foram observadas à campo. Durante toda a safra, menores acumulados de precipitação foram registrados (Figura 2), o que levou a uma redução da disponibilidade de água para manter a lâmina de irrigação, resultando em períodos de solo úmido a seco, nos estádios de 7 folhas completamente expandidas até próximo ao florescimento pleno da cultura (R₄). Neste contexto, além do estresse hídrico causado pela redução da disponibilidade de água às plantas, a alternância na altura da lâmina de água resulta em perdas de nutrientes, principalmente de nitrogênio (Knoblauch *et al.*, 2011), sugerindo que grande parte da segunda aplicação de N em cobertura possa ter sido perdida pelo processo de volatilização de amônia.

Menor disponibilidade de radiação solar também foi registrada nesta safra, sobretudo a partir do estádio de iniciação da panícula (R₀), o que também pode ter contribuído para as menores produtividades, visto que o rendimento de grãos em arroz é influenciado pela disponibilidade de radiação solar, principalmente nos estádios reprodutivos (da diferenciação da panícula à floração) e de maturação (da floração à maturação fisiológica do grão) (Yoshida & Parao, 1976; Yoshida, 1981). A menor radiação solar pode levar a redução do rendimento de grãos em até 800 kg ha⁻¹ e o aumento no aporte de N pode minimizar essas perdas (Steinmetz & Deibler & Silva, 2013), corroborando com os resultados do presente trabalho.

Entretanto, apesar das diferenças na produtividade do arroz nas safras estudadas, as maiores doses de nitrogênio aplicadas, indiferente do ano, proporcionaram maior crescimento nas plantas, que foi detectado pelas diferenças da reflectância do dossel, através do NDVI (Figura 1, 3 e 4) e, maiores produtividades (Figura 5). Portanto, relacionar o NDVI com o rendimento de grãos é uma metodologia que possibilita identificar áreas com maiores ou menores necessidades de suprimento de N durante o ciclo da cultura.

Singh *et al.* (2015) relataram que o sensor óptico GreenSeeker pode prever o rendimento de grãos, através da medição de NDVI, ao longo do ciclo do arroz. Wang *et al.* (2019) encontraram valores de R²= 0,75 ao relacionarem os valores de NDVI de diferentes

estádios de crescimento do arroz com a produtividade, demonstrando uma alta precisão na estimativa da produtividade, enquanto que Zhou *et al.* (2017) relataram que, na estimativa com dois ou mais estádios de crescimento, 76% da variação da produtividade foi explicada pelo NDVI.

Considerando as nove avaliações realizadas em ambas as safras, para uma análise completa abrangendo todo o ciclo da cultura (de V₄₋₅ a R₄), testou-se a relação entre o progresso do NDVI e o rendimento final de grãos do arroz. Para tal procedimento foram utilizados os valores calculados da área sob a curva de cada dose com a média da respectiva produtividade, onde foi realizado o ajuste de uma regressão única para integrar ambos os anos estudados. Com isso, observa-se que 92% da variabilidade do rendimento final de grãos pode ser explicada pelo progresso do NDVI (Figura 6), indicando a confiabilidade da aplicação da área sob a curva de progresso do NDVI para prever o rendimento de grãos da cultura. Quanto maior a área abaixo da curva do progresso do NDVI, maior foi a produtividade do arroz, indicando que as diferenças no *status* de N nas plantas influenciam no rendimento de grãos e podem ser identificadas pelo NDVI.

