

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

Cleiton José Ramão

**SENSORES DE VEGETAÇÃO NA PREDIÇÃO DA NECESSIDADE NA
FERTILIZAÇÃO NITROGENADA EM COBERTURA COMPLEMENTAR NO
ARROZ IRRIGADO**

Santa Maria, RS
2022

Cleiton José Ramão

**Sensores de vegetação na predição da necessidade na fertilização nitrogenada em
cobertura complementar no arroz irrigado**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Santa Maria, como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Engenharia Agrícola.**

Orientador: Prof. Dr. Telmo Jorge Carneiro Amado
Coorientador: Prof. Dr. Leonardo Nabaes Romano

Santa Maria, RS
2022

Ramão, Cleiton José

Sensores de vegetação na predição da necessidade na fertilização nitrogenada em cobertura complementar no arroz irrigado / Cleiton José Ramão.- 2022.

71 p.; 30 cm

Orientador: Telmo Amado

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2022

1. Nitrogênio I. Amado, Telmo II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, CLEITON JOSÉ RAMÃO, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Tese) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Cleiton José Ramão

**SENSORES DE VEGETAÇÃO NA PREDIÇÃO DA NECESSIDADE NA
FERTILIZAÇÃO NITROGENADA EM COBERTURA COMPLEMENTAR NO
ARROZ IRRIGADO**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Santa Maria, como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Engenharia Agrícola.**

Aprovado em 03 de outubro de 2022:

Telmo Jorge Carneiro Amado, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Lúcio de Paula Amaral, Dr. (UFSM)

Luiz Felipe Diaz de Carvalho, Dr. (UFSM)

Paulo Regis Ferreira da Silva, Dr. (UFRGS)

Deise Dalazen Castagnara, Dr. (UNIPAMPA)

Santa Maria, RS
2022

AGRADECIMENTOS

À toda equipe da estação experimental do IRGA de Uruguaiana (Jackson Pintanel, Denis Marques, Michel Kaiser, Zeca, Luiz, Vilson...) pelo suporte na realização dos trabalhos de campo. Aos estagiários: Amanda Marques, Andressa Layter Oelke, Gustavo Rubim, Bianca Baialarde, Bruna Brandão e Érica Muller que contribuíram em diversos momentos a campo para a realização dessa pesquisa.

À equipe de laboratório de solos do IRGA de Cachoeirinha, laboratório de bromatologia da Unipampa Uruguaiana e laboratório de solos da UFSM. À professora Deise Costagnara pelo apoio em todos os momentos do projeto e amizade.

Aos professores Paulo Regis, Lúcio do Amaral e Luiz Felipi por todas colaborações e orientações no trabalho realizado, meu profundo agradecimento.

Ao IRGA, presidência, diretoria e gerência de pesquisa pelo apoio e voto de confiança durante a jornada percorrida. As colegas e amigas: Flávia Tomita, Danielle Almeida, Jossana Cera, Neiva Knaak, Débora Favero e Gabriela de Magalhães, pelo apoio das mais diversas formas. Aos funcionários da Granja Águas Claras e Tuiti, de propriedade do senhor Werner Arns e filhos. Ao Fernando Arns pelo apoio e disponibilidade na instalação das áreas experimentais a campo e a incansável parceria da ArnsTronic (Antonio Arns e Cesar Pires) nos levantamentos de dados e processamento de imagens durante duas safras.

Ao Professor Telmo Amado, como orientador, professor e companheiro durante o período de estudo e projeto, pela sua disponibilidade de ter um orientando com total liberdade de adequação do projeto à realidade do trabalho sobre arroz irrigado.

Meu muito obrigado aos meus pais e família, pelo apoio desde sempre nos estudos, durante as diversas fases da minha vida.

RESUMO

SENSORES DE VEGETAÇÃO NA PREDIÇÃO DA NECESSIDADE NA FERTILIZAÇÃO NITROGENADA EM COBERTURA COMPLEMENTAR NO ARROZ IRRIGADO

AUTOR: Cleiton José Ramão

ORIENTADOR: Telmo Jorge Carneiro Amado

Dentre os fatores que determinam a produtividade da cultura do arroz irrigado destaca-se a adubação nitrogenada na quantidade demandada pela planta em diferentes estádios fenológicos. Dessa forma, avaliar o estado nutricional durante diferentes estádios fenológicos da cultura, através de sensores, representa uma abordagem capaz de incrementar a eficiência das fertilizações. O objetivo deste estudo foi avaliar o uso de sensoriamento remoto visando prescrição da fertilização nitrogenada em arroz irrigado e a eficiência do uso do NDVI, medido por dois sensores ópticos de vegetação. As avaliações foram realizadas durante dois anos agrícolas, em estágio R_1 , conforme escala de Counce et al. (2000) da cultura selecionada como principal fase fenológica de monitoramento. A semeadura do arroz irrigado foi realizada em área de produção comercial e ao alcançar o estágio fenológico V_2/V_3 , foram aplicadas as doses de 0, 69, 138 e 207 kg ha⁻¹ de N, em um delineamento de blocos ao caso, com oito repetições para cada tratamento. O índice de vegetação utilizado para monitorar indiretamente o estado nutricional do arroz foi o NDVI para ambas as plataformas de coleta, ARP (aeronave remotamente pilotada) e Proximal, com sensor Mapir Survey 3 e GreenSeeker, respectivamente. O estado nutricional do arroz foi avaliado diretamente pela produtividade de massa seca, teor de N parte aérea e N absorvido determinado por digestão micro-Kjedahl em estágio R_1 . A estabilidade produtiva e resposta gradual positiva a adubação nitrogenada, tanto na adubação em pré-irrigação como na adubação combinada de pré-irrigação + cobertura de 37 kg ha⁻¹ de N em estágio R_1 , demonstrou a viabilidade de usar em área de lavoura comercial a estratégia de “Faixa Rica de N” para maximizar o uso do insumo. As doses de nitrogênio influenciaram a produtividade de massa seca do arroz e o teor de N. Sendo que as maiores produtividades de grãos foram obtidas com o teor de N de 2,3% da massa seca no estágio R_1 . Ambas as plataformas de monitoramento, apresentaram eficiência em detectar as doses de N através do uso do índice NDVI em arroz irrigado, porém esta eficiência variou entre sensores e ano agrícola, onde o sensor de vegetação embarcado em ARP obteve melhor desempenho.

Palavras-chave: *Oryza sativa L.*, Nitrogênio, Agricultura de Precisão, Produtividade

ABSTRACT

VEGETATION SENSORS IN THE PREDICTION OF NEEDS IN NITROGEN FERTILIZATION IN COMPLEMENTARY COVERAGE IN IRRIGATED RICE

AUTHOR: Cleiton José Ramão
ADVISOR: Telmo Jorge Carneiro Amado

Among the factors that determine the productivity of irrigated rice, nitrogen fertilization stands out in the amount demanded by the plant at different phenological stages. Thus, evaluating the nutritional status during different phenological stages of the crop, through sensors, represents an approach capable of increasing the efficiency of fertilization. The objective of this study was to evaluate the use of remote sensing to prescribe nitrogen fertilization in irrigated rice and the efficiency of the use of NDVI, measured by two optical vegetation sensors. The evaluations were carried out during two agricultural years, in stage R1, according to the scale of Counce et al. (2000) of the selected crop as the main phenological monitoring phase. Sowing of irrigated rice was carried out in a commercial production area and when reaching the phenological stage V2/V3, doses of 0, 69, 138 and 207 kg ha⁻¹ of N were applied, in a case-by-case block design, with eight replicates for each treatment. The vegetation index used to indirectly monitor the nutritional status of rice was the NDVI for both collection platforms, ARP (remotely piloted aircraft) and Proximal, with Mapir Survey 3 and GreenSeeker sensors, respectively. Rice nutritional status was directly evaluated by dry mass yield, shoot N content and absorbed N determined by micro-Kjedahl digestion at R1 stage. The productive stability and gradual positive response to nitrogen fertilization, both in pre-irrigation fertilization and in the combined pre-irrigation fertilization + coverage of 37 kg ha⁻¹ of N in the R1 stage, demonstrated the feasibility of using it in a commercial crop area. the “Rich Strip of N” strategy to maximize the use of the input. Nitrogen doses influenced rice dry mass yield and N content. The highest grain yields were obtained with N content of 2.3% of dry mass in the R1 stage. Both monitoring platforms showed efficiency in detecting N doses through the use of the NDVI index in irrigated rice, but this efficiency varied between sensors and agricultural year, where the vegetation sensor embedded in ARP obtained better performance.

Keywords: *Oryza sativa L.*, Nitrogen, Precision Agriculture, Productivity

LISTA DE FIGURAS

MATERIAL E MÉTODOS GERAL

Figura 1: Representação esquemática do desenho experimental e da localização do experimento no município de Uruguaiana e Barra do Quaraí-RS.....24

Figura 2: Precipitação diária (mm), de (A) 1º de setembro de 2018 a 30 de abril de 2019 e (B) 1º de setembro de 2019 a 30 de abril de 2020, para o município de Uruguaiana. Fonte de dados: INMET..26

Figura 3: Radiação solar decendial ocorrida na safra 2018/2019 (linha laranja) e a Normal climatológica (linha cinza) para os meses de setembro à abril, para o município de Uruguaiana. Fonte de dados: INMET.27

Figura 4: Croqui dos tratamentos instalados em área de lavoura comercial no município de Uruguaiana e Barra do Quaraí, safra 2018/19 e 2019/20..28

Figura 5: Representação esquemática do sensoriamento proximal com GreenSeeker realizado manualmente (A) e com sensor acoplado ao VANT LumiX2®, equipada com câmera (MAPIR 3 (B))..... 30

ARTIGO I

Figura 1: Precipitação diária (mm), de (A) 01 de setembro de 2018 a 30 de abril de 2019 e (B) 01 de setembro de 2019 a 30 de abril de 2020, na estação meteorológica de Uruguaiana-RS. Fonte de dados: INMET.38

Figura 2: Radiação solar decendial ocorrida nas safras 2018/2019 (linha laranja) e a 2019/20 (linha amarela) e a Normal Climatológica (linha cinza) para os meses de setembro a abril, na estação meteorológica de Uruguaiana-RS. Fonte de dados: INMET..... 39

Figura 3: Produtividade de massa seca da parte aérea (a) e teor de N no tecido da planta de arroz no estádio R1 (b) em função de dose de nitrogênio aplicado em cobertura no estádio V2/V3, um dia antes da entrada da água de irrigação, nas safras 2018/19 (Uruguaiana) e 2019/20 (Barra do Quaraí).....43

Figura 4: Quantidade de nitrogênio (N) acumulado na parte aérea das plantas de arroz no estado R1 em função de dose de N aplicado em cobertura no estádio V2/V3, um dia antes da entrada da água de irrigação, nas safras 2018/19 (Uruguaiana) e 2019/20 (Barra do Quaraí).....44

Figura 5: Resposta do NDVI sob duas plataformas de coleta, em função de doses de N aplicados em cobertura, nas safras 2018/19 (Uruguaiana) e 2019/20 (Barra do Quaraí)..... 45

Figura 6: Valores de NDVI obtidos pelas plataformas GreenSeeker e Mapir em arroz irrigado (Cv. IRGA 424 RI) no estádio R1, e sua relação com a produtividade de grãos nas safras 2018/19 (Uruguaiana) e 2019/20 (Barra do Quaraí). 46

ARTIGO II

Figura 1: Representação esquemática do desenho experimental e da localização do experimento nos municípios de Uruguaiana e Barra do Quaraí-RS..... 54

Figura 2: Precipitação diária (mm), de (A) 01 de setembro de 2018 a 30 de abril de 2019 e (B) 01 de setembro de 2019 a 30 de abril de 2020, para o município de Uruguaiana-RS. Fonte de dados: INMET. 56

Figura 3: Radiação solar decendial ocorrida nas safras 2018/19 (linha laranja) e 2019/20 (linha amarela) e a Normal Climatológica (linha cinza) para os meses de setembro a abril, para o município de Uruguaiana-RS. Fonte de dados: INMET. 57

Figura 4: Produtividade de grãos de arroz irrigado, CV. IRGA 424 RI, em função de doses de nitrogênio em cobertura aplicadas um dia antes da entrada da água na lavoura, e com e sem a aplicação de 37 kg ha⁻¹ de N no estádio R1 na safra 2018/19. 62

Figura 5: Produtividade de grãos de arroz irrigado, CV. IRGA 424 RI, em função de doses de nitrogênio em cobertura aplicadas um dia antes da entrada da água na lavoura, e com e sem a aplicação de 37 kg ha⁻¹ de N no estádio R1 na safra 2019/20. **Erro! Indicador não definido.** 63

LISTA DE TABELAS

MATERIAL E MÉTODOS GERAL

Tabela 1: Atributos químicos do solo antes da instalação dos experimentos, nos municípios de Uruguaiana Barra do Quaraí nas safras 2018/19 e 2019/20 .. **Erro! Indicador não definido.**25

ARTIGO I

Tabela 1: Atributos químicos do solo antes da instalação dos experimentos, nos municípios de Uruguaiana (2018/19) e Barra do Quaraí –RS, (2019/20)..... **Erro! Indicador não definido.**36

Tabela 2: Produtividade de grãos, índice de suficiência de nitrogênio (N), NDVI e quantidade de N absorvido pelas plantas de arroz nas safras 2018/19 (Uruguaiana) e 2019/20 (Barra do Quaraí)..... 46

ARTIGO II

Tabela 1: Atributos químicos do solo antes da instalação dos experimentos, nos municípios de Uruguaiana e Barra do Quaraí. **Erro! Indicador não definido.**55

Tabela 2: Componentes do rendimento (número de panículas, número de grãos por panícula, peso de mil grãos), porcentagem de grãos inteiros e estatura de planta de arroz irrigado, Cv. IRGA 424 RI, em função da adubação nitrogenada em cobertura, aplicada um dia antes da entrada da água em Uruguaiana e Barra do Quaraí em duas safras.**Erro! Indicador não definido.**60

Tabela 3: Correlação da produtividade com números de panícula por metro quadrado e de grãos por panícula, peso de mil grãos, porcentagem de grão inteiro e esterilidade de grão em Uruguaiana (2018/19) e em Barra do Quaraí (2019/20)..... 61

LISTA DE ABREVIACÕES

Al ⁺³	– Alumínio
AP	– Agricultura de Precisão
Ca ⁺²	– Cálcio
CTC	– Capacidade de Troca de Cátions
GPS	– Sistema de posicionamento global
INN	– Índice de Nutrição Nitrogenada
INMET	– Instituto Nacional de Meteorologia
K ⁺	– Potássio
Mg ⁺²	– Magnésio
MO	– Matéria Orgânica
MET	– Máxima Eficiência Técnica.
N	– Nitrogênio
NDVI	– Índice de Vegetação por diferença Normalizada
NO ⁻³	– Nitrato
N ₂ O	– Óxido Nitroso
P	– Fósforo
RPAS	– Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada
RS	– Rio Grande do Sul
Sat. Al ⁺³	– Saturação por Alumínio
SAT. BASES	– Saturação por Bases

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3. HIPÓTESES	22
4. OBJETIVOS	23
4.1 OBJETIVO GERAL	23
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
5. MATERIAL E MÉTODOS GERAL	24
6. ARTIGO I - COMPORTAMENTO DO NDVI EM ARROZ IRRIGADO ATRAVÉS DE DUAS PLATAFORMAS DE COLETA - ARP E SENSOR PROXIMAL	33
6.1. Introdução	34
6.2. Material e Métodos	36
6.3. Resultados e discussão	42
6.4. Conclusão	47
6.5. Referências Bibliográficas	48
7. ARTIGO II - COMPORTAMENTO PRODUTIVO DE ARROZ IRRIGADO SOB DOSES DE NITROGÊNIO EM SISTEMA DE FAIXA RICA	51
7.1. Introdução	51
7.2. Material e Métodos	54
7.3. Resultados e discussão	59
7.4. Conclusão	64
7.5. Referências Bibliográficas	65
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS GERAL	68

1.INTRODUÇÃO GERAL

Com o crescimento da população mundial, a demanda por alimentos, que são a fonte primária de nutrientes, deve aumentar de 40% a 50% nos próximos 50 anos (FAO, 2018). Dentre esses alimentos, destaca-se o arroz, um dos cereais mais consumidos no mundo, cujo valor nutricional o caracteriza como importante fonte calórica, fato que popularizou seu consumo. Por se tratar de um alimento básico para bilhões de pessoas (WANG et al., 2020) e devido à versatilidade de cultivos, o arroz é uma cultura estratégica quanto à segurança alimentar em nível econômico e social, principalmente nos países em desenvolvimento.

Cultivado em todos os continentes, o arroz destaca-se pelo volume total de produção e área de cultivo (SCIVITTARO; GOMES, 2007). A produção global de arroz estimada para a safra 2022/23 é de 512,4 milhões de toneladas (base beneficiada), com redução de 1,2 milhões de toneladas em relação à anterior (USDA, 2022). Com uma produção em torno de 12 milhões de toneladas de grãos anual, o Brasil posiciona-se entre os dez maiores produtores mundiais (USDA, 2022). No Sul do país quase a totalidade das áreas de produção é cultivada no sistema irrigado, com aporte de nutrientes ajustado para elevadas produtividades.

Na América do Sul, os principais países produtores são, em ordem decrescente: Brasil, Uruguai, Argentina e Paraguai. A produção brasileira na safra 2020/21 foi de 11,63 milhões de toneladas, cultivadas em uma área de 1,684 milhões de ha, com uma produtividade média de 6,9 toneladas por hectare (CONAB, 2021). Nas regiões Centro-Oeste e Norte do Brasil predomina o cultivo do arroz em sequeiro, contrastando com o Sul do Brasil, em que o cultivo irrigado representa a totalidade da área plantada.

O estado do Rio Grande do Sul, especialmente na sua metade Sul, tem na cultura do arroz uma das principais fontes de renda, sendo responsável por importante parcela do PIB dos municípios dessa região. Na safra 2020/21, foram colhidas 8.52 milhões de toneladas, a quarta maior produção da sua história do RS, sendo que a região da Fronteira Oeste apresentou a maior produtividade, com 9.705 kg ha⁻¹ (IRGA, 2021).