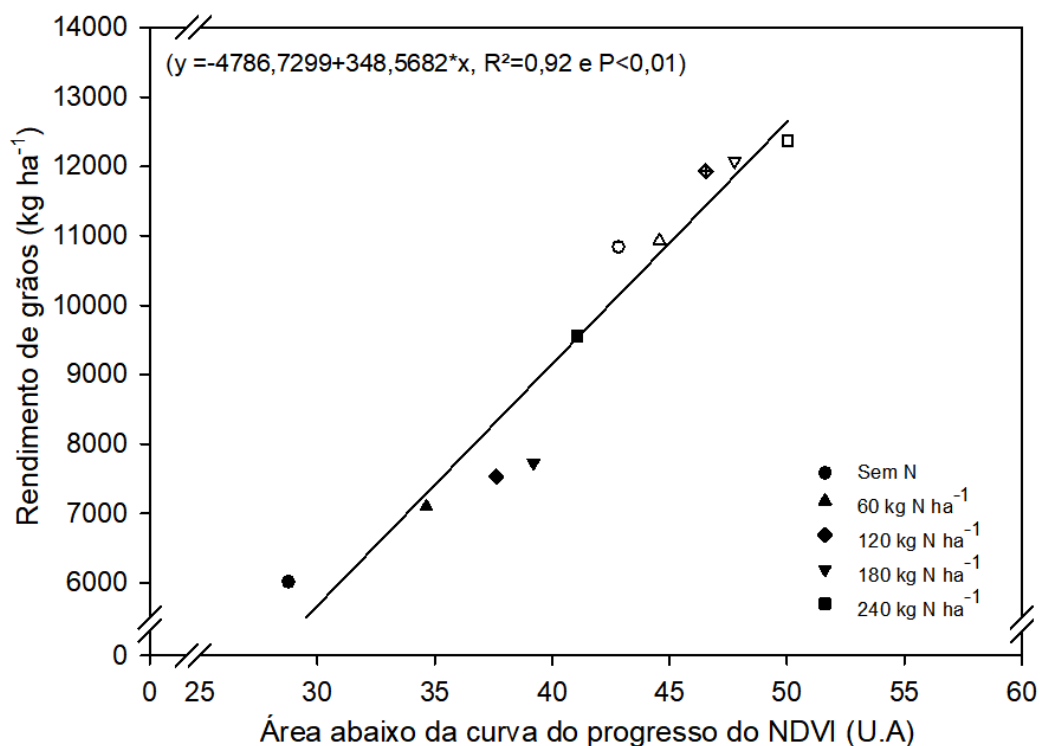


FIGURA 6. Relação entre o rendimento de grãos de arroz e a área sob a curva do progresso do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), em função de doses de nitrogênio aplicadas em cobertura, nas safras 2021/22 (símbolos vazados) e 2022/23 (símbolos cheios).

Apesar da forte relação entre o progresso do NDVI e a produtividade em todo o ciclo da cultura, a determinação do NDVI em estádios mais tardios, após a iniciação da

panícula, pode não ter mais impactos sobre estratégias de manejo da adubação nitrogenada para o aumento da produtividade final. Isso porque, neste momento, o potencial de rendimento da cultura já está praticamente estabelecido (SOSBAI, 2022). Pensando no ajuste da dose para maximizar o rendimento de grãos, considerando os aspectos das plantas, a avaliação do *status* nutricional das plantas de arroz deve ocorrer entre sete folhas completamente expandidas até a iniciação da panícula, permitindo assim, um ajuste da dose que será aplicada na segunda adubação em cobertura, potencializando a sobrevivência dos perfilhos, número de panículas por m², número de grãos por panícula e peso dos grãos (Singh & Pillai, 1996; Marzari, 2005).

Desta forma, os valores indicados pelo NDVI, servem como parâmetros para guiar a adubação, evitando a sub e a superfertilização das áreas, melhorando a eficiência do nitrogênio além de possibilitar um ajuste da dose para maximizar a produtividade de grãos, uma vez que são consideradas as variações de disponibilidade do N no solo e a demanda nutricional da planta ao longo do seu desenvolvimento (Molin, 2001; Poletto, 2004). O ajuste da dose de N de acordo com as necessidades da cultura proporciona maiores incrementos na biomassa que se traduz, na maioria das vezes, em maiores produtividades (Cao *et al.*, 2017). Portanto, a estimativa do rendimento de grãos em momentos cruciais do desenvolvimento da cultura, como nos estádios preconizados para suprimento da adubação nitrogenada, a partir do NDVI, possibilita identificar áreas na lavoura que estão produzindo menos e assim ajustar a dose conforme as necessidades das plantas.