Entre os fatores que determinam a produtividade da cultura do arroz, destacam-se a época de semeadura, o uso de cultivares tipo modernas, a adubação nitrogenada e dentre outros nutrientes na quantidade demandada, associada à irrigação com lâmina uniforme. A semeadura realizada no início da época recomendada (início de outubro) proporciona a maior produtividade de grãos (18%) e maior eficiência no uso de água em relação à semeadura mais tardia, devido a cultura se desenvolver em condições meteorológicas mais favoráveis,

especialmente quanto aos fatores temperatura, radiação solar e precipitação pluvial (SARTORI et al., 2013).

A aplicação do macronutriente nitrogênio (N), geralmente, é o que proporciona maior incremento em produtividade. O uso de baixas doses de N, associadas à baixa densidade de plantas, reduziu o número de panículas por área em 17%, o índice de área foliar em 26%, a biomassa em 16 % e, conseqüentemente, a produtividade (12%) quando comparado com alta densidade de plantas e baixa doses de N (HUANG et al., 2018). Em contrapartida, o uso de doses menores pode reduzir a perda de N nos sistemas, contribuindo para diminuir o impacto ambiental da fertilização (LIU et al., 2016). Ainda, por sofrer efeitos do clima, solo e da irrigação, todos esses parâmetros devem ser considerados para determinar a dose de N ótima ajustada ao local específico e em cada área de cultivo.

O ajuste da fertilização nitrogenada de acordo com a demanda da cultura do arroz, que, por sua vez, está associada ao potencial produtivo, é importante do ponto de vista econômico, ambiental e de sustentabilidade. As aplicações de N em excesso podem resultar em poluição ambiental, como a contaminação do lençol freático por nitrato (NO_3^-), a acidificação do solo e aumento da taxa de desnitrificação, resultando em maior emissão de óxido nitroso (N_2O) para a atmosfera (SHRESTHA; LADHA, 1996; NUTINI et al., 2018).

A minimização destes impactos indesejáveis e, por outro lado, das limitações a produtividade a longo prazo incentivam produtores e, especialmente pesquisadores, a adotarem novas abordagens de fertilização de N específicas e localizadas (BERGER et al., 2020), requerendo monitoramento oportuno e preciso do estado nutricional das culturas (FU et al., 2020). Dentre estas abordagens, diversos aspectos podem ser monitorados, contemplando o arranjo de plantas, o tipo do fertilizante, momento da aplicação e as estratégias de monitoramento da condição nutricional das plantas.

Dessa forma, as novas ferramentas da agricultura de precisão/digital têm uso crescente para avaliar o estado de nutrição nitrogenada durante diferentes fases da cultura, como o sensoriamento remoto por satélites ou aeronaves remotamente pilotadas (ARP), representando uma abordagem capaz de incrementar a eficiência de uso da fertilização nitrogenada (GUAN et al., 2016). As perdas de N são influenciadas pelas condições meteorológicas e o manejo durante o ciclo da cultura, onde as perdas por lixiviação e a volatilização de N podem superar os 20% da dose aplicada na cultura do arroz (SCIVITTARO et al., 2010), podendo atingir perdas tão elevadas quanto 60% (CANTARELLA, 2007). A nível mundial, a eficiência do uso de N no arroz de várzea é inferior a 50%, onde o uso da dose requerida e correto momento de

aplicação, aliada ao cultivo de genótipos eficientes, mostraram uma melhoria na recuperação de N aplicado pelo arroz (FAGERIA; BALIGAR, 2003).

O gerenciamento de precisão da fertilização nitrogenada é possível com avanços na tecnologia agrícola, com a disponibilização de vários sensores proximais e aéreos (WANG et al., 2019). A utilização de tecnologias digitais, que permitam ao produtor obter informações do estado nutricional da lavoura em tempo real ou com uma defasagem de intervalo de dias, oferece uma importante ferramenta para aumentar a eficiência da fertilização nitrogenada. Para tanto, deve-se estabelecer prioridades de talhões, contribuindo, dessa forma, para a conservação do ambiente e para obtenção de maior da qualidade dos produtos, resultando em aumento da competitividade do agronegócio.

Assim, os objetivos deste trabalho foram avaliar o uso de sensoriamento remoto visando a prescrição da fertilização nitrogenada em cobertura no estágio R1 em arroz irrigado. Ainda, avaliar a eficiência do uso do NDVI, medido por dois sensores ópticos de vegetação, como ferramenta para estimativa da biomassa e quantidade de N acumulado na parte aérea de uma cultivar de arroz irrigado submetida a diferentes doses de N em cobertura, e seus efeitos na produtividade de grãos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A necessidade de aumento de produtividade das culturas, visando suprir a demanda alimentar da população mundial, têm acarretado aumento no uso de insumos com crescentes custos de produção e riscos de impactos ambientais. Estratégias e tecnologias de produção que contribuam para uma agricultura sustentável, especialmente na cultura do arroz são altamente demandadas. Destas, as que contribuem para o armazenamento de carbono no solo e o aumento da fertilidade do solo são fundamentais para aumento de produtividade e ao mesmo tempo reduzir o impacto ambiental (NAHER et al., 2019).

Fertilizantes químicos são geralmente essenciais para obter elevadas produtividades (FAO, 2018), pois, são utilizados no suprimento de nutrientes do solo sob cultivo intensivo de cultivares modernas de arroz (SARKAR et al., 2016). Estas respondem a doses mais elevadas de fertilizantes uma vez que possuem maior potencial produtivo que as antigas de porte alto. Assim, cresce o interesse por novas estratégias tecnológicas (NAHER et al., 2019) que proporcionem explorar o potencial produtivo das cultivares modernas de arroz sem comprometer o ambiente. Entre as estratégias para alcançar elevadas produtividades com controle do impacto ambiental destaca-se a economia de água (MEHMOOD et al., 2019), materiais genéticos mais tolerantes a estresse abióticos e bióticos (GUPTA et al., 2018), sensoriamento remoto (HUANG et al., 2018) e fertilização precisa de modo a proporcionar condições ideais de nutrição das plantas (WANG et al., 2020).

A cultura do arroz é altamente dependente da aplicação de nitrogênio (N), sendo esse nutriente o que mais frequentemente limita a produtividade. A pressão resultante sobre muitos atores da cadeia produtiva do arroz gerou a necessidade de ferramentas e técnicas operacionais capazes de aumentar a eficiência do uso de N (NUTINI et al., 2018). Destas, o conhecimento do índice de suficiência da cultura permite uma melhor adequação da adubação durante o ciclo da cultura, sendo um fator determinante para explorar o potencial produtivo das cultivares modernas (SABERION et al., 2014).

O índice de nutrição nitrogenada (INN) é obtido pela razão entre a concentração atual de nitrogênio na planta (%) e a concentração crítica de N (%). O primeiro parâmetro é o teor de N na planta e o segundo, é a concentração mínima abaixo da qual o crescimento das culturas é reduzido (LEMAIRE et al., 2008).

A concentração de nitrogênio foliar, o acúmulo de nitrogênio na folha e o acúmulo de nitrogênio na massa seca acima do solo têm sido usados como parâmetros para recomendações

de fertilização (WANG et al., 2013). Na cultura do arroz existem mudanças significativas na concentração de nitrogênio foliar ao longo do ciclo da cultura que dificultam a determinação dos índices de suficiência na cultura (WANG et al., 2013). A cor das folhas está correlacionada com o teor de nitrogênio, e a detecção do teor de nitrogênio nas mesmas é importante para orientar os agricultores na aplicação eficiente de fertilizantes (TAO et al., 2020).

A concentração de nitrogênio foliar obtida pela reflectância das folhas de uma planta, que pode ser obtida com o uso de sensores portáteis de clorofila e por sensores espectrais (WANG et al., 2013). Uma estrutura para sensoriamento remoto multiespectral do nitrogênio em culturas de cereais é fundamental para auxiliar no monitoramento da evolução do estado nutricional das lavouras (BERGER et al., 2020; FU et al., 2020). Como os sensores de imagem multiespectral podem fornecer medições detalhadas das assinaturas espectrais que se relacionam com constituintes da planta como o teor de clorofila e o estado nutricional de nitrogênio, eles têm uma vantagem prática sobre a detecção multiespectral para a detecção da análise laboratorial de N da cultura (BERGER et al., 2020).

Nesse contexto, a utilização de tecnologias que permitam a determinação de um índice de suficiência de nitrogênio, através de equipamento portátil e não destrutivo, como a utilização de sensores de vegetação, torna-se viável para determinar a condição nutricional do arroz em tempo real. O índice nutricional de N deve ser calculado com base em experimentos a campo, validados em diferentes cultivares de arroz e em distintos anos agrícolas (WANG et al., 2020).

A agricultura de precisão é cada vez mais considerada como uma solução eficiente para mitigar o impacto ambiental dos sistemas agrícolas (BACENETTI et al., 2020), devido a sua capacidade de otimizar o rendimento das culturas e facilitar o monitoramento durante a safra.

Entre as práticas agronômicas para as quais os conceitos de agricultura de precisão foram aplicados em contextos operacionais e de pesquisa, a fertilização com nitrogênio a taxa variável tem um papel relevante (BACENETTI et al., 2020). Ao se especializar a necessidade de N da lavoura e de se determinar a necessidade de adubação nitrogenada tem se a base para aplicar a taxa variável com eficiência (WANG et al., 2019), tais avanços dotarão a fertilização com características assertivas e sustentáveis.

Os maiores benefícios ambientais oriundos de um ajuste acurado entre a demanda da cultura para alcançar um rendimento de grãos alvo e a quantidade de N pode representar ganhos em termos de evitar custos energéticos desnecessários para a produção de fertilizantes e de emissão de gases de efeito estufa. Embora ainda carecendo de validações adicionais, os resultados preliminares são promissores quanto aos benefícios ambientais que podem ser

alcançados quando as tecnologias digitais são usadas eficientemente para embasar a fertilização nitrogenada (BACENETTI et al., 2020).

Imagens obtidas através do sensoriamento remoto são uma tecnologia relativamente barata, rápida e abrangente para avaliar rendimento de culturas e o estado de suficiência de N (WANG et al., 2019). Devido à sua capacidade de fornecer características de mudança da reflectância da vegetação com resolução espacial e temporal, destacam-se com uma previsão de estimativa em escala de talhão ou mesmo regional (WANG, 2020).

De várias plataformas podem ser obtidos índices de vegetação que se relacionam com os teores de N em plantas de arroz, tais como o uso de imagens de satélite com geração do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI - Normalized Difference Vegetation Index), o qual teve seu uso ampliado nos últimos anos. Sua aplicação de forma rápida e precisa permitir tomadas de decisão precoces, com correções de deficiências nutricionais em estádios iniciais antes que a produtividade seja comprometida e com ajuste de adubações complementares ao desenrolar do ciclo da cultura.

O NDVI utiliza dados de reflectância dos comprimentos de onda das bandas do vermelho e infravermelho próximo; os valores desses dados vão de uma escala de -1 a 1 (ROUSE et al., 1973). Quanto maiores os valores do NDVI, maiores as diferenças entre a reflectância do infravermelho com o vermelho, o que indica maior quantidade de clorofila e massa seca e, conseqüentemente, maior o potencial produtivo da planta (RISSINI et al., 2015).

O uso de sensores de vegetação é amplamente utilizado em diversas culturas, principalmente nas mais responsivas a fertilização nitrogenada. Na cultura do milho, as leituras realizadas em estágio V7 e valores do NDVI, tiveram maior correlação com o potencial produtivo (VIAN et al., 2014). Bagheri et al. (2013) obtiveram maior correlação entre o NDVI e o conteúdo de N na planta de milho no estágio V13, enquanto no trabalho de Amado et al. (2017) obtiveram relação linear entre dose de fertilizante nitrogenado e o índice NDVI, tanto no estágio V8, como em V12.

O monitoramento da necessidade de fertilização nitrogenada em cobertura pode ser baseado em sensores acoplados ao trator em operação (por exemplo, N-Sensor Yara, GreenSeeker, Trimble, CA, EUA; RAUN et al., 2005), em sensoriamento remoto (SCHWALBERT et al., 2019) ou em instrumentos portáteis de diagnóstico (ROGOVSKA et al., 2019).

O sensor ótico ativo Greenseeker® possui luz que emite radiação que irradia o dossel da planta e medem uma porção da radiação refletida do dossel sem depender da luz solar ambiente, como o necessário em sensores passivos. Eles são, portanto, independentes das

condições ambientais de luz, eliminando a necessidade de calibrações frequentes (CAO et al., 2014).

Através de experimentos com diferentes doses de nitrogênio em vários híbridos de arroz, foi possível comprovar que o uso de sensores pode ser uma ferramenta para prever os teores de nitrogênio na planta, principalmente do estágio de alongamento do colmo até o estágio de floração (YUAN et al., 2016; POCOJESKI et al., 2012).

Para prescrição da fertilização nitrogenada com base em sensores, usualmente são criadas faixas na lavoura a qual é fertilizada com elevada dose de N, gerando uma área referência sem deficiência de N durante o ciclo da cultura. O sensoriamento é realizado na área de referência e nas demais áreas de interesse na lavoura, onde o índice médio da lavoura a ser adubada é dividido pelo índice médio da área referência, de modo que um resultado $< 0,95$ indica a necessidade de fertilização. Esta técnica é capaz de aumentar a eficiência no uso de N em culturas diversas, tais como feijão (MAIA et al., 2017), milho (SILVA et al., 2011) e arroz (YAN et al., 2014).

Outra tecnologia para identificar o teor nutricional da planta é a utilização de sensores proximais ou de contato direto com o alvo tais com o de pinçar (clorofilômetro CFL 1030). Estes sensores são práticos e portáteis, realizam leitura folha a folha, porém demandam várias leituras na área da lavoura. Nesse contexto, sensores óticos proximais ou sensores de dossel da vegetação passam a ser mais interessantes, fornecendo resultados rápidos de uma maior quantidade de plantas. Esses sensores se baseiam na refletância do alvo, ou seja, interação de planta, solo e superfícies alvo.

A interação da radiação solar com o dossel das plantas podem ser refletidas, absorvidas ou transmitidas. Neste contexto, os sensores podem ser ativos ou passivos de acordo com a fonte de radiação natural ou artificial, sendo a função de capturar e classificar a resposta espectral da planta, onde as plantas saudáveis e bem nutridas absorvem mais a luz visível do que as plantas sob estresse nutricional, estas últimas tem maior reflectância da luz visível e menor da luz de infravermelho próximo (MORAES, 2002).

Há inúmeras possibilidades de avaliação do vigor de plantas através de imagens digitais, nesse sentido, a aquisição de dados sobre o dossel das plantas varia com a câmera utilizada e com a técnica de análise da imagem digital (BARBOSA et al., 2016). De modo geral, as câmeras RGB que captam o visível são mais acessíveis do ponto de vista econômico, que as câmeras térmicas, multiespectrais e hiperespectrais.

A aquisição de câmeras equipadas com uma tecnologia de última geração (multiespectral e térmica) possui valor de aquisição elevado, o que limita seu uso em larga

escala. Dessa forma, câmeras digitais convencionais podem ser usadas para determinar o conteúdo de clorofila e, conseqüentemente, para monitorar o estado nutricional da planta de arroz em crescimento, oferecendo assim uma ferramenta potencialmente barata, rápida, precisa e adequada para os produtores de arroz (SABERION et al., 2014).

Há um interesse crescente pelo uso de imagens digitais na cultura do arroz, fato que tem impulsionado o desenvolvimento de programas computacionais específicos para análise de plantas, pois, além do estado nutricional, as imagens podem inferir sobre a disponibilidade de água para as plantas, tanto o excesso quanto a falta de água.

O monitoramento do desenvolvimento fenológico das culturas em condição de campo, permitem estimar as variações sazonais do estado nutricional da cultura durante a safra. Devido a facilidade de utilizar câmeras acopladas, em Aeronaves Remotamente Pilotadas, sendo utilizados nas plantações, os quais podem sobrevoar áreas de interesse específico.

Atualmente várias iniciativas buscam imagens de sensores orbitais capazes de oferecer um produto confiável e em tempo real, com objetivo estimar a produtividade e verificar as mudanças espaço-temporal da vegetação (SETIYONO, 2018; LIU et al., 2017). Sabe-se da dificuldade de obter imagens livres de interferência por nuvens e em estágios específicos da cultura. Os RPAS estão se destacando no uso agrícola, principalmente pela rapidez e possibilidade de transportarem câmeras acopladas, visando a obtenção de informações em tempo real da cultura (COLOMINA; MOLINA, 2014). Estudo realizado na Malásia com uma aeronave equipada com câmera digital convencional de baixo custo pode ser usada para determinar o conteúdo de clorofila e, conseqüentemente, monitorar o conteúdo de N da planta de arroz em crescimento, oferecendo uma ferramenta potencialmente barata, rápida, precisa e adequada para os produtores de arroz (SABERION, 2014).

O comportamento espectro-temporal do uso da terra (água, arroz, banhado, campo, mata, solo exposto, dentre outros) a partir de dois índices (NDVI, NDWI) permite a definição de padrões de comportamento temporal. Onde, a vegetação natural representada por campos, florestas e banhados, a curva de crescimento é condicionada a temperatura média e disponibilidade hídrica local. Já, as culturas anuais apresentam maior amplitude dos índices citado acima (BASTOS, 2014). Com índices de vegetação caracterizados previamente, pode-se obter o mapeamento das áreas com plantio de arroz de várias safras (KLERING et al., 2016; BOSCHETTI et al., 2017). Estudo realizado com multi-sensores para monitorar as condições do arroz em tempo real, incluindo medições de refletância, cobertura vegetal e temperatura de dossel, identificou que os melhores índices espectrais para o índice de área foliar foram os

comprimentos de onda de 860 nm e 750 nm com coeficiente de correlação de $r^2=0,74$ (PEI et al., 2014).

Wang et al. (2013) utilizando uma câmera para captar informações de bandas visíveis (comprimento de ondas utilizados verde e vermelho) do dossel de três cultivares de arroz, com diferentes doses de nitrogênio, obtiveram relações exponenciais significativas com a biomassa, índice de área foliar e nitrogênio da planta, com coeficiente de correlação acima de 0,90.

O acompanhamento do estado nutricional de nitrogênio durante o crescimento vegetativo, cobertura do dossel, são indicadores essenciais do vigor da cultura e preditor do rendimento de grãos. A correlação entre o NDVI e o teor de N na massa seca permite a partir do NDVI estimar a absorção de N do solo e a absorção deste pelas plantas, com a espacialização e sua representação por mapas, que servem de base para adubações nitrogenadas em taxa variável visando permitir que todas as plantas da lavoura atinjam o índice de suficiência e a máxima produtividade (BACENETTI et al., 2020).

3. HIPÓTESES

A avaliação do índice NDVI no estágio fenológico R1 apresenta relação com a quantidade de N absorvido pela planta de arroz irrigado.

A utilização de “faixa rica” na cultura do arroz em comparação com as plantas de arroz na lavoura em sítios próximos é uma eficiente ferramenta para a tomada de decisão sobre a necessidade de fertilização nitrogenada com elevada resolução espacial.

Com base no índice NDVI em estágio fenológico R1, no qual se realiza a fertilização nitrogenada na cultura do arroz e na relação entre o índice NDVI de sítios adjacentes e o índice da faixa rica levando em consideração a variabilidade espacial ao longo do talhão, é possível com um algoritmo definir a dose de fertilização a taxa variável.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar se o índice NDVI pode ser utilizado no aprimoramento da fertilização nitrogenada na cultura do arroz irrigado a exemplo do que ocorre em outras culturas como o milho.

Validar o uso da metodologia de adubação nitrogenada com base na “faixa rica” em arroz irrigado, visando tomada de decisão da necessidade e dose de nitrogênio em cobertura no estágio fenológico R1.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o efeito de doses de fertilização nitrogenada em cobertura na produtividade da cultivar IRGA 424 RI de arroz irrigado.

- Avaliar a eficiência do índice NDVI, medido por sensor óptico de vegetação, na estimativa da biomassa da parte aérea e na quantidade de N acumulado em uma cultivar de arroz (IRGA 424 RI) com diferente estado nutricional em resposta a diferentes doses de fertilização nitrogenada.

- Avaliar a relação do índice de NDVI em estágio reprodutivo R1, obtido por sensor ativo e passivo com a produtividade de grãos.

- Determinar um índice de suficiência de N em R1, com a finalidade de determinar a necessidade de fazer uma segunda aplicação de N em cobertura a taxa variável.

5. MATERIAL E MÉTODOS GERAL

O estudo foi conduzido durante duas safras agrícolas (2018/19 e 2019/20, em duas áreas comerciais de arroz localizadas nos municípios de Uruguaiiana e Barra do Quaraí - RS (Figura 01). As áreas experimentais foram selecionadas por possuírem características de solo, relevo e clima que representam a região arroseira do estado do Rio Grande do Sul.

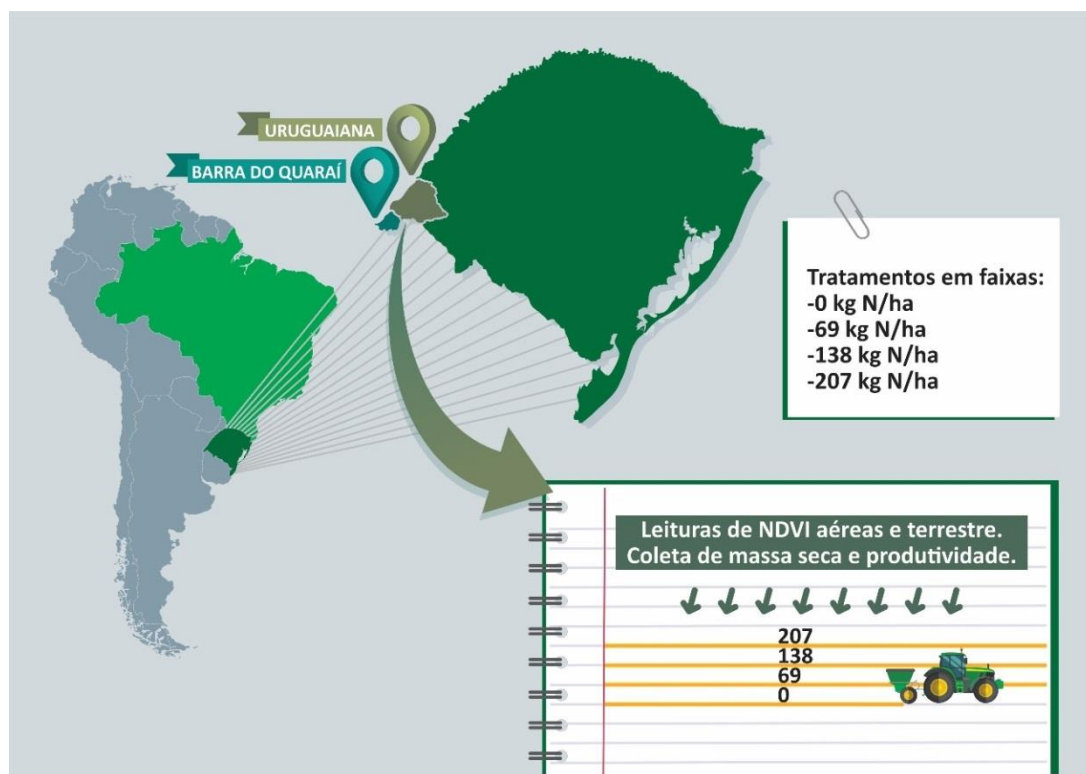


Figura 01. Representação esquemática do desenho experimental e da localização do experimento nos municípios de Uruguaiiana e Barra do Quaraí-RS.

Cada área produtiva possuía, aproximadamente, 20 ha, dentro dos quais foram demarcados cinco ha para servir como área experimental. Por ocasião, também foi realizada a malha de amostragem de solos de um hectare em toda área, visando conhecer a variabilidade espacial da fertilidade e a alocação do experimento em área homogênea de cinco hectares. As áreas experimentais possuem as características de solo descritas na Tabela 01. Em ambos os talhões e safras, os teores químicos analisados, indicaram valores baixos para os principais macronutrientes do solo, sendo os teores de matéria orgânica, fósforo e potássio classificados como níveis baixos, seguidos de pH abaixo de 5.5 e saturação de bases abaixo de 65%, representando grande parte da lavoura arroseira do estado do RS.

Tabela 01. Atributos químicos do solo antes da instalação dos experimentos, nos municípios de Uruguaiana Barra do Quaraí nas safras 2018/19 e 2019/20

Safra	Cultivar	Argila	MO	pH	Ca ⁺²	Mg ⁺²	CTC	P	K	Sat. Bases	Sat. Al ⁺³
Ano		---- (%) ----	(H ₂ O)		----- (mg dm ⁻³)-----				----- (%) -----		
2018/19	IRGA 424 RI	25	0,9	5,2	6,6	1,4	14,4	2,4	43,3	56,9	2,5
2019/20	IRGA 424 RI	17	0,9	4,8	3,4	0,9	9,2	9,6	50,7	49,3	12,5

MO – matéria orgânica; Al – alumínio; P – fósforo; K - potássio; Mg – magnésio; CTC – capacidade de troca de cátions; Sat. Bases – saturação por bases; Sat. Al⁺³ – saturação por alumínio.

De um modo geral, as áreas experimentais possuem o relevo suave, com predominância de solos franco argiloso, mal drenados e pouco profundos. De acordo com a Embrapa (2013), o solo das áreas experimentais classifica-se como Chernossolo Ebânico, com horizonte B textural, apresentando alta pegajosidade e plasticidade.

Segundo a classificação climática de Köppen, o clima do local é do tipo Cfa, subtropical sem estação seca definida (WREGE et al., 2011).

A precipitação (Figura 02) e a radiação solar (Figura 03) mensal durante o período experimental foram monitoradas pela estação meteorológica localizada no município de Uruguaiana, do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), distante, respectivamente, 17 e 47 km dos talhões das safras 2018/19 e safra 2019/20 (áreas experimentais), respectivamente.

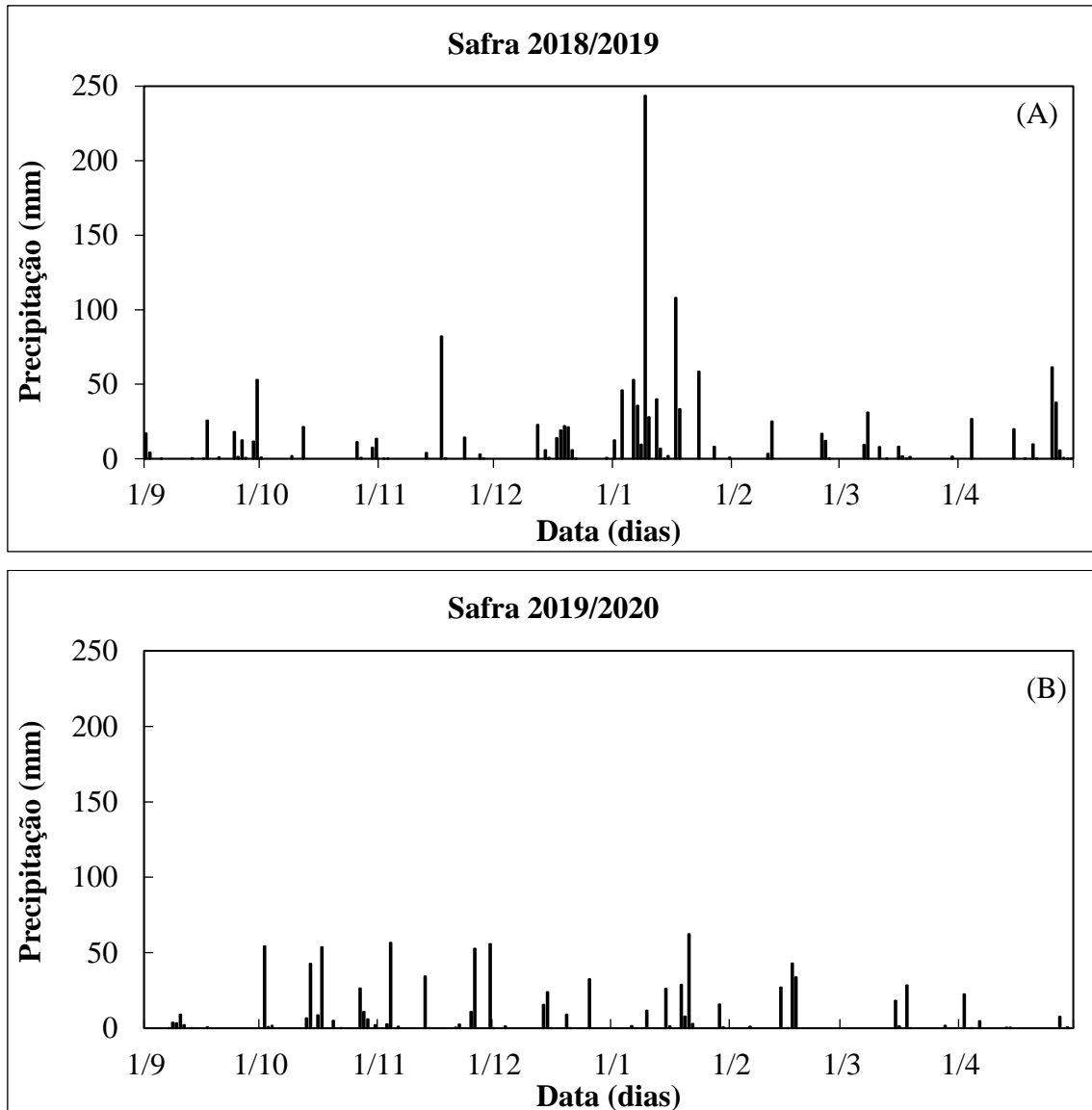


Figura 02. Precipitação diária (mm), de (A) 1º de setembro de 2018 a 30 de abril de 2019 e (B) 1º de setembro de 2019 a 30 de abril de 2020, para o município de Uruguaiana-RS. Fonte de dados: INMET.

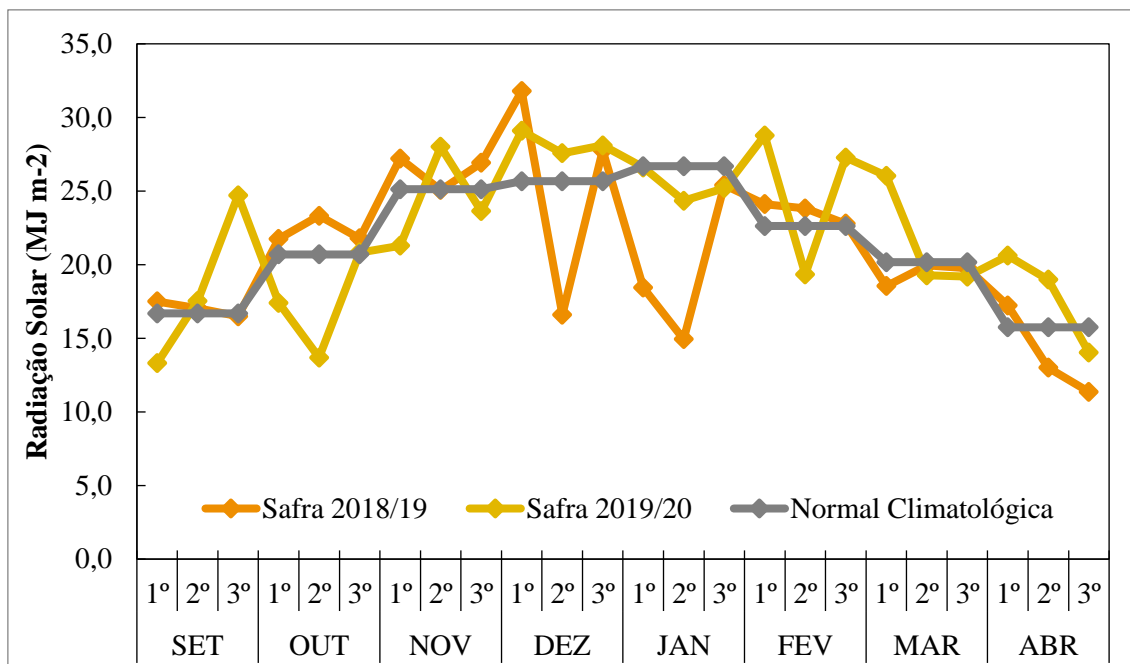


Figura 03. Radiação solar decendial ocorrida na safra 2018/2019 (linha laranja), safra 2019/20 (linha amarela) e a Normal Climatológica (linha cinza) para os meses de setembro à abril, para o município de Uruguaiiana-RS. Fonte de dados: INMET.

O experimento foi conduzido no delineamento de blocos casualizados, em arranjo de faixas com parcelas subdivididas, com oito repetições. Nas parcelas principais foram locadas as quatro doses de N (0, 69, 138 e 207 kg ha⁻¹), aplicadas em pré-irrigação do arroz irrigado, cultivar IRGA 424 RI (Figura 4). Nas subparcelas foram alocados os tratamentos com e sem adubação nitrogenada complementar (37 kg ha⁻¹ de N).

Os tratamentos obtidos são resultantes da combinação da cultivar com cada nível de nitrogênio em cobertura, com a presença ou ausência da adubação adicional. Por se tratar de um experimento conduzido em área comercial, além de todas as precauções sobre a homogeneidade da área, adotou-se oito repetições, em todos os tratamentos, a fim de aumentar a confiabilidade dos dados coletados.

O experimento foi alocado dentro de talhão com uso de máquinas e equipamentos agrícola de tamanho comercial, necessitando abranger uma área considerável.

Cada faixa tinha 48 m de largura por 160 m de comprimento, cada bloco, 20 metros por 192 metros e cada subparcela com 1,53 m de largura x 20 m de comprimento, conforme Figura 04.

160 metros								20 m		48 m	192 metros
Bloco 1	Bloco 4	Bloco 2	Bloco 8	Bloco 3	Bloco 6	Bloco 7	Bloco 5				
IRGA 424 RI							+37 kg	0 Kg N			
							0 kg	69 Kg N			
							+37 kg	138 Kg N			
							69 kg				
							138 kg				
							+37 kg	207 Kg N			
							207 kg				
							+37kg				

Figura 04. Croqui dos tratamentos instalados em área de lavoura comercial de arroz irrigado nos municípios de Uruguaiiana e Barra do Quaraí-RS, safras 2018/19 e 2019/20.

No preparo da área, realizado nove meses antes da semeadura do arroz, procederam-se as operações de nivelamento e construção das taipas, visando um revolvimento mínimo de solo para a semeadura direta do arroz. Esta operação foi realizada na segunda quinzena do mês de setembro de 2018 e 2019, utilizando a cultivar IRGA 424 RI (ciclo médio), com densidade de 90 kg ha⁻¹ de sementes. A semeadura seguiu procedimentos adotados na área comercial sendo que, posteriormente ao estabelecimento da cultura, procedeu-se a demarcação das áreas experimentais.

Como adubação de base adotou-se a recomendação de acordo com a análise de solo, sendo o fósforo (P) aplicado na linha de semeadura e o potássio (K) distribuído a lanço, concomitantemente à semeadura do arroz. Como adubação de base utilizou-se 70 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 110 kg ha⁻¹ de K₂O. A fonte de P₂O₅ foi o fosfato monoamônico e a fonte de K₂O foi o cloreto de potássio. A fertilização de cobertura foi aplicada com distribuidor a lanço tratorizado.

A condução e a distribuição da água de irrigação foram realizadas por meio de inundação por taipas, construídas em nível com 3 cm de desnível entre estas. A água foi conduzida do local de barramento (barragem) até a lavoura, por um sistema de bombeamento elétrico, que recalrava a água até o ponto mais alto do talhão e canais de condução. O início do processo de irrigação se deu quando as plantas de arroz atingiram o estágio V₂/V₃, ou seja, elas estavam com duas/três folhas completamente expandidas, de acordo com a escala de Counce et al. (2000). Após o estabelecimento da lâmina de água no interior do talhão, ela foi mantida de forma permanente durante todo o ciclo da cultura, correspondendo a um período de, em torno, 100 dias de irrigação. A supressão da irrigação foi realizada 10 dias da colheita.