Relacionando os valores médios do NDVI obtido nos estádios de 7, 8 e 9 folhas completamente expandidas e na iniciação da panícula (R_0) das plantas de arroz com o rendimento final da cultura, para as diferentes doses de N aplicadas e as duas safras estudadas, constatou-se boas relações entre estas variáveis. Os valores dos coeficientes de determinação e as equações encontram-se descritas na Figura 7a (safra 2021/22) e Figura 7b (safra 2022/23).

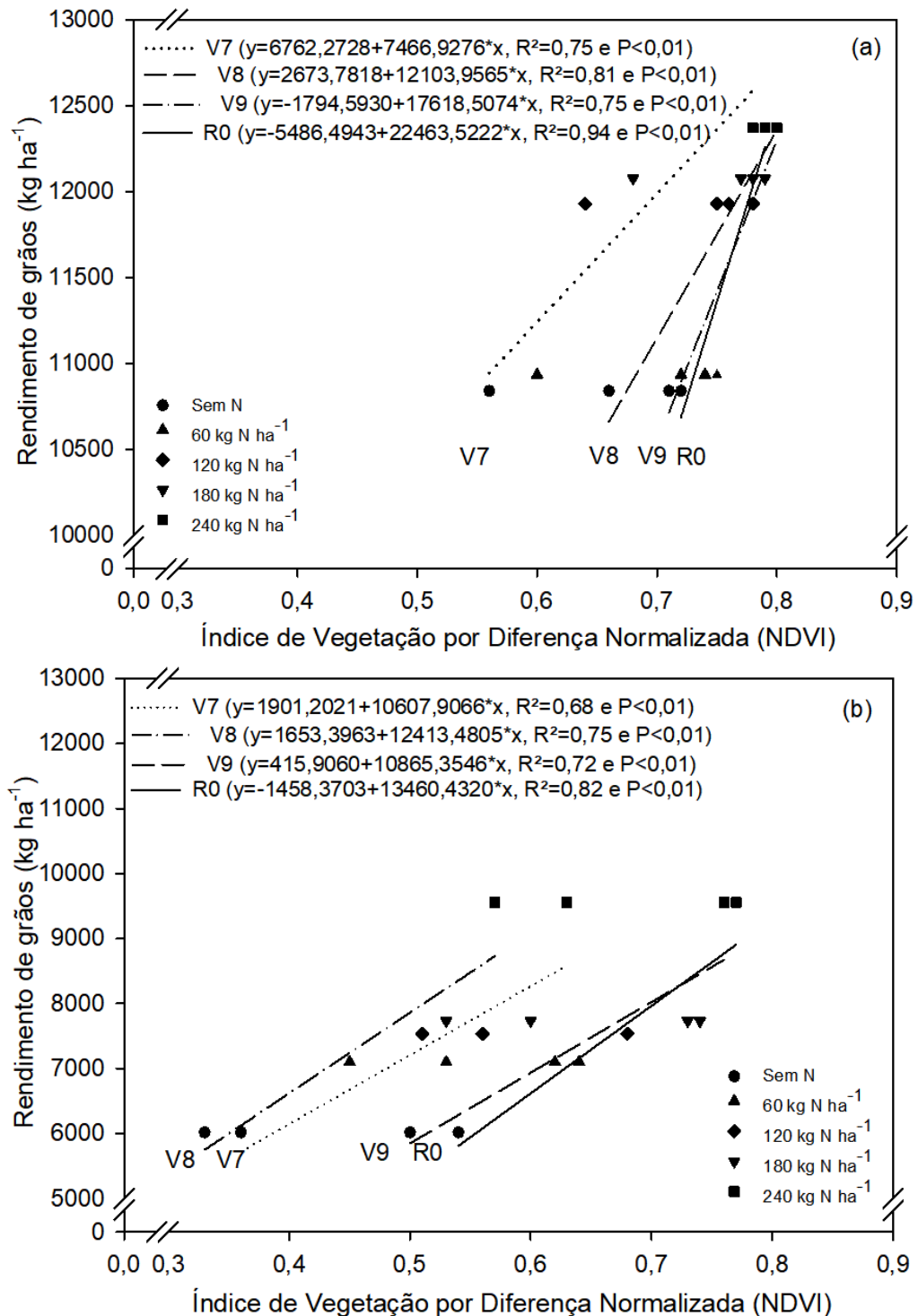


FIGURA 7. Relação entre o rendimento de grãos de arroz e o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) nos estádios de 7, 8 e 9 folhas completamente expandidas e na iniciação da panícula (R₀), nas safras 2021/22 (a) e 2022/23 (b).

Corroborando com os resultados neste trabalho, Nakano *et al.* (2023) observaram forte relação entre o NDVI medido pelo sensor GreenSeeker e o rendimento de grãos no arroz, entre três a uma semana antes do estágio de iniciação da panícula (estádio R₀) do arroz, para as diferentes doses de nitrogênio testadas. Em R₀, os valores de NDVI medidos

se correlacionam positivamente com o rendimento de grãos de arroz (Harrell *et al.*, 2011; Ali *et al.*, 2014; Xue *et al.*, 2014). Islam *et al.* (2021) conseguiram prever o rendimento do arroz a partir do NDVI avaliado nos estádios de nove folhas completamente expandidas e na iniciação da panícula, com altos coeficientes de determinação para essa relação ($R^2=0,91$). Nos mesmos estádios, Wang *et al.* (2019) encontraram as maiores correlações do NDVI com a produtividade do arroz. Esta conclusão é consistente com estudos anteriores conduzidos por Zhou *et al.* (2017), nos quais o estágio de iniciação da panícula foi considerado o estágio ideal de crescimento para a estimativa da produtividade do arroz. A fase de iniciação da panícula é um período de transição do crescimento vegetativo para o reprodutivo e pode se refletir no potencial de rendimento, sendo um momento importante para a adequação da dose de N a ser aplicada considerando o estado nutricional das plantas. Posto isso, a dose de N recomendada na segunda aplicação em cobertura pode levar em consideração o *status* de N da cultura obtido através do NDVI.

Uma vez quantificados os valores de NDVI da cultura do arroz entre V_7 a R_0 , seria possível realizar a adubação em taxa variável de acordo com o potencial produtivo de cada local dentro do talhão. Manejando o nutriente dessa forma, há uma redução na aplicação de insumos em locais onde o potencial produtivo é alto, onde as plantas encontram-se bem supridas, não havendo maiores resposta a incrementos de N (Lamothe *et al.*, 1994). Já em locais na lavoura onde o NDVI é intermediário ou baixo, variando de 0,3 até 0,6, se utilizaria maiores doses de nitrogênio com o objetivo de elevar o potencial produtivo. Em estudos realizados por Yinyan *et al.* (2023), a aplicação de variadas doses de nitrogênio em arroz, guiadas a partir do NDVI, obtido pelo sensor GreenSeeker, ao longo do ciclo de desenvolvimento das plantas, resultou em incrementos no rendimento final de grãos e economia significativa do fertilizante, quando comparado à adubação tradicional pela média. Resultados de experimentos de dez anos realizados por Lu *et al.* (2022) indicaram que o manejo preciso de N no arroz com base no modelo de diagnóstico com índices de vegetação e recomendação personalizada de N na estação de crescimento aumentou significativamente o rendimento do arroz.