Dois dias antes de realizar a aplicação da lâmina de água no talhão, quando as plantas estavam no estágio V₂/V₃, uma aeronave remotamente pilotada da marca ArnsTronic, modelo LumiX2®, equipada com câmera (MAPIR 3 para NDVI) realizou o sensoriamento da área.

O planejamento da missão foi realizado com app LumiXMapper®, que utiliza imagem do banco de dados de satélite da Microsoft Bing, onde é desenhado o polígono de interesse, é feita a seleção de câmeras com pré configurações de distância focal, a sobreposição lateral e frontal e GSD da câmera, as linhas de voo e o comando de disparo da foto.

O RGN (bandas red, green e nir) passa pelo software Mapir MCC (Mapir Camera Control), que calibra as imagens RAW, normalizando (deixando todas com a mesma intensidade radiométrica, independentemente da hora do dia capturada, grande problema espectral das câmeras multiesptrais) todas as fotos utilizando um ponto de controle radiométrico.

Para mosaicagem das fotos foi utilizado o Agisoft Metashape, tanto para as imagens RGB quanto para RGN, sendo que as duas câmeras usadas possuíam o mesmo instante de foto, ou seja, o mesmo geotag (mesmo georreferenciamento), gerando mosaicos iguais quanto à geolocalização. Com os mosaicos prontos, os mesmos eram recortados externamente. Após recortar o mosaico RGN calibrado, somente das zonas de manejo, utilizando a metodologia clip raster e o software Q-GIS, foram extraídos os dados estatísticos de cada pixel. Estes foram exportados para uma planilha Excel para análise através de gráficos e modelos estatísticos. Com isso, os dados retornaram ao Q-GIS, gerando mapas pelo método de Krigagem.

Com isto, utilizo-se o NDVI, o qual são mensurados os comprimento de onda do Infravermelho e Vermelho, para identificar falhas na emergência ou zonas com menor número de plantas do que a preconizada (Equação 1):

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

onde:

NIR: radiação refletida no comprimento de onda do infravermelho próximo

RED: radiação refletida no comprimento de onda do vermelho

As áreas detectadas com algum problema de estabelecimento da cultura foram descartadas e novas áreas foram demarcadas, garantido a uniformidade do estande das plantas na área experimental.

Em adição ao NDVI homogêneo na área experimental, houve a preocupação que toda a área experimental fosse uniforme em termos de teor de matéria orgânica, profundidade de solo e declividade, ou seja, um ambiente que oferecesse condições de manejo semelhante entre os tratamentos.

A aplicação das doses de fertilizante nitrogenado um dia antes da entrada da água na lavoura foi realizado com um conjunto trator-distribuidor equipado com piloto automático e posicionamento por sistemas globais de navegação por satélite, o qual tracionava um distribuidor a lança Hércules 10000®. As doses de N aplicadas seguiram o critério de possibilitar obter uma curva de resposta de produtividade à fertilização nitrogenada.

Nos tratamentos com aplicação complementar de N em cobertura (37 kg ha^{-1} de N), a aplicação ocorreu no estágio R1, ou seja, na diferenciação da panícula (COUNCE et al., 2000). A fonte de N foi a ureia (46-00-00). A distribuição da mesma foi de forma manual.

Após o estágio V3, foram realizados os levantamentos aéreos com sensor embarcado. O sensoriamento com ARP ocorreu no estágio R1 (diferenciação da panícula). Simultaneamente foram coletados oito pontos amostrais por transecto predefinidos, com sensor ótico ativo (GreenSeeker) de forma manual, o qual fornece o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI). O sensor foi posicionado a uma altura de 0,8 – 1,0 m acima do dossel, realizando amostras na unidade experimental, com 20 m de comprimento (Figura 05).

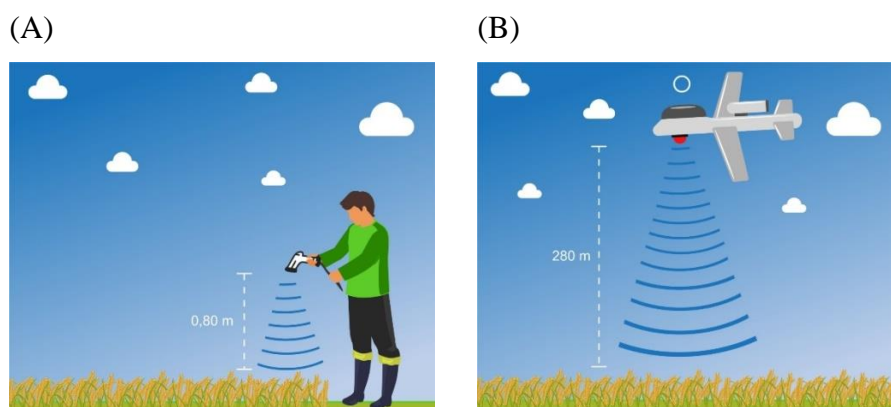


Figura 05. Representação esquemática do sensoriamento proximal com GreenSeeker realizado manualmente (A) e com sensor acoplado ao VANT LumiX2®, equipado com câmera MAPIR 3 (B).

Após a realização do sensoriamento, procedeu-se a amostragem da biomassa da parte aérea das plantas de arroz no estágio R1, em cada unidade experimental, para estimativa da produtividade de massa seca da parte aérea. Cada amostragem compreendeu uma área útil da parcela de $0,25 \text{ m}^2$ (03 linhas de semeadura x 0,5 m de comprimento). Nesta área, toda a biomassa de plantas de arroz existente acima do nível do solo foi colhida manualmente e identificada. Após a coleta, as amostras foram embaladas em sacos de papel identificados e submetidas à secagem em estufa, com circulação forçada de ar sob temperatura de 65°C , até atingirem peso constante. Finalizada a secagem, as amostras foram pesadas em balança analítica de precisão, com posterior correção da massa seca.

No estágio R₁ foi determinado o teor de N no tecido foliar. Para tal, as amostras secas foram moídas em moinho de facas e câmara de inox e submetidas à digestão sulfúrica, segundo o método de Kjeldahl (TEDESCO et al., 1995).

A quantidade total de N na planta foi determinada a partir do teor de N na planta e produtividade de massa seca da parte aérea (Equação 2):

$$QN = (MS * TN) / 100 \quad \text{-----} \quad (2)$$

onde:

QN = quantidade de nutriente (kg);

MS = produtividade de massa seca (kg ha⁻¹);

TN = teor de N na biomassa (%).

A quantidade de N acumulada na parte aérea foi obtida a partir da multiplicação da biomassa da parte aérea e o teor de N no tecido foliar.

Em área adjacente ao ponto amostral para determinação da biomassa das plantas de arroz, procedeu-se a contagem do número total de colmos viáveis (panículas formadas) no estágio fenológico R₉. Para tanto, foram contados manualmente todos os colmos presentes em três metros de linha, para se obter o número de panículas por área. No mesmo ponto de contagem, foram coletadas cinco panículas para determinação do percentual de esterilidade, em cada repetição. Para tal, procedeu-se as contagens dos números totais de grãos cheios e vazios das panículas coletadas.

A coleta das amostras para estimar a produtividade de grãos e os componentes de rendimento do arroz foi realizada quando as plantas atingiram estágio R₉, ou seja, com a massa de grãos com teor de água entre 24 - 20% (SOSBAI, 2018). Fêz-se a colheita de forma manual, nas oito repetições de cada tratamento, onde cada área amostral teve quatro metros de comprimento por sete linhas de arroz de largura, totalizando 4,76 m², a fim de se obter a produtividade. A determinação dos componentes de rendimento foi realizada pela contagem do número de panículas/m², do número de grãos/panícula e do peso de mil grãos. Foram coletadas cinco panículas para as determinações do número de grãos por panícula e do peso de 1000 grãos.

Conhecidas as produtividades obtidas em cada dose de N aplicado em cobertura um dia antes da entrada da água e mais uma aplicação ou não complementar de N, foram ajustadas as curvas de resposta. Para a cultivar IRGA 424 RI foi determinada a dose de máxima eficiência

técnica (DMET) de N em cobertura. A DMET é definida como a dose de N em cobertura que resulta em máximo rendimento de grãos, através da Equação 3.

$$Y = -b/2.a \quad \text{_____} \quad (3)$$

onde:

Y = dose de N aplicado (kg ha⁻¹)

a = coeficiente da equação

b = coeficiente da equação

Posteriormente, a DMET de N em cobertura foi relacionada com o valor do NDVI no estágio fenológico R1.

As variáveis analisadas foram submetidas à análise de variância pelo teste Tukey, ao nível de 5% de probabilidade, quando constatada a significância. Os efeitos das doses de N foram estudados por meio de análise de regressão, testando-se os modelos linear e quadrático. Na análise de correlação entre as variáveis aplicou-se a correlação linear de Pearson ($p < 0,05$).

6. ARTIGO I - AVALIAÇÃO DO NDVI EM ARROZ IRRIGADO POR DUAS PLATAFORMAS DE COLETA: AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA E SENSOR PROXIMAL

Cleiton Jose Ramão¹, Telmo Jorge Carneiro Amado², Lucio de Paula Amaral², Luiz Felipe Diaz de Carvalho², Deise Dalazen Castagnara³, Paulo Régis Ferreira da Silva⁴, Antônio Arns⁵

¹ Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA), Uruguaiana – RS, Brasil: cramao@gmail.com

² Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria – RS, Brasil.

³ Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), Uruguaiana – RS, Brasil.

⁴ Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre – RS, Brasil.

⁵ Empresa ArnsTronic, VANTs e Análise de Dados, Uruguaiana – RS, Brasil.

Resumo

Com o avanço da tecnologia, o uso de sensores de vegetação na agricultura permite que o produtor possa tomar decisões assertivas e economizar tempo, identificando problemas na lavoura antecipadamente. Este fato tem impulsionado estudos específicos para análise de plantas pois, além do estado nutricional, os sensores podem inferir sobre a disponibilidade de água para as plantas, tanto o excesso como a sua falta. Assim, objetivo deste trabalho foi avaliar o uso de sensoriamento remoto visando a prescrição da fertilização nitrogenada em cobertura no estágio R1 em arroz irrigado e a eficiência do uso do NDVI, medido por dois sensores óptico de vegetação. O experimento foi conduzido no delineamento blocos casualizados, em arranjo de faixas com subparcelas 4x2, com oito repetições. Foram alocadas as quatro doses de N (0, 69, 138 e 207 kg⁻¹ ha⁻¹), aplicadas no estágio V2/V3, conforme escala de Counce et al. (2000), um dia antes da entrada da água de irrigação. A referência de teor ideal de N na massa seca da parte aérea, no início do período reprodutivo (estádio R1) para altas produtividades de grãos, é de 2,3%. Nesse mesmo estágio da cultura, as leituras do NDVI obtido pelos sensores GreenSeeker e Mapir foi sensível ao incremento de N em cobertura, possibilitando a adoção de medidas corretivas, visando atingir altas produtividades de grãos. Onde, os incrementos dos valores de NDVI foi acompanhado pelo aumento de produtividade de grãos, porém cada plataforma possui comportamento específico para cada safra.

Palavras-chave: *Oryza sativa* L., NDVI, Agricultura de Precisão, ARP.

Abstract

With the advancement of technology, the use of vegetation sensors in agriculture allows the producer to make assertive decisions and save time, identifying problems in the crop in advance. This fact has driven specific studies for plant analysis because, in addition to nutritional status, sensors can infer about water availability for plants, both excess and lack thereof. Thus, the objective of this work was to evaluate the use of remote sensing in order to prescribe nitrogen fertilization in coverage at the R1 stage in irrigated rice and the efficiency of the use of NDVI, measured by two optical vegetation sensors. The experiment was conducted in a randomized block design, in a strip arrangement with 4x2 subplots, with eight replications. The four doses of N (0, 69, 138 and 207 kg⁻¹ ha⁻¹) were allocated, applied at stage V2/V3, according to the scale by Counce et al. (2000), one day before the input of irrigation water. The reference for the ideal N content in the shoot dry mass, at the beginning of the reproductive period (stage R1) for high grain yields, is 2.3%. At this same crop stage, the NDVI readings obtained by the GreenSeeker and Mapir sensors were sensitive to the increment of N in coverage, enabling the adoption of corrective measures, aiming at achieving high grain yields. Where, the increments of NDVI values were accompanied by the increase in grain yield, but each platform has a specific behavior for each crop.

Keywords: *Oryza sativa* L., NDVI, Precision Agriculture, ARP.

6.1. Introdução

Para a safra 2021/22, a produção global de arroz foi estimada em 512,4 milhões de toneladas (base beneficiada), o que representa uma redução de 1,2 milhões de toneladas em relação à anterior (USDA, 2022). O Brasil é um dos 10 maiores produtores mundiais de arroz, produzindo em torno de 12 milhões de toneladas de grãos anual (USDA, 2022), sendo que, na região sul do país, prevalece o cultivo do arroz irrigado e com aporte de nutrientes visando altas produtividades de grãos.

A aplicação de nitrogênio (N) é um dos fatores que podem limitar a produtividade do arroz. Nesse sentido, buscam-se tecnologias que possam determinar um índice de suficiência para estimativa da adubação nitrogenada necessária para obtenção de altas produtividades. De acordo com Guan et al. (2016), os sensores de vegetação em sensoriamento remoto são capazes de determinar o estado nutricional nitrogenado das plantas de arroz em tempo real, aumentando a eficiência da fertilização, bem como de tempo e recursos.

Os provedores de software agrícola utilizando imagens de satélite podem obter índices que se relacionam com os teores de N em plantas de arroz, como a plataforma “Índice de Vegetação por Diferença Normalizada” (NDVI - Normalized Difference Vegetation Index). Mas, esse índice é calculado com base nos valores de reflectância da faixa do vermelho e do infravermelho próximo (ROUSE et al., 1973). No entanto, o índice de vegetação (IV) é mais difundido em grandes culturas, tais como trigo (VIAN et al., 2018), milho (AMADO et al., 2017), cana-de-açúcar (ROSA et al., 2015) e tomate (OLIVEIRA et al., 2019). A utilização do NDVI economiza tempo e recursos, permitindo corrigir precocemente possíveis deficiências nutricionais em estádios iniciais da cultura e ajuste de adubações complementares ao longo do ciclo.

As recomendações de fertilização nitrogenada em cobertura podem ser acompanhadas através de sensores montados no trator em operação (RAUN et al., 2005), em sensoriamento remoto (SCHWALBERT et al., 2019), ou em instrumentos portáteis de diagnóstico (ROGOVSKA et al., 2019). Para prescrição da adubação nitrogenada baseada nesses sensores, são criadas faixas na lavoura, fertilizadas com elevada dose de N, gerando uma área referência sem deficiência de N. O sensoriamento é realizado na área de referência e nas demais áreas de interesse na lavoura, onde o índice médio obtido na lavoura a ser adubada é dividido pelo índice médio da área referência, de modo que um resultado menor que 0,95 indica a necessidade de fertilização. Em diversas culturas, tais como feijão, milho e arroz, o uso desta técnica tem aumentado a eficiência do uso de N (SILVA et al., 2011; POCOJESKI et al., 2012; YAN et al., 2014; YUAN et al., 2016; MAIA et al., 2017).

As recomendações de adubação nitrogenada em arroz irrigado para o Sul do Brasil, são baseadas pelo teor de matéria orgânica e expectativa de resposta da cultura, chegando a 150 kg ha⁻¹ de N (SOSBAI, 2018). Quanto ao parcelamento do N, durante o ciclo da cultura, não obteve resultado em produtividade, quando comparado há uma única aplicação em pré-irrigação (ANGHINONI et al., 2019).

A utilização de sensores proximais ou de contato direto com o alvo, tais como o de pinçar (clorofilômetro CFL 1030), permite identificar o teor nutricional da planta. São sensores práticos e portáteis, que realizam a leitura folha a folha, porém demandam várias leituras na área da lavoura. Assim, sensores óticos proximais ou sensores de dossel, baseados na refletância do alvo, passam a ser mais interessantes, fornecendo resultados rápidos com base numa maior quantidade de plantas.

A aquisição de dados sobre o dossel das plantas, através de imagens digitais, para avaliação do vigor das mesmas, varia com o sensor utilizado e com a técnica de análise da

imagem (BARBOSA et al., 2016). As câmeras RGB que captam o visível são mais acessíveis economicamente que as câmeras térmicas, multiespectrais e hiperespectrais.

As câmeras com alta resolução têm um custo elevado, o que limita seu uso em larga escala. No entanto, câmeras digitais convencionais podem ser usadas para determinar o conteúdo de clorofila e monitorar o teor de N da planta de arroz em crescimento, auxiliando os produtores a identificarem problemas na lavoura e obterem melhores resultados, de forma rápida e precisa (SABERION et al., 2014). As câmeras podem ser acopladas em ARP, permitindo sobrevoar áreas específicas e monitorar o desenvolvimento fenológico das culturas em condição de campo, para estimar as variações sazonais da cultura durante a safra.

Com o avanço da tecnologia, o uso de imagens de satélite na agricultura permite que o produtor possa tomar decisões assertivas e economizar tempo, identificando problemas na lavoura antecipadamente. Este fato tem impulsionado o desenvolvimento de programas computacionais específicos para análise de plantas pois, além do estado nutricional, as imagens podem inferir sobre a disponibilidade de água para as plantas, tanto o excesso como a sua falta.

Assim, o objetivo deste trabalho é avaliar o uso de sensoriamento remoto visando a prescrição da fertilização nitrogenada em cobertura no estágio R1 em arroz irrigado e a eficiência do uso do NDVI, medido por dois sensores óptico de vegetação, como ferramenta para estimativa da biomassa da parte aérea e da quantidade de N acumulado em arroz irrigado submetido a diferentes doses de N em cobertura.

6.2. Material e Métodos

O estudo foi conduzido durante duas safras agrícolas (2018/19 e 2019/20), em duas áreas comerciais de arroz localizadas nos municípios de Uruguaiana e Barra do Quaraí – RS, selecionadas por possuírem características de solo (Tabela 01), relevo e clima que representam a região orízicola da Fronteira Oeste, do estado do RS.