Comparado ao manejo tradicional, que utiliza de maiores doses de N na expectativa de maiores respostas ao rendimento final (SOSBAI, 2022), ao considerar a condição nutricional das plantas, o ajuste da dose levaria à redução de custos ao se aplicar menos nitrogênio em locais onde a produtividade não seria afetada, além de redução do impacto ambiental pelas perdas ocorridas do nutriente (Swarbreck *et al.*, 2019). Por outro lado, é possível atingir incrementos na produtividade em locais onde as doses médias definidas

pelas recomendações tradicionais seriam inferiores às necessidades das plantas (Fixen, 2010).

O NDVI apresenta potencial para ser utilizado na detecção da variabilidade espacial causada por diferenças no suprimento de nitrogênio e para o manejo direcionado deste fertilizante em cobertura. Em lavouras comerciais, essas diferenças são ocasionadas por manchas de solo que levam a diferentes níveis de suprimento de N para as plantas, ao longo do desenvolvimento da cultura (Capelli, 1999; Tschiedel & Ferreira, 2002). Identificar essas diferenças e corrigir a dose na segunda aplicação de N em cobertura possibilita a redução de custos, melhora a eficiência do N aplicado e o potencial de rendimento da cultura.

4.4 Conclusões

O desenvolvimento das plantas de arroz irrigado e a produtividade da cultura relacionam-se linearmente e positivamente à dose de nitrogênio aplicada, e estas diferenças são identificadas pelo Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI).

A medição do NDVI no decorrer do desenvolvimento da cultura possibilita acompanhar o *status* nutricional do arroz durante a safra.

É possível prever a produtividade da cultura, ao longo do ciclo de desenvolvimento, pelo acompanhamento da área sob a curva de progresso do NDVI.

Os valores de NDVI nos estádios de 7, 8, 9 folhas completamente expandidas e na iniciação da panícula permitem realizar o ajuste da dose para a segunda aplicação nitrogenada na cultura do arroz e assim maximizar a resposta ao N, evitando desperdícios deste nutriente.

4.5 Referências

ALI, A. M. *et al.* Prediction of dry direct seeded rice yields using chlorophyll meter, leaf color chart and Green Seeker Optical Sensor in northwestern India. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 161, p. 11–15, 2014.

AMORIM, L. Avaliação de doenças. In: BERGAMIM FILHO, A.; KIMATI, H.; AMORIM, L. (Ed.) **Manual de Fitopatologia**. 3 ed. São Paulo: Agronômica Ceres, v.1, 647-671, 1995.

BARAL, B. R. *et al.* Real-time nitrogen management using decision support-tools increases nitrogen use efficiency of rice. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 119, p. 355–368, 2021.

BOLSTAD, W. M. **Understanding Computational Bayesian Statistics**, p. 336, 2009.

BREDEMEIER, C. *et al.* Estimativa do potencial produtivo em trigo utilizando sensor óptico ativo para adubação nitrogenada em taxa variável. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, p. 1147-1154, 2013.

CAO, X. *et al.* Effects of watering regime and nitrogen application rate on the photosynthetic parameters, physiological characteristics, and agronomic traits of rice. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 39, 2017.

CAPELLI, N. L. **Agricultura de precisão – novas tecnologias para o processo produtivo**. [São Paulo]: LIE/DMAQAG/FEAGRI/UNICAMP, 1999. Disponível em: <http://www.bases.cnptia.embrapa.br/cria/gip/gipap/capelli.doc>. Acesso em: 10 set. 2021.

DUAN, B. *et al.* Remote estimation of grain yield based on UAV data in different rice cultivars under contrasting climatic zone. **Field Crops Research**, v. 267, 2021.

FAGERIA, N.K.; BALIGAR, V.C. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. **Advances in Agronomy**. New York, v. 88, n.1, p. 97-185, 2005.

FIGUEIREDO, D. **Conceitos de sensoriamento remoto**. [S. l.: s. n.], 2005. Disponível em: https://www.clickgeo.com.br/wp-content/uploads/2013/04/conceitos_sm.pdf. Acesso em: 12 set. 2021.

FIXEN, P. E. The four rights within a global fertilizer best management practices framework. *In*: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2010. p. 1-22.

GNYP, M. L. Hyperspectral canopy sensing of paddy rice aboveground biomass at different growth stages. **Field Crops Research**, v. 155, p. 42-55, 2014.

HARRELL, D. L. *et al.* Estimating Rice Grain Yield Potential Using Normalized Difference Vegetation Index. **Agronomy Journal**. v. 103, p. 1717-1723, 2011.

IRGA - INSTITUDO RIO GRANDENSE DO ARROZ. **Custo de produção arroz irrigado Rio Grande do Sul**. Disponível em: <https://irga.rs.gov.br/upload/arquivos/202106/10125554-custos-de-producao-2020-2021.pdf>. Acesso em 23 ago. 2021.

IRGA - INSTITUDO RIO GRANDENSE DO ARROZ. **Boletim de resultados da safra 2022/23 em terras baixas: arroz irrigado e, soja e milho em rotação**. Disponível em: <https://irga.rs.gov.br/boletim-de-resultados>. Acesso em 13 dez. 2023a.

IRGA - INSTITUDO RIO GRANDENSE DO ARROZ. **Médias climatológicas**. Disponível em: <https://irga.rs.gov.br/medias-climatologicas>. Acesso em 12 set. 2023b.

IRRI – INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE. **Annual report 2019: race for impact**. Manila: IRRI, 2019. Disponível em: <https://www.irri.org/resources-and-tools/publications#annual-reports>. Acesso em: 7 set. 2021

- ISLAM, M. D. *et al.* Development of remote sensing-based yield prediction models at the maturity stage of boro rice using parametric and nonparametric approaches. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, Amsterdam, v. 22, [art.] 100494, 2021.
- KANKE, Y. *et al.* Evaluation of red and red-edge reflectance-based vegetation indices for rice biomass and grain yield prediction models in paddy fields. **Precision Agriculture**, v. 17, p. 507-530, 2016.
- KNOBLAUCH, R. *et al.* Ammonia volatilization in waterlogged soils influenced by the form of ureia application. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 36, p. 813-821, 2012.
- LAMOTHE, A.G. *et al.* **Manejo del nitrógeno para aumentar produtividade em trigo**. Montevideo: INIA, p. 26, 1994.
- LI, B. *et al.* Above-ground biomass estimation and yield prediction in potato by using UAV-based RGB and hyperspectral imaging. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 162, p. 161-172, 2020.
- LIN, F. F. *et al.* Investigation of SPAD meter-based indices for estimating rice nitrogen status. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 71, p. S60-S65, 2010. Supl. 1
- LOFTON, J. *et al.* Predicting sugarcane response to nitrogen using a canopy reflectance-based response index value. **Agronomy Journal**, Madison, v. 104, n. 1, p. 106-113, 2012.
- LU, J. *et al.* Improving active canopy sensor-based in-season rice nitrogen status diagnosis and recommendation using multi-source data fusion with machine learning. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 380, pt. 1, [art.] 134926, 2022.
- LUAN, W. The effect of the crosstalk between photoperiod and temperature on the heading-date in rice. **PLoS One**, 2009.
- MARTIN, K. L. *et al.* By-plant prediction of corn grain yield using optical sensor readings and measured plant height. **Journal of Plant Nutrition**, Athens, v. 35, n. 9, p. 1429-1439, 2012.
- MARZARI, V. **Influência da população de plantas, doses de nitrogênio e controle de doenças na produção e qualidade de grãos e sementes de arroz irrigado**. 2005. 75 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.
- MOLIN, J. P. **Agricultura de precisão: o gerenciamento da variabilidade**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2001. 83 p.
- NAKANO, H. *et al.* Predicting rice grain yield using normalized difference vegetation index from UAV and GreenSeeker. **Crop and Environment**, London, v. 2, n. 2, p. 59-65, 2023.