Tabela 01. Atributos químicos do solo antes da instalação dos experimentos, nos municípios de Uruguaiana (2018/19) e Barra do Quaraí –RS, (2019/20)

Safra	Cultivar	Argila	MO	pH	Ca ⁺²	Mg ⁺²	CTC	P	K	Sat. Bases	Sat. Al ⁺³
		---- (%) ----	(H ₂ O)		----- (mg dm ⁻³)-----					---- (%) ----	
2018/19	IRGA 424 RI	25	0.9	5.2	6.6	1.4	14.4	2.4	43.3	56.9	2.5
2019/20	IRGA 424 RI	17	0.9	4.8	3.4	0.9	9.2	9.6	50.7	49.3	12.5

Legenda: MO – matéria orgânica; Al – alumínio; P – fósforo; K - potássio; Mg – magnésio; CTC – capacidade de troca de cátions; Sat. Bases – saturação por bases; Sat. Al⁺³ – saturação por alumínio.

De um modo geral, as áreas experimentais possuem o relevo suave, com predominância de solos franco argiloso, mal drenados e pouco profundos. De acordo com a Embrapa (2013), o solo das áreas experimentais classifica-se como Chernossolo Ebânico, com horizonte B textural, apresentando alta pegajosidade e plasticidade. Segundo a classificação climática de Köppen, o clima do local é do tipo Cfa, subtropical, sem estação seca definida (WREGGE et al., 2011).

A precipitação e a radiação solar (Figuras 01 e 02) mensal durante o período experimental foram monitoradas pela estação meteorológica de Uruguaiana, do Instituto Nacional Meteorologia (INMET) distante, respectivamente, 17 e 47 km dos talhões, nas safras 2018/19 e safra 2019/20.

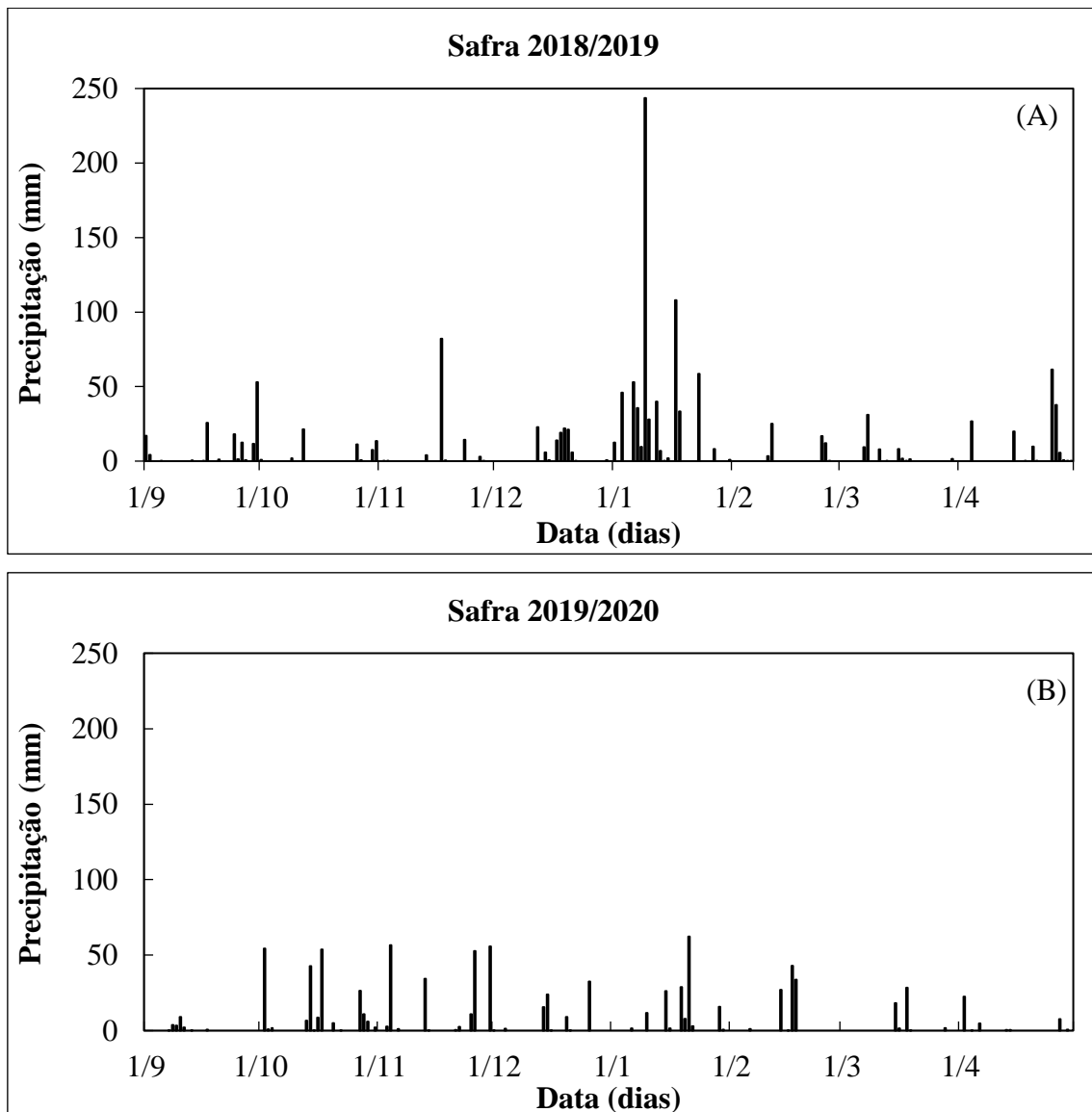


Figura 01. Precipitação diária (mm), de (A) 01 de setembro de 2018 a 30 de abril de 2019 e (B) 01 de setembro de 2019 a 30 de abril de 2020, na estação meteorológica de Uruguaiana-RS. Fonte de dados: INMET.

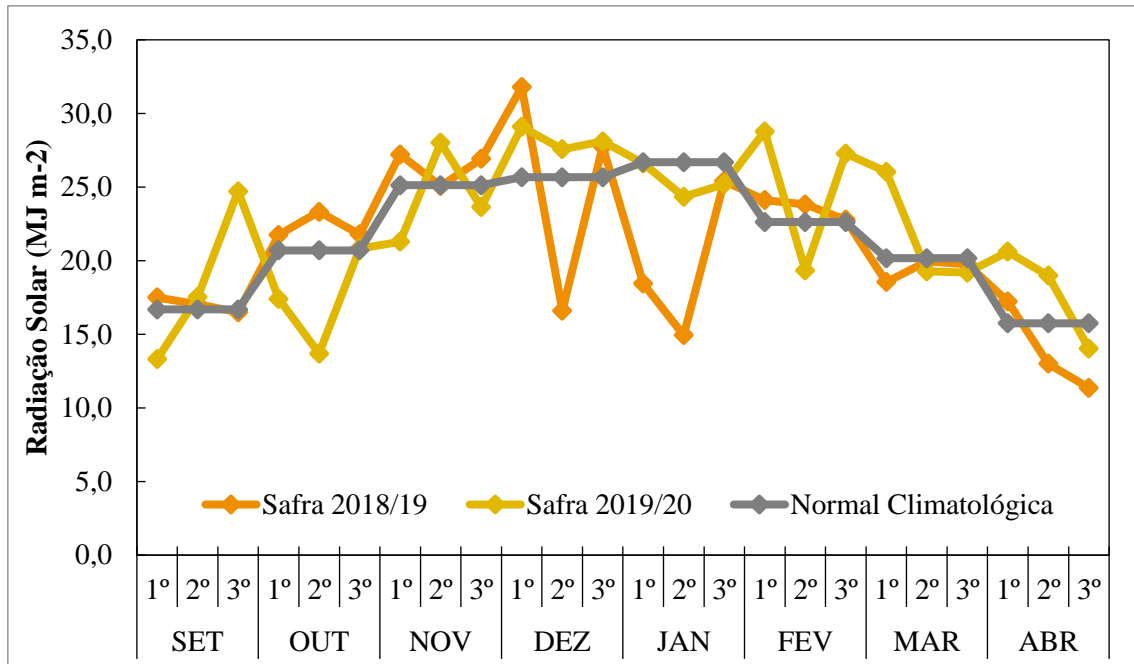


Figura 02. Radiação solar decendial ocorrida nas safras 2018/2019 (linha laranja) e a 2019/20 (linha amarela) e a Normal Climatológica (linha cinza) para os meses de setembro a abril, na estação meteorológica de Uruguaiana-RS. Fonte de dados: INMET.

O experimento foi conduzido no delineamento blocos casualizados, em arranjo de faixas com subparcelas 4x2, com oito repetições. Na faixa A (horizontal) foram alocadas as quatro doses de N (0, 69, 138 e 207 kg⁻¹ ha⁻¹), aplicadas no estádio V2/V3, conforme escala de Counce et al. (2000), um dia antes da entrada da água de irrigação.

A semeadura do arroz foi realizada na segunda quinzena do mês de setembro de 2018 e 2019, utilizando a cultivar de ciclo médio IRGA 424 RI, com densidade de 90 kg ha⁻¹ de sementes. A semeadura seguiu procedimentos adotados na área comercial, sendo que, posteriormente ao estabelecimento da cultura, procedeu-se a demarcação da área experimental.

Como adubação de base, adotou-se a recomendação de acordo com a análise de solo para atingir qual expectativa de produtividade “Muito Alta” sendo o fósforo (P) aplicado na linha de semeadura e o potássio (K) distribuído a lanço, concomitantemente à semeadura do arroz. Na adubação de base utilizou-se 70 kg ha⁻¹ de P, na forma de fosfato monoamônico, e 110 kg ha⁻¹ de K, na forma de cloreto de potássio. A fertilização potássica de cobertura foi aplicada com distribuidor a lanço tratorizado.

A condução e a distribuição da água de irrigação foram realizadas por meio de inundação por taipas, construídas em nível com 3 cm de desnível entre estas.

Dois dias antes de realizar a aplicação da lâmina de água no talhão, com o arroz estando no estágio V₂/V₃, uma aeronave remotamente pilotada da marca ArnsTronic modelo LumiX2®, equipada com câmera (MAPIR 3), realizou o sensoriamento da área. O planejamento da missão de vôo e das configurações de sobreposição de imagens, distância focal e GSD da câmera foram realizados com app LumiXMapper®. A calibração radiométrica das imagens foram realizadas pelo software Mapir MCC (Mapir Camera Control). Os mosaicos de imagens foram gerados pelo Agisoft Metashape, com extração de dados e geração de mapas pelo software Q-GIS.

Com isto, utilizou-se o índice NDVI, que faz avaliações nos comprimentos de onda do Infravermelho e do Vermelho Próximo, para identificar falhas na emergência ou zonas com menor densidade de plantas do que a preconizada (Equação 1):

onde:

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

NIR: radiação refletida no Vermelho Próximo

RED: radiação refletida no vermelho

As áreas detectadas com algum problema de estabelecimento da cultura foram descartadas e novas áreas foram demarcadas, garantindo a uniformidade do estande de plantas na área experimental. Em adição ao NDVI homogêneo na área experimental, procurou-se uma área com uniformidade nos teores de matéria orgânica, na profundidade de solo e na declividade, ou seja, um ambiente que oferecesse condições de manejo semelhante entre os tratamentos.

A aplicação das doses de fertilizante nitrogenado um dia antes da entrada da água na área experimental foi realizada com um conjunto trator-distribuidor equipado com piloto automático e GPS, o qual tracionava um distribuidor a lança Hércules 10000®.

Após o estágio V₃, foram realizados os levantamentos aéreos com sensor embarcado. O sensoriamento com VANT ocorreu no estágio R₁ (diferenciação da panícula) e, simultaneamente, foram coletados oito pontos amostrais por transecto predefinido, com sensor ótico ativo (GreenSeeker) de forma manual, o qual fornece o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI). O sensor foi posicionado a uma altura de 0.8 - 1.0 m acima do dossel, realizando amostras na unidade experimental com 20 m de comprimento.

Após o sensoriamento, procedeu-se a amostragem da biomassa da parte aérea das plantas de arroz no estágio R₁ em cada unidade experimental, para estimativa da produtividade de massa seca da parte aérea. Cada amostragem compreendeu uma área útil da parcela de 0.25

m² (três linhas de semeadura x 0,5 m de comprimento). Nesta área, toda a biomassa de plantas de arroz existente acima do nível do solo foi colhida manualmente e identificada. Após a coleta, as amostras foram embaladas em sacos de papel identificados e submetidas à secagem em estufa com circulação forçada de ar sob temperatura de 65°C, até atingirem peso constante. Finalizada a secagem, as amostras foram pesadas em balança analítica de precisão, com posterior correção da massa seca.

No estágio R1 foi determinado o teor de nitrogênio (N) no tecido foliar. Para tal, as amostras secas foram moídas em moinho de facas e câmara de inox e submetidas à digestão sulfúrica por meio do método de Kjeldahl (TEDESCO et al., 1995). A quantidade total de N na planta foi determinada a partir do teor de N na planta e a produtividade de massa seca da parte aérea (Equação 2):

$$QN = (MS \cdot TN) / 100 \quad \text{_____} \quad (2)$$

onde:

QN = quantidade de N (kg);

MS = produtividade de massa seca (kg ha⁻¹);

TN = teor de N na biomassa (%).

A quantidade de N acumulada na parte aérea foi obtida a partir da multiplicação da biomassa da parte aérea e o teor de N no tecido da planta.

A coleta das amostras para estimar a produtividade de grãos e os componentes de rendimento foi realizada quando as plantas atingiram o estágio R9, ou seja, a massa de grãos estava com umidade entre 24 - 20% (SOSBAI, 2018). Foram colhidas as plantas de forma manual, em oito repetições (subparcela) de cada tratamento, onde cada área amostral teve 4 m de comprimento por sete linhas de arroz com largura de 0,17 m, totalizando 4,76 m².

Conhecidas as produtividades obtidas em cada dose de N aplicado em cobertura foram ajustadas as curvas de resposta do arroz. Nas duas safras, foi determinada a dose de máxima eficiência técnica (DMET) de N em cobertura. A DMET é definida como a dose de N em cobertura que resulta em máximo rendimento de grãos, conforme Equação 3:

$$Y = -b/2.a \quad \text{_____} \quad (3)$$

onde:

Y = dose de N aplicado (kg ha⁻¹)

a = coeficiente da equação

b = coeficiente da equação

Posteriormente, fêz-se a correlação da DMET de N em cobertura realizada no estágio V2/V3 com o valor do NDVI, avaliado no estágio R1.

As variáveis analisadas foram submetidas à análise de variância pelo teste Tukey, ao nível de 5% de probabilidade, quando constatada a significância. Os efeitos das doses de N aplicadas um dia antes da entrada da água de irrigação foram estimados por meio de análise de regressão, testando-se os modelos linear e quadrático. Na análise de correlação entre as variáveis, aplicou-se a correlação linear de Pearson ($p < 0,05$).

6.3. Resultados e Discussão

A produtividade de massa seca da parte aérea (Figura 03 a) influenciada pelas doses de N em cobertura em pré-irrigação, em ambas as safras, diferiu estatisticamente do tratamento que não recebeu adubação nitrogenada. Nas safras 2018/19 e 2019/20 houve, respectivamente, acréscimos 113% e 257% em relação a que dose de N, em produtividade de massa seca em relação à testemunha sem aplicação de N.

O teor de N no tecido da planta no estágio R1 do arroz (Figura 03 b) quando comparados com a testemunha, também foi influenciado pelas doses de N em cobertura, em ambas as safras, com acréscimo de 33% e 105% para o ano 2018/19 e 2019/20, respectivamente.

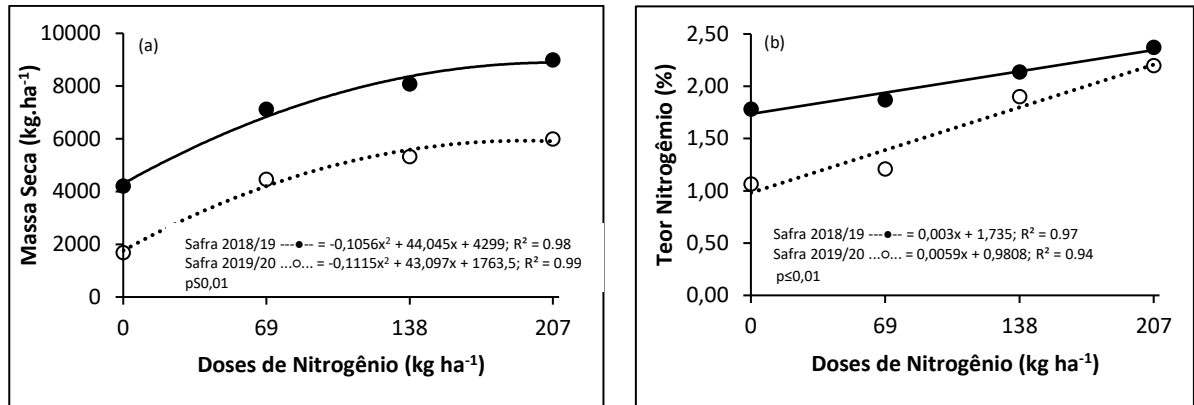


Figura 03. Produtividade de massa seca da parte aérea (a) e teor de N no tecido da planta de arroz no estágio R1 (b) em função de dose de nitrogênio aplicado em cobertura no estágio V2/V3, um dia antes da entrada da água de irrigação, nas safras 2018/19 (Uruguaiana) e 2019/20 (Barra do Quaraí).

Nas duas safras, a produtividade de massa seca da parte aérea do arroz aumentou de forma quadrática com o incremento da dose de N aplicada no estágio V2/V3, um dia antes da irrigação. Valores maiores na primeira safra, mostram a influência do maior número de dias com alta nebulosidade (Figura 2), fazendo com que a planta tenha maior competição por luz.

Já o teor de N na planta (Figura 1b), nas duas safras, aumentou linearmente à medida que se incrementou a dose de N no estágio V2/V3, para ambos os anos, porém, comportamento diferente entre safras, com valores máximos na maior dose de N em cobertura. Essa tendência se manteve, para teor de N na massa seca, com comportamento crescente e linear, atingindo valores muito próximos na maior dose, com 2,4 e 2,2 % de N absorvido para a safra 2018/19 e 2019/20. O que demonstraria uma referência de concentração ideal de N na tomada de decisão para manejo, próximo a 2,3%, no início do período reprodutivo.