NTECH INDUSTRIES. **Greenseeker manuals downloads**. [S. l.]: Ntech Industries, 2013. Disponível em: <https://agriculture.trimble.com/product/greenseeker-system/>. Acesso em: 19 out. 2021.

PADHAN, B. K. *et al.* Variation in nitrogen partitioning and reproductive stage nitrogen remobilization determines nitrogen grain production efficiency (NUE_g) in diverse rice genotypes under varying nitrogen supply. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 14, [art.] 1093581, 2023.

PENG, S.; TANG, Q.; ZOU, Y. Current status and challenges of rice production in China. **Plant Production Science**, Kyoto, v. 12, n. 1, p. 3-8, 2009.

POLETTI, N. **Disponibilidade de nitrogênio no solo e sua relação com o manejo da adubação nitrogenada**. 2004. 119f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

REHMAN, T. H. *et al.* Use of normalized difference vegetation index to assess n status and predict grain yield in rice. **Agronomy Journal**, v. 111, p. 2889-2898, 2019.

ROUSE, J. W. Jr. *et al.* Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *In*: EARTS RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 3., 1973, Washington, D. C. **The proceedings of a [...]**. Washington, D.C.: NASA, 1974. v. 1, paper A20, p. 309-317.

SANTOS, H.G. *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Brasília: Embrapa Solos, 2013. 353 p.

SATHIYA, K.; RAMESH, T. Effect of split application of nitrogen on growth and yield of aerobic rice. **Asian Journal of Experimental Sciences**, Madhya Pradesh, v. 23, n. 1, p. 303-306, 2009.

SCIVITTARO, W. B. *et al.* **Adubação nitrogenada e potássica para cultivares de arroz irrigado**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, dez. 2018. (Circular Técnica, n. 197).

SERRANO, L.; FILELLA, I.; PENUELAS, J. Remote sensing of biomass and yield of winter wheat under different nitrogen supplies. **Crop Science**, Madison, v. 40, p. 723-731, 2000.

SINGH, S. P.; PILLAI, K. G. **Response of scented rice varieties to nitrogen**. *Oryza*, Cuttack, v. 33, n.3, p. 193-195, 1996.

SINGH, B. *et al.* Site-specific fertilizer nitrogen management in irrigated transplanted rice (*Oryza sativa*) using an optical sensor. **Precision Agriculture**, Dordrecht, 16, p. 455–475, 2015

SMITH, H. L. *et al.* Don't ignore the green light: exploring diverse roles in plant processes. **Journal of Experimental Botany**, v. 68, n.9, p. 2099-2110, 2017.

- SOSBAI - SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Restinga Seca: SOSBAI, 2022. 199 p.
- STEINMETZ, S.; DEIBLER, N. D.; SILVA, J. P. Rice yield estimates based on global solar radiation and minimum air temperature. **Ciência Rural**, v.43, p.206-211, 2013.
- SWARBRECK, S. M. *et al.* A roadmap for lowering crop nitrogen requirement. **Trends in Plant Science**, Kidlington, v. 24, n. 10, p. 892–904, 2019.
- TAIZ, L. *et al.* **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.
- THENKABAIL, P.S. *et al.* Evaluation of narrowband and broadband vegetation indices for determining optimal hyperspectral wavebands for agricultural crop characterization. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, v. 68, p. 607-621, 2002
- TRENTIN, C. *et al.* Biomass production and wheat grain yield and its relationship with NDVI as a function of nitrogen availability. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 16, n. 4, e34, p. 1-7, 2021.
- TSCHIEDEL, M.; FERREIRA, M. Introdução à agricultura de precisão: conceitos e vantagens. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n. 1, p. 159-163, 2002.
- VARIANI, C. **Sensor óptico ativo como ferramenta para aplicação de nitrogênio na cultura do trigo**. 2011. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- VIAN, A. L. **Sensores de vegetação para estimativa in situ do potencial produtivo na cultura do milho**. 2015. 68 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- WANG, F. *et al.* Rice yield estimation using parcel-level relative spectral variables from UAV-based hyperspectral imagery. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 10, [art.] 453, 2019.
- YAO, Y. *et al.* In-season estimation of rice nitrogen status with an active crop canopy sensor. **Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, Piscataway, v. 7, p. 4403-4413, 2014.
- YINYAN, S. *et al.* Efficiency analysis and evaluation of centrifugal variable-rate fertilizer spreading based on real-time spectral information on rice. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 204, [art.] 107505, 2023.
- YOSEFTABAR, S. Effect nitrogen management on panicle structure and yield in rice (*Oryza sativa* L.). **International Journal of Agriculture and Crop Sciences**, London, v. 5, p. 1224-1227, 2013.

YOSHIDA, S.; PARAO, F.T. Climatic influence on yield and yield components of lowland rice in the tropics. In: INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE, 1976, Los Baños. **Climate and Rice**, proceedings... Los Baños: IRRI, 1976. p.471-494.

YOSHIDA, S. **Fundamentals of rice crop science**. Los Baños: IRRI, 1981. 269p.

XUE, L. *et al.* Topdressing nitrogen recommendation for early rice with an active sensor in South China. **Precision Agriculture**, v.15, p. 95–110, 2014.

ZHANG, K. *et al.* A new canopy chlorophyll index-based paddy rice critical nitrogen dilution curve in eastern China. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 266, [art.] 108139, 2021.

ZHOU, X. *et al.* Predicting grain yield in rice using multi-temporal vegetation indices from UAV-based multispectral and digital imagery. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdam, v. 130, p. 246-255, 2017.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As doses de nitrogênio aplicadas em cobertura foram eficientes em criar variabilidade na disponibilidade de N e no crescimento das plantas ao longo do ciclo da cultura. Maiores doses de N proporcionaram maiores acúmulos de biomassa seca e nitrogênio na parte aérea das plantas de arroz, assim como maiores produtividades.

As diferentes quantidades de biomassa e N acumulado identificadas ao longo do desenvolvimento da cultura modificaram a reflectância do dossel, que foi detectado através do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), pelo sensor óptico ativo GreenSeeker. Quanto maior foi o acúmulo de biomassa e nitrogênio, maiores foram os valores de NDVI, nos mais diferentes estádios avaliados.

O NDVI apresentou boas relações com a dose de nitrogênio aplicada, biomassa seca, nitrogênio acumulado no tecido vegetal e rendimento de grãos. No decorrer do ciclo da cultura, o melhor estádio para relacionar de forma precisa o rendimento de grãos com o NDVI é entre sete folhas completamente expandidas (V₇) até a iniciação da panícula (R₁) enquanto que, para biomassa seca e nitrogênio acumulado na parte aérea, as melhores respostas foram obtidas no estádio de oito folhas completamente expandidas (V₈).

A avaliação do NDVI utilizando o sensor óptico ativo foi um método preciso para identificar diferentes condições de desenvolvimento das plantas, ao longo do ciclo da cultura, proporcionadas pela variabilidade e disponibilidade do nitrogênio. Assim, através da abordagem proposta neste trabalho, o *status* nutricional das plantas pode ser identificado através das medições do NDVI.

A utilização desta tecnologia pode ser uma ferramenta eficiente, auxiliando na tomada de decisão no manejo do nitrogênio na cultura. A estimativa, em tempo real, do estado nutricional em relação ao N, através do NDVI, pode servir como base para a realização da adubação nitrogenada em taxa variável, variando a dose de acordo com as necessidades reais das plantas, considerando a variabilidade espacial existente dentro da área cultivada, permitindo um ajuste da dose em diferentes pontos da lavoura.