A quantidade de N acumulado na parte aérea do arroz no estádio V1, nas duas safras, aumentou linearmente com o incremento da dose de N até 207 kg ha⁻¹ (Figura 04).

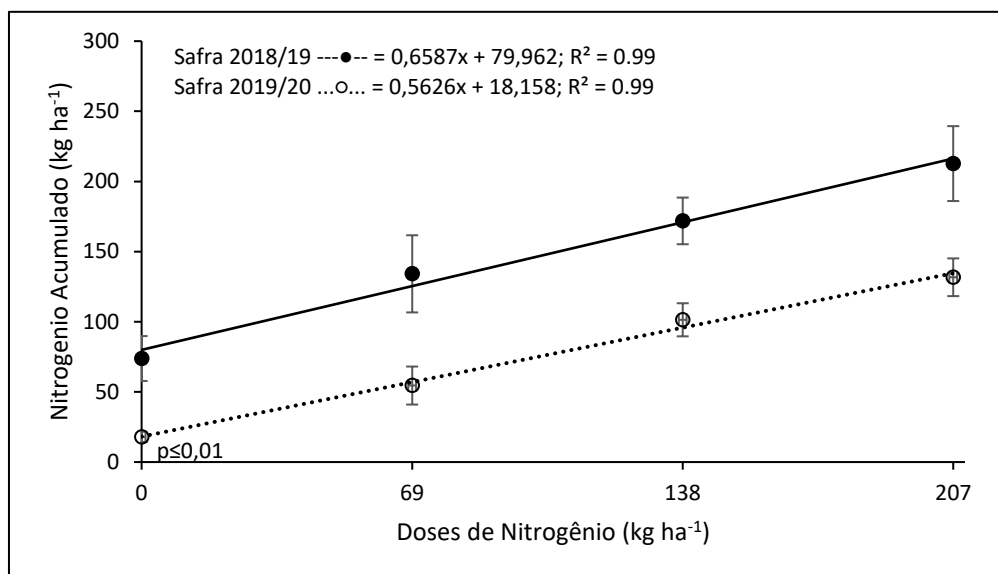


Figura 04. Quantidade de nitrogênio (N) acumulado na parte aérea das plantas de arroz no estado R1 em função de dose de N aplicado em cobertura no estádio V2/V3, um dia antes da entrada da água de irrigação, nas safras 2018/19 (Uruguaiana) e 2019/20 (Barra do Quaraí).

Os maiores valores em todas as doses aplicadas de N foram durante a safra 2018/19, quando comparada com a safra posterior, provavelmente o comportamento se deve por condições climáticas, principalmente a radiação solar no segundo decêndio de dezembro de 2018, a qual interfere no acúmulo de N e de massa seca. Onde a maior taxa de aplicação de N, resultou na maior quantidade absorvida na planta em estádio R₁. O solo contribuiu com aproximadamente 74 kg N⁻¹ na safra 2018/19 e no tratamento com maior dose aplicada, chegou a reter valores ao redor de 200 kg N⁻¹.

Ao analisar a eficiência no uso de N aplicado e o que realmente a planta absorveu (Figura 05) em estádio R₁, observou-se que ambas as safras apresentaram resposta semelhante, em torno de 67 a 55%, caracterizando alta eficiência quando comparada com outros sistemas de plantio de arroz, como “transplante” (ATA-UL-KARIM et al., 2013). Em um trabalho realizado na China, a eficiência de recuperação de N na cultura do arroz situou-se entre 30 e 35%, sendo que em algumas regiões no leste da China de apenas 20% (LI, 2010), demonstrando que a forma de manejar o nitrogênio no Brasil é mais eficiente que o citado em vários locais do mundo.

Dentre os itens monitorados em estádio R1 da cultura, as leituras do NDVI obtidas pelo sensor GreenSeeker foram sensíveis ao incremento da dose de N aplicada em V2/V3. (Figura

05 a). O acréscimo deste índice foi de 29% para dose de 207 kg.ha.N, em comparação ao tratamento sem N na safra 2018/19. Para a safra 2019/20, a plataforma indicou um acréscimo de 78%, em relação a testemunha, demonstrando um incremento de 0,01 ponto de NDVI para cada 14,8 e 6,27 kg.N⁻¹ aplicado nas duas safras, respectivamente. Quanto maiores os valores do NDVI, maiores são as diferenças entre a reflectância do infravermelho próximo com o vermelho, o que indica maior quantidade de clorofila e produção de massa seca e, conseqüentemente, maior a produtividade (RISSINI et al., 2015).

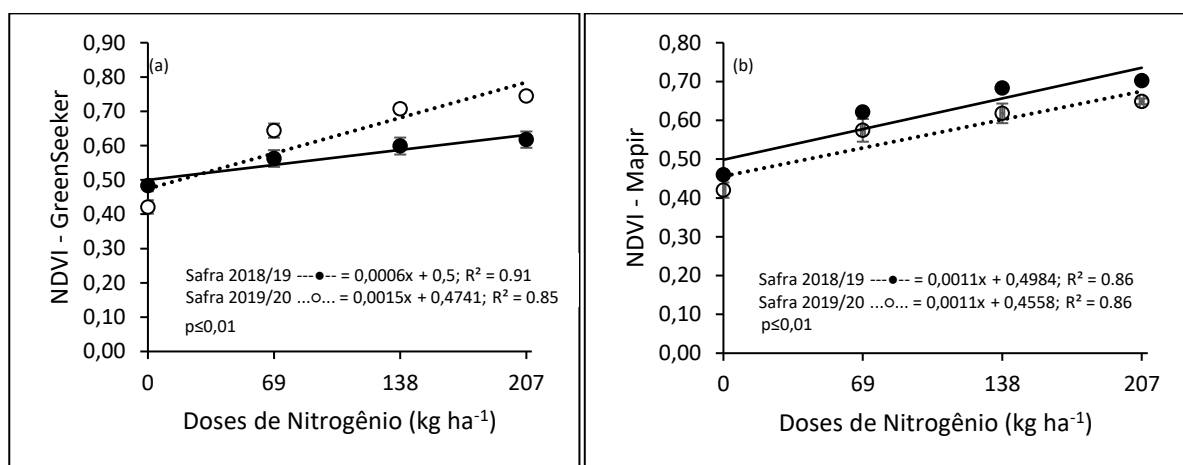


Figura 05. Resposta do NDVI sob duas plataformas de coleta, em função de doses de N aplicados em cobertura, nas safras 2018/19 (Uruguaiana) e 2019/20 (Barra do Quaraí).

Para a plataforma de coleta Mapir (Figura 05 b), acoplada a uma ARP, o NDVI obteve incremento de 52% sobre a testemunha na safra 2018/19, já para safra 2019/20 o NDVI coletado foi de 55% sobre a testemunha, demonstrando um incremento de 0,01 ponto de NDVI para cada 8,6 e 9 kg.N⁻¹ aplicado em ambas as safras, respectivamente. O sensoriamento remoto de baixa altitude com base em ARP também pode ser uma forma alternativa para diagnosticar o status de N do arroz na estação e orientar o manejo de N de taxa variável (ZHANG, 2012).

A partir dos valores de máxima de produtividade, obtida nos tratamentos para ambas as safras, se obteve o índice de suficiência (95%), e a produtividade de grãos correspondente (Tabela 02). Assim, a quantidade de N absorvido pela planta, em kg.ha⁻¹ e NDVI em ambas as plataformas de coleta, nas referidas produtividades, demonstram comportamento distintos entre plataformas e entre safras. A diferença em produtividade máxima entre cultivares foi de apenas 0,2 Mg ha⁻¹, representando o teto produtivo para as condições de dois anos agrícolas. O valor de NDVI, no estágio R₁, variou para ambas as safras avaliadas, apresentando comportamento distinto entre plataformas e safras. Os teores de N ficaram em 2,15 e 2,09% para safra 2018/19

e 2019/20, valores semelhantes foram encontrados em estudo realizado no Rio Yangtze na China com cultivares indicas (ATA-UL-KARIM et al., 2017). A diferença entre a quantidade de N absorvido foi de 18 kg ha^{-1} de N entre safras, valor semelhante para ambas atingir seu teto produtivo.

Tabela 02. Produtividade de grãos, índice de suficiência de nitrogênio (N), NDVI e quantidade de N absorvido pelas plantas de arroz nas safras 2018/19 (Uruguaiana) e 2019/20 (Barra do Quaraí).

Avaliações	Safra 2018/19	Safra 2019/20
Prod. Máxima (kg ha^{-1})	11.048	10.845
IS95 (NDVI GreenSeeker em R1)	0,59	0,71
IS95 (NDVI Mapir em R1)	0,66	0,62
Prod. Kg ha^{-1} (IS)	10.494	10.302
N.ab. kg ha^{-1} (IS)	143	125
Teor de N. crítico ab. (%) (IS)	2,15	2,09

Prod – produtividade; N. ab – nitrogênio absorvido; IS – índice de suficiência

A relação entre o NDVI sensoriado com as plataformas GreenSeeker e Mapir no estágio R₁ do arroz, com a produtividade de grãos na safra 2018/19 e 2019/20 é apresentada na Figura 06. Os incrementos dos valores de NDVI foram acompanhados pelo aumento de produtividade, nos dois anos agrícolas, atingiu valor de 0,62 e 0,75 para o GreenSeeker e 0,70 e 0,65 para Mapir, como valores máximos, para maior dose de N estudada. A cultivar IRGA 424 RI apresentou inclinação positiva retilínea, concordando com a maior produtividade, maior quantidade de N aplicado e maior NDVI (Figura 6), sendo o valor de NDVI de 0,70 foi o topo da reta em ambas as safras. Valores elevados de NDVI geralmente estão relacionados com maior produção de massa verde pela cultivar (KANKE et al., 2016).

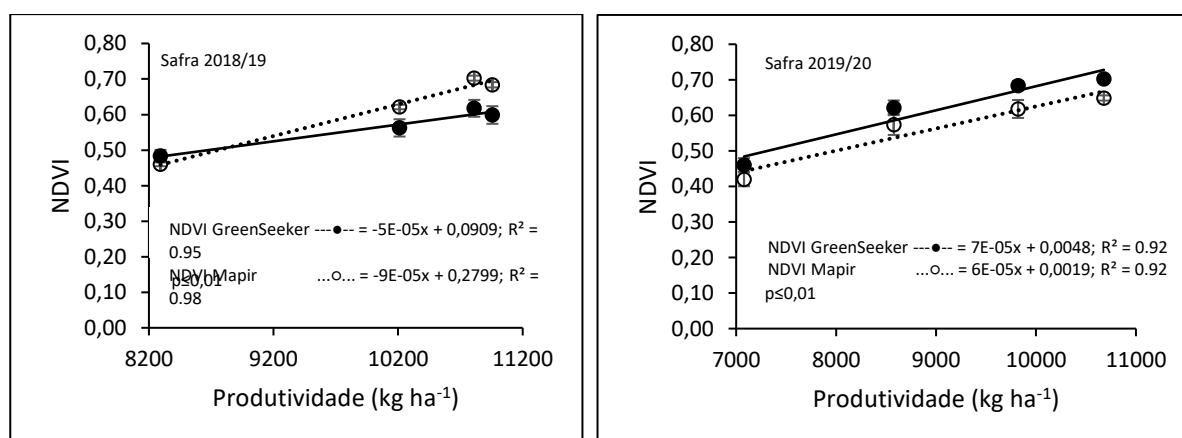


Figura 06. Valores de NDVI obtidos pelas plataformas GreenSeeker e Mapir em arroz irrigado (Cv. IRGA 424 RI) no estágio R₁, e sua relação com a produtividade de grãos nas safras 2018/19 (Uruguaiana) e 2019/20 (Barra do Quaraí).

Os valores apresentam variação entre ano agrícola e entre plataforma de coleta. Na primeira safra, a plataforma GreenSeeker registrou valores menores quando comparada com a coleta com Mapir nas maiores produtividades. Já na safra 2019/20, as plataformas inverteram seu comportamento, onde a Mapir registrou valores menores. Dessa forma, a utilização do NDVI em estágio R1 pode ser uma ferramenta na tomada de decisão nas aplicações de N em cobertura no referido estágio e uma forma de monitoramento do estado nutricional do N durante o ciclo da cultura (XUE et al., 2014). As relações apresentadas na Figura 06 sugerem que seria possível prever o “yield gap” com antecedência, possibilitando a adoção de medidas corretivas, visando atingir altas produtividades, desde que observadas as características de cada plataforma. Para Huang (2015), a aplicação em cobertura de N, no estágio inicial reprodutivo, deve ser 30% do volume total previsto.

A produtividade em doses altas de N está ligada diretamente aos fatores ambientais durante a safra e à cultivar utilizada, principalmente na safra 2018/19, onde a radiação solar foi comprometida por dias nublados durante o mês de dezembro e janeiro (Figura 02). Porém, no estágio fenológico R1 houve relação alta da produtividade com o NDVI, possibilitando a estimativa da produtividade de forma antecipada.

6.4. Conclusão

A produtividade de massa seca da parte aérea do arroz irrigado é influenciada pelas doses de nitrogênio aplicadas em pré-irrigação e pelo ano agrícola.

A referência de teor ideal de N na massa seca da parte aérea, no início do período reprodutivo (estádio R1) para altas produtividades de grãos, é de 2,2 a 2,4%.

Em estágio R1 da cultura, as leituras do NDVI obtido pelos sensores GreenSeeker e Mapir foi sensível ao incremento de N em cobertura, possibilitando a adoção de medidas corretivas, visando atingir altas produtividades de grãos.

Os incrementos dos valores de NDVI foi acompanhado pelo aumento de produtividade de grãos, porém cada plataforma possui comportamento específico para cada safra.

6.5. Referências Bibliográficas

AMADO, T. J. C.; et al. Yield and nutritional efficiency of corn in response to rates and splits of nitrogen fertilization. **Revista Ceres**, [s. l.], v. 64, n. 4, p. 351-359, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/0034-737x201764040003>>. Acesso: 20 jan. 2021.

ATA-UL-KARIM, S. T. et al; Development of critical nitrogen dilution curve of Japonica rice in Yangtze River Reaches, **Field Crops Research**, v. 149, p. 149-158, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.03.012>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429013000956>>. Acesso em: 16 fev. 2021.

ATA-UL-KARIM, S. T. et al. Comparison of different critical nitrogen dilution curves for nitrogen diagnosis in rice. **Scientific Reports**, v. 7, n. 42679, 2017 Disponível em: <https://doi.org/10.1038/srep42679>. Acesso em: 16 fev. 2021.

BARBOSA, J. Z. et al. Uso de imagens digitais obtidas com câmeras para analisar plantas Use of digital images taken with camera for plant analysis. **Revista de Ciências Agrárias**, [s. l.], v. 39, n. 1, p. 15-24, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.19084/RCA15006>>. Acesso em: 20 fev. 2021.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa, 3ed., 2013. 353 p.

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. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11119-016-9433-1>>. Acesso em: 16 fev. 2021.

LI, Y. et al. Estimating the nitrogen status of crops using a digital camera. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 118, n. 3, p. 221-227, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2010.05.011>>. Acesso em: 16 jan. 2021.

MAIA, S. C. M. et al. Criteria for topdressing nitrogen application to common bean using chlorophyll meter. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s. l.], v. 52, n. 7, p. 512-520, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2017000700005>. Acesso em: 16 dez. 2020.

OLIVEIRA, T. F.; PINTO, F. A. C.; SILVA D. J. H. Spectral vegetation indexes applied to nitrogen sufficiency index: a strategy with potential to increase nitrogen use efficiency on tomato crop. **Revista Engenharia Agrícola**, [s. l.], v. 39, n. 1, p. 118-126, 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v39n1p118-126/2019>>. Acesso em: 05 dez. 2020.

POCOJESKI, E. et al. Estimativa do teor de nitrogênio em arroz irrigado com o clorofilômetro e a cartela de cores. **Ciencia Rural**, [s. l.], v. 42, n. 11, p. 1982-1988, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782012005000087>>. Acesso em: 05 dez. 2020.

RAUN, W. R. et al. Optical sensor-based algorithm for crop nitrogen fertilization. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, n. 36, p. 2759-2781 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/00103620500303988>>. Acesso em: 05 dez. 2020.

RISSINI, A. L. L.; KAWAKAMI, J.; GENÚ, A. M. Índice de vegetação por diferença normalizada e produtividade de cultivares de trigo submetidas a doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, [s. l.], v. 39, n. 6, p. 1703-1713, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/01000683rbc20140686>>. Acesso em: 04 dez. 2020.

ROSA H. et al. Sugarcane response to nitrogen rates, measured by a canopy reflectance sensor. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, n. 50, p. 840-848, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2015000900013>>. Acesso em: 04 dez. 2020.

ROUSE J. et al. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. **Third ERTS Symposium**, NASA, p.309-317, 1973. Disponível em: <<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19740022614.pdf>>. Acesso em: 04 dez. 2020.

SABERIOON, M. M. et al. Assessment of rice leaf chlorophyll content using visible bands at different growth stages at both the leaf and canopy scale. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, [s. l.], v. 32, n. 1, p. 35-45, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2014.03.018>>. Acesso em: 25 nov. 2020.

SARKAR U. M. I. et al. Soil Test Based Inorganic Fertilizer and Integrated Plant Nutrition System for Rice (*Oryza sativa* L.) Cultivation in Inceptisols of Bangladesh. **The Agriculturists**, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 33-42, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.3329/agric.v14i1.29098>>. Acesso em: 25 nov. 2020.

SARTORI, G. M. I. et al. Rendimento de grãos e eficiência no uso de água de arroz irrigado em função da época de semeadura. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 3, p. 397-403, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0103-84782013000300004>>. Acesso em: 25 nov. 2020.

SILVA, M. A. G. Da. et al. Monitoring and evaluation of need for nitrogen fertilizer topdressing for maize leaf chlorophyll readings and the relationship with grain yield. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, [s. l.], v. 54, n. 4, p. 665-674, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1516-89132011000400004>>. Acesso em: 25 nov. 2020.

SCHWALBERT, R. A. et al. Fine-tuning of wheat (*Triticum aestivum*, L.) variable nitrogen rate by combining crop sensing and management zones approaches in southern Brazil. **Precision Agriculture**, [s. l.], v. 20, n. 1, p. 56-77, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11119-018-9581-6>>. Acesso em: 04 jan. 2021.

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

TEDESCO, M.J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico de Solos, 5).

USDA. **United States Department of Agriculture**. Production, Crops, Rice. 2022. Disponível em <<https://www.ers.usda.gov/topics/crops/rice/>>. Acesso em: 05 ago. 2022.

VIAN, A.L. et al. Uso de imagens digitais e sensor de vegetação para estimativa do potencial produtivo e estado nutricional em milho. **Congresso Brasileiro de agricultura de Precisão**. Set, 2014. Disponível em: <<http://conbap.sbea.org.br/2014/trabalhos/R0031-2.PDF>>. Acesso em: 02 jun. 2018.

WREGGE, M. S. et al. **Atlas Climático da Região Sul do Brasil - Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. [s.l.: s.n.]. v. 53, 2011.

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. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11119-013-9326-5>>. Acesso em: 06 jan. 2021.

YAN, Y. et al. MiR444a has multiple functions in the rice nitrate-signaling pathway. **Plant Journal**, [s. l.], v. 78, n. 1, p. 44-55, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/tpj.12446>>. Acesso em: 06 jan. 2021.

YUAN, Z. et al. Indicators for diagnosing nitrogen status of rice based on chlorophyllmeter readings. **Field Crops Research**, v. 185, p. 12-20, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429015300630>>. Acesso em 02 jun. 2018.

Zhang, C.; Kovacs, J.M. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review. *Precis. Agric.* 2012, 13, 693–712.

7. ARTIGO II - DESEMPENHO AGRONÔMICO DE ARROZ IRRIGADO SOB DOSES DE NITROGÊNIO BASEADO EM PRESCRIÇÃO DA FERTILIZAÇÃO PELA ESTRATÉGIA DE FAIXA RICA

Cleiton Jose Ramão¹, Telmo Jorge Carneiro Amado², Lucio de Paula Amaral², Luiz Felipe Diaz de Carvalho², Deise Dalazen Castagnara³, Paulo Régis Ferreira da Silva⁴, Antônio Arns⁵

¹ Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA), Uruguaiiana – RS, Brasil: cramao@gmail.com

² Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria – RS, Brasil.

³ Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), Uruguaiiana – RS, Brasil.

⁴ Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre – RS, Brasil.

⁵ Empresa ArnsTronic, VANTs e Análise de Dados, Uruguaiiana – RS, Brasil.

Resumo

A adubação nitrogenada é uma forma de aumentar a produtividade da cultura do arroz irrigado, através de diferentes estratégias de adubação, compreendendo principalmente a fase inicial da cultura até o início do período reprodutivo. Ao ser preconizado doses altas de Nitrogênio (N), é verificado a necessidade de se obter auxílio de tecnologias de agricultura de precisão. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a produtividade de arroz irrigado, submetido a diferentes doses de nitrogênio em cobertura aplicado em V2/V3 e estágio R1, baseado em prescrição de fertilização pela estratégia de faixa rica. O experimento foi conduzido sobre o delineamento de blocos casualizados, dispostos em parcelas divididas, com oito repetições. Nas faixas principais foram alocadas as quatro doses de nitrogênio (0, 69, 138 e 207 kg ha⁻¹), aplicadas no estágio V2/V3, e em subparcelas aplicação complementar de 37 kg ha⁻¹ de N no estágio R1. Os tratamentos tiveram como critério, a representatividade de manejo para baixa, média e alta resposta da cultura a adubação nitrogenada. Nas duas safras agrícolas, a cultivar IRGA 424RI demonstrou estabilidade produtiva, resposta positiva a doses de adubação nitrogenada, com acréscimo médio de 16 kg ha⁻¹ de arroz por kg de N aplicado, independentemente da estratégia utilizada de adubação. Houve correlação positiva da produtividade com o número de panículas por área, tanto na adubação em pré-irrigação como na adubação de pré-irrigação + cobertura de 37 kg ha⁻¹ de N no estágio R1. A utilização de alta adubação de N (Faixa Rica), é uma forma de manejo que pode ser implementada pelo produtor, a fim de extrair o máximo potencial produtivo da lavoura, de forma simples e operacional, independentemente de tamanho e tecnologia empregada na propriedade.

Palavras-chave: *Oryza sativa* L., Irrigação, Agricultura de Precisão, Produtividade

Abstract

Nitrogen fertilization is a way to increase the productivity of the irrigated rice crop, through different fertilization strategies, comprising mainly the initial phase of the culture until the beginning of the reproductive period. When high doses of Nitrogen (N) are recommended, the need to obtain assistance from precision agriculture technologies is verified. Thus, the objective of this work was to evaluate the productivity of irrigated rice, submitted to different doses of nitrogen in coverage applied in V2/V3 and R1 stage, based on fertilization prescription by the rich strip strategy. The experiment was carried out using a randomized block design, arranged in split plots, with eight replications. The four doses of nitrogen (0, 69, 138 and 207 kg ha⁻¹) were allocated in the main strips, applied in the V2/V3 stage, and in subplots a complementary application of 37 kg ha⁻¹ of N in the R1 stage. The treatments had as a criterion, the representativeness of management for low, medium and high response of the crop to nitrogen fertilization. In the two agricultural seasons, the cultivar IRGA 424RI showed productive stability, positive response to nitrogen fertilization doses, with an average increase of 16 kg ha⁻¹ of rice per kg of N applied, regardless of the fertilization strategy used. There was a positive correlation between productivity and the number of panicles per area, both in pre-irrigation fertilization and in pre-irrigation fertilization + coverage of 37 kg ha⁻¹ of N at the R1 stage. The use of high N fertilization (Faixa Rica) is a form of management that can be implemented by the producer, in order to extract the maximum productive potential of the crop, in a simple and operational way, regardless of size and technology used in the property.

Keywords: *Oryza sativa* L., Irrigation, Precision Agriculture, Productivity

7.1. Introdução

De acordo com a FAO (2018), a demanda por alimentos ricos em nutrientes deve aumentar em 40% a 50% nos próximos 50 anos. Destaca-se o arroz, um dos cereais mais consumidos no mundo como fonte calórica. Aliado a isso, está a versatilidade de cultivos, tornando o arroz uma cultura estratégica em nível econômico e social, principalmente em países em desenvolvimento, quanto à segurança alimentar (WANG et al., 2020).

O Brasil destaca-se na América do Sul, como um dos principais países produtores, seguido do Uruguai, da Argentina e do Paraguai. Na safra 2020/21, a produção brasileira foi de 11,63 milhões de toneladas, cultivadas em uma área de 1,68 milhões de ha, com uma produtividade média de 6,90 toneladas por hectare (CONAB, 2021). Na região Sul do Brasil

predomina o cultivo de arroz irrigado, enquanto nas regiões Centro-Oeste e Norte é o cultivo do arroz em sequeiro.

A cultura do arroz é responsável por importante parcela do PIB nos municípios da metade sul do estado do Rio Grande do Sul (RS). Na safra 2020/21, o RS produziu 8.277,5 mil toneladas (aumento de 5,2% em comparação a 2019/20) em uma área semeada de 946 mil hectares (CONAB, 2021). A época de semeadura, as cultivares, a adubação de nitrogênio e de outros nutrientes na quantidade demandada, associada à irrigação com lâmina uniforme, estão entre os fatores que determinam a produtividade da cultura do arroz (SARTORI et al., 2013).

No que se refere à adubação, fertilizantes químicos são cruciais para altas produtividades (FAO, 2018), pois são utilizados no suprimento de nutrientes do solo sob cultivo intensivo das cultivares modernas de arroz (SARKAR et al., 2016). Cultivares modernas de arroz respondem a doses mais elevadas de fertilizantes, uma vez que possuem maior potencial produtivo que as antigas, de porte alto. Assim, cresce o interesse por novas estratégias tecnológicas (NAHER et al., 2019), que proporcionem explorar o potencial produtivo das cultivares modernas de arroz, sem comprometer o ambiente.

O macronutriente nitrogênio (N), geralmente, é o que proporciona maior incremento em produtividade em arroz. O ajuste da fertilização nitrogenada de acordo com a demanda da cultura do arroz, que, por sua vez, está associada ao potencial produtivo, é importante do ponto de vista econômico, ambiental e de sustentabilidade. As perdas de N são influenciadas pelas condições meteorológicas e manejo durante a safra, onde as perdas por lixiviação e volatilização podem superar os 20% da dose aplicada (SCIVITTARO et al., 2010), podendo atingir perdas próximas a 60% (CANTARELLA, 2007). A nível mundial, a eficiência do uso de N no arroz irrigado é inferior a 50%, onde o uso de taxa adequada e momento de aplicação, aliada a genótipos eficientes, mostraram uma melhoria significativa em recuperação de N aplicado (FAGERIA; BALIGAR, 2003).

As recomendações de adubação nitrogenada em arroz irrigado para o Sul do Brasil, são baseadas pelo teor de matéria orgânica e expectativa de resposta da cultura, chegando a 150 kg ha⁻¹ de N (SOSBAI, 2018). Quanto ao parcelamento do N, durante o ciclo da cultura, não obteve resultado em produtividade, quando comparado há uma única aplicação em pré-irrigação (ANGHINONI et al., 2019).

A produtividade de grãos e a capacidade de resposta do N, são fatores independentes e ambos impactam na demanda de N local, onde o uso de ambas as constatações podem auxiliar nas fertilizações precisas (ARNALL et al., 2013). A utilização de adubação variada ao longo do talhão e ao longo da safra, com auxílio de uma faixa de adubação ótima para a cultura “Faixa

Rica”, utilizada como referência de decisão de manejo nitrogenado, potencializa o manejo de alta eficiência.

A utilização de tecnologias de manejo que permitam o produtor obter informações do adequado estado nutricional das plantas de uma lavoura, oferece uma importante ferramenta para aumentar a eficiência da fertilização nitrogenada, estabelecendo prioridades de talhões, contribuindo para a conservação do meio ambiente e para a melhoria da qualidade dos produtos, resultando em aumento da competitividade do agronegócio.

Assim, o objetivo deste trabalho é avaliar a produtividade de arroz irrigado, submetido a diferentes doses de nitrogênio em cobertura aplicado em V2/V3 e estágio R1, baseado em prescrição de fertilização pela estratégia de faixa rica.

7.2. Material e Métodos

O estudo foi conduzido durante duas safras agrícolas, em 2018/19 (Uruguaiana-RS) e 2019/20 (Barra do Quaraí-RS), em duas áreas comerciais de arroz irrigado. (Figura 01). As áreas experimentais foram selecionadas por possuírem características de solo, relevo e clima que representam a região arroseira da Fronteira Oeste do estado do RS.

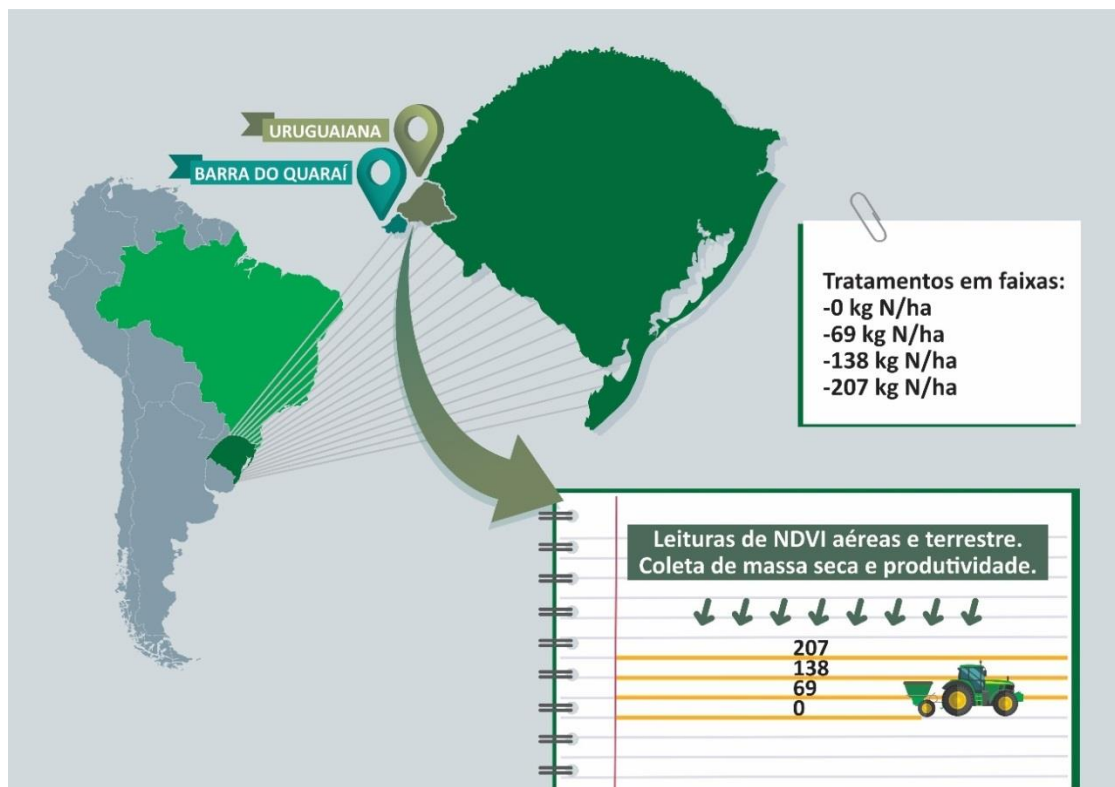


Figura 01. Representação esquemática do desenho experimental e da localização do experimento nos municípios de Uruguaiana e Barra do Quaraí-RS.

Cada área produtiva possuía, aproximadamente, 20 ha, dentro dos quais foram demarcados 5 ha para servir como área experimental. Por ocasião, também foi realizada a malha de amostragem de solos de um hectare em toda área, visando conhecer a variabilidade espacial de fertilidade e para a alocação do experimento em área homogênea. Os atributos químicos do solo das duas áreas experimentais encontram-se descritos na Tabela 01. Os teores de matéria orgânica e de fósforo (P), o pH e a saturação de bases estavam em níveis baixos, representando grande parte da lavoura arroseira do estado do RS.

Tabela 01. Atributos químicos do solo antes da instalação dos experimentos, nos municípios de Uruguaiana e Barra do Quaraí.

Safra	Município	Argila	MO	pH	Ca ⁺²	Mg ⁺²	CTC	P	K	Sat. Bases	Sat. Al ⁺³
		(%)		(H ₂ O)	----- (mg dm ⁻³)-----					----- (%) -----	
2018/19	Uruguaiana	25	0.9	5.2	6.6	1.4	14.4	2.4	43.3	56.9	2.5
2019/20	Barra do Quaraí	17	0.9	4.8	3.4	0.9	9.2	9.6	50.7	49.3	12.5

MO – matéria orgânica; Al – alumínio; P – fósforo; K - potássio; Mg – magnésio; CTC – capacidade de troca de cátions; Sat. Bases – saturação por bases; Sat. Al⁺³ – saturação por alumínio.

De um modo geral, as áreas experimentais possuem o relevo suave, com predominância de solos franco argiloso, mal drenados e pouco profundos. De acordo com a Embrapa (2013), o solo das áreas experimentais classifica-se como Chernossolo Ebânico, com horizonte B textural, apresentando alta pegajosidade e plasticidade. Segundo a classificação climática de Köppen, o clima do local é do tipo Cfa, subtropical, sem estação seca definida (WREGE et al., 2011).

A precipitação e a radiação solar (Figuras 02 e 03) mensal durante o período experimental, nas duas safras, foram monitoradas pela estação meteorológica localizada em Uruguaiana, do Instituto Nacional Meteorologia (INMET).

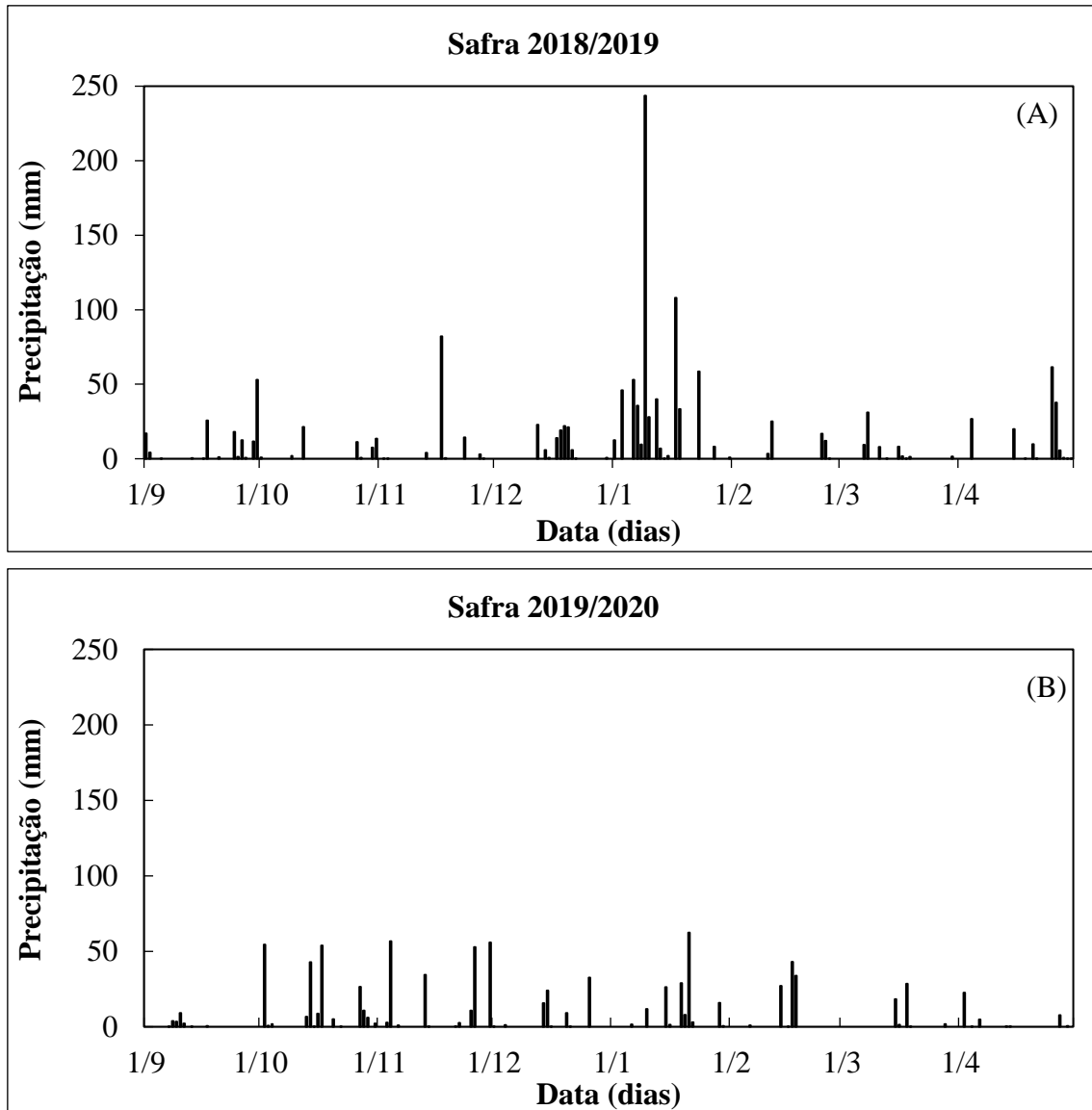


Figura 02. Precipitação diária (mm), de (A) 01 de setembro de 2018 a 30 de abril de 2019 e (B) 01 de setembro de 2019 a 30 de abril de 2020, para o município de Uruguaiana-RS. Fonte de dados: INMET.

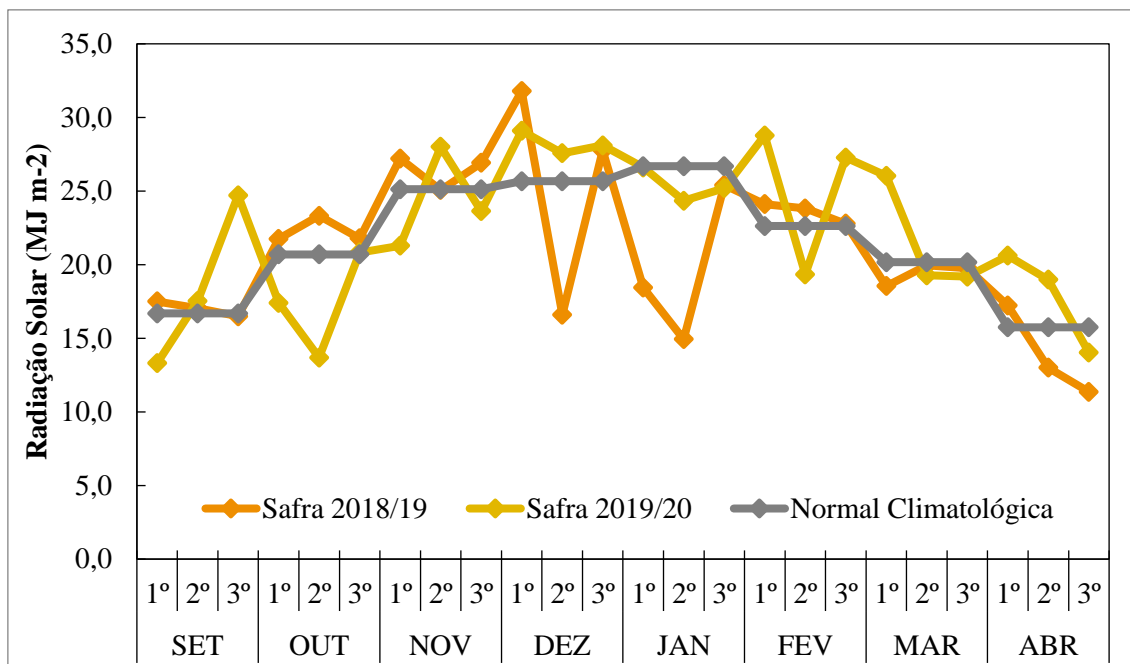


Figura 03. Radiação solar decenal ocorrida nas safras 2018/19 (linha laranja) e 2019/20 (linha amarela) e a Normal Climatológica (linha cinza) para os meses de setembro a abril, para o município de Uruguaiana-RS. Fonte de dados: INMET.

O experimento foi conduzido sobre o delineamento de blocos casualizados, dispostos em parcelas divididas, com oito repetições. Nas faixas principais foram alocadas as quatro doses de nitrogênio (0, 69, 138 e 207 kg ha⁻¹), aplicadas no estágio V2/V3, conforme escala de Counce et al. (2000), no seco, um dia antes do início da irrigação. Os tratamentos tiveram como critério, a representatividade de manejo para baixa, média e alta resposta da cultura a adubação nitrogenada.

Nas subparcelas fez-se a aplicação complementar da dose de 37 kg ha⁻¹ de N no estágio R1, ou seja, na diferenciação da panícula. A fonte de N foi a ureia (46-00-00), distribuída manualmente, em subparcelas de 1,50 m de largura x 20 m de comprimento dentro das faixas principais.

A semeadura foi realizada dia 15 de setembro de 2018 e 25 de setembro de 2019, utilizando a cultivar de ciclo médio IRGA 424 RI, com densidade de 90 kg ha⁻¹ de sementes. A semeadura seguiu procedimentos adotados na área comercial sendo que, posteriormente ao estabelecimento da cultura, procedeu-se a demarcação das áreas experimentais.

Como adubação de base adotou-se a recomendação de acordo com a análise de solo para atingir qual expectativa de produtividade de grãos, sendo o P aplicado na linha de semeadura e o K distribuído a lanço, concomitantemente à semeadura do arroz. Como adubação de base utilizou-se 70 kg ha⁻¹ de P e 110 kg ha⁻¹ de K.

O início da irrigação se deu quando as plantas de arroz atingiram o estágio V2/V3, ou seja, as plantas estavam com duas a três folhas completamente expandidas, de acordo com a escala de Counce et al. (2002). Após o estabelecimento da lâmina de água no interior do talhão, mantendo-se constante durante todo o ciclo da cultura, com um período total em torno de 100 dias de irrigação de forma permanente. A supressão da irrigação foi realizada aos 15 dias antes da colheita.

A aplicação das doses de fertilizante nitrogenado foi realizada com um conjunto trator-distribuidor, equipado com piloto automático e GPS, o qual tracionava um distribuidor a lança Hércules 10000®.

No estágio R1 procedeu-se a amostragem da biomassa da parte aérea das plantas de arroz, em cada unidade experimental, para a estimativa da produtividade de massa seca. Cada amostragem compreendeu uma área útil da subparcela de 0.25 m² (03 linhas de semeadura x 0,5 m de comprimento). Nesta área, toda a biomassa de plantas de arroz existentes acima do nível do solo foi colhida manualmente e identificada. Após a coleta, as amostras foram embaladas em sacos de papel identificados e submetidas à secagem em estufa, com circulação forçada de ar sob temperatura de 65°C, até atingirem peso constante. Finalizada a secagem, as amostras foram pesadas em balança analítica de precisão, com posterior correção da massa seca. Em área adjacente ao ponto amostral para determinação da biomassa das plantas de arroz, procedeu-se a contagem do número total de colmos viáveis (panículas formadas) no estágio fenológico R9. Para tal, em 3 m lineares todos os colmos foram manualmente contados a fim de obter o número de panículas por unidade de área. No mesmo ponto de contagem, foram coletadas cinco panículas para determinação do percentual de esterilidade de espiguetas. Para tal, procedeu-se a contagem dos números totais de grãos cheios e vazios das panículas coletadas.

A coleta das amostras para estimar a produtividade de grãos do arroz e os componentes de rendimento foi realizada quando as plantas atingiram o estágio R9, ou seja, massa de grãos com umidade entre 24 - 20% (SOSBAI, 2018). Foi colhido de forma manual, oito repetições (parcela) de cada tratamento, onde cada área amostral teve 4 m de comprimento por sete linhas de arroz de largura, totalizando 4,76 m², para estimar-se a produtividade de grãos. A determinação dos componentes de rendimento foi realizada através da contagem do número de panículas/m², número de grãos/panícula e peso de 1000 grãos. Foram coletadas cinco panículas para as determinações do número de grãos por panícula e do peso de 1000 grãos.

Conhecidas as produtividades para cada dose de N aplicado em cobertura, foram ajustadas as curvas de resposta de produtividade de arroz. Para cada cultivar foi determinada a

dose de máxima eficiência técnica (MET) de N em cobertura. A MET é definida como a dose de N em cobertura que resulta em máximo rendimento de grãos, através da Equação 1:

$$Y = \frac{-b}{2a} \quad (1)$$

onde:

Y = dose de nitrogênio aplicado (kg ha⁻¹)

a = coeficiente da equação

b = coeficiente da equação

As variáveis analisadas foram submetidas à análise de variância pelo teste Tukey, ao nível de 5% de probabilidade, quando constatada a significância. Os efeitos das doses de nitrogênio foram estudados por meio de análise de regressão, testando-se os modelos linear e quadrático. Na análise de correlação entre as variáveis, aplicou-se a correlação linear de Pearson ($p < 0,05$).

7.3. Resultados e Discussão

A produtividade de grãos de arroz está relacionada com o comportamento dos componentes de rendimento da cultura, onde estes são influenciados pelas condições meteorológicas, genética e manejo adotado durante a safra agrícola. A disponibilidade de N às plantas e sua relação com o aumento dos componentes de rendimento é um dos fatores que mais influencia a produtividade de grãos (FAGERIA & STONE, 2003). Os componentes de rendimento da cultivar de arroz IRGA 424 RI, nas safras 2018/19 e 2019/20 são apresentados na Tabela 02.

Tabela 02: Componentes do rendimento (número de panículas, número de grãos por panícula, peso de mil grãos), porcentagem de grãos inteiros e estatura de planta de arroz irrigado, Cv. IRGA 424 RI, em função da adubação nitrogenada em cobertura, aplicada um dia antes da entrada da água em Uruguaiana e Barra do Quaraí em duas safras.

	Tratamentos (kg N ha ⁻¹)			
	0	69	138	207
Safra 2018/19				
Panículas (m ²)	533b	564b	668a	649a
Grãos Panícula	71b	68c	73b	83a
Esterilidade (%)	14a	11b	10b	11b
Peso de mil grãos (g)	25a	25a	25a	24b
Grão inteiro (%)	64a	63ab	64ab	62b
Estatura de planta (cm)	83b	84b	86b	94a
Safra 2019/20				
Panículas (m ²)	484c	595b	716a	772a
Grãos Panícula	60b	68b	73ab	83a
Esterilidade (%)	15a	12b	11b	12b
Peso de mil grãos (g)	24bc	26ab	26a	24c
Grão inteiro (%)	65b	67a	67ab	66ab
Estatura de planta (cm)	68b	79a	80a	84a

Médias comparadas na linha pelo teste de Tukey, ao nível de significância de 5%.

Ambas as safras tiveram comportamento distinto em cada dose de N aplicada. Para 2018/19, se obteve o maior número de panícula por área, em torno de 21%, além de uma menor esterilidade das espiguetas. Vale ressaltar que os componentes de rendimento, número de panículas, número de grão por panícula são os principais componentes de rendimento para atingir altas produtividades. A referida safra diferiu estatisticamente nos componentes de grão por panícula, peso de mil grãos, grão inteiro e altura de planta.

Por outro lado, a safra 2019/20, o número de panículas foi 60% superior ao da testemunha sem N. Outro comportamento observado foi o número de grãos por panícula, com aumento de 38% e uma esterilidade estável, não diferindo entre os tratamentos que receberam adubação. Já para grãos inteiros e estatura de planta, houve resposta significativa ao aumento de N aplicado. Salienta-se que em ambas as safras, as produtividades ultrapassaram as 10,6 Ton ha⁻¹, valor esse alcançado com número de panículas.m² acima de 650 e 83 grãos por panícula.

As correlações existentes entre os principais componentes da planta geram um conjunto de informações dos fatores mais importantes na produtividade da cultura. O principal componente de rendimento de grãos para a cultura do arroz é o número de panículas/m² (MARIOT et al., 2003). As doses de N aplicadas demonstraram resposta em produtividade, números de panícula por área, grão por panícula, peso de mil grãos, grão inteiro e esterilidade durante as safras 2018/19 e 2019/20. A correlação entre a produtividade de grãos e os

componentes de rendimento citados acima, e sua relação com adubação de N em pré-irrigação e pré-irrigação + cobertura, são apresentados na Tabela 03.

Tabela 03: Correlação da produtividade com números de panícula por metro quadrado e de grãos por panícula, peso de mil grãos, porcentagem de grão inteiro e esterilidade de grão em Uruguiana (2018/19) e em Barra do Quaraí (2019/20).

	Produtividade	Panícula m ⁻²	Grãos panícula ⁻¹	Peso de mil grãos	Grão inteiro	Esterilidade de grão
Safr 2018/19	Pré-irrigação	0,65**	0,30	-0,13	-0,35*	-0,86**
	Pré-irrigação + 37	0,48**	0,60**	-0,34	-0,27	-0,38*
Safr 2019/20	Pré-irrigação	0,81**	0,57**	0,16	0,36*	-0,45*
	Pré-irrigação + 37	0,84**	0,56**	0,18	0,78**	-0,52**

*correlação é significativa ao nível de 5%, **correlação é significativa ao nível de 1%.

A safra 2018/19 apresentou correlação positiva da produtividade com o número de panículas por área, em ambas as situações de fertilização, adubação em pré-irrigação e adubação de pré-irrigação + cobertura de 37 kg N⁻¹ em estádio R₁. Ainda, a produtividade de grãos apresentou correlação com o número de grão por panícula nos tratamentos com adubação em cobertura + 37 kg N ha⁻¹. Na safra 2019/20, também apresentou correlação positiva na relação da produtividade com o número de panícula por área, número de grãos por panícula e grão inteiro, em ambos os manejos de adubação nitrogenada, demonstrando a importância de se ter uma adubação complementar no início do estádio reprodutivo.

A produtividade de grãos de arroz aumentou de forma quadrática com o incremento da dose de N aplicado na pré-irrigação, com e sem a aplicação de 37 kg ha⁻¹ no estádio R₁. Os resultados obtidos safra 2018/20, a adubação de cobertura em pré-irrigação e adubação de pré-irrigação + cobertura de 37 kg N⁻¹, mostraram resposta positiva em ambas as estratégias (figura 04). Essa cultivar, quando utilizado apenas a adubação em pré-irrigação teve seu máximo potencial produtivo com 159 kg N ha⁻¹, ao utilizar um incremento em adubação, atingiu-se o teto com a estratégia de 132+37 kg N ha⁻¹, potencializando um ganho de 365 kg de arroz por hectare.

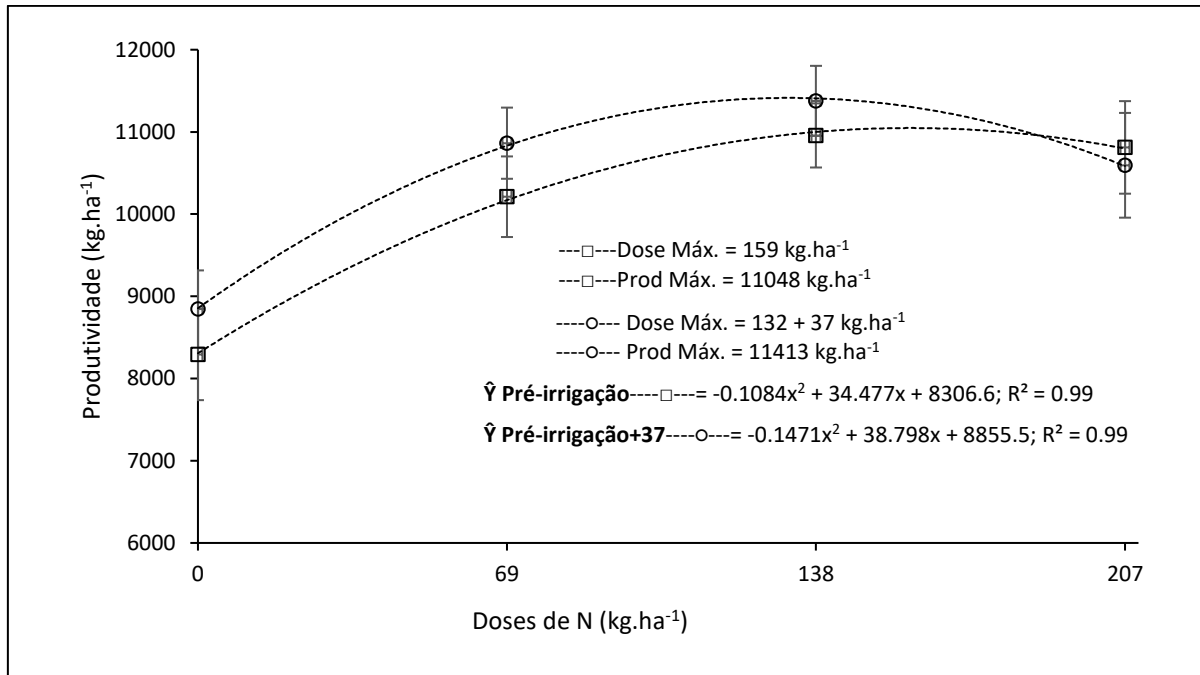


Figura 04: Produtividade de grãos de arroz irrigado, CV. IRGA 424 RI, em função de doses de nitrogênio em cobertura aplicadas um dia antes da entrada da água na lavoura, e com e sem a aplicação de 37 kg ha⁻¹ de N no estágio R1 na safra 2018/19.

Dessa forma, a relação entre produtividade e nitrogênio aplicado em ambas as estratégias usadas, demonstram ganho de 17 kg e 15 kg ha⁻¹ de arroz para cada kg de N aplicado em pré-irrigação e pré-irrigação + cobertura de 37 kg N⁻¹.

Na safra 2019/20, em Barra do Quaraí, a produtividade de grãos aumentou de forma linear com o incremento da dose de N aplicada em na pré-irrigação, com e sem a aplicação da dose complementar de 37 kg ha⁻¹ de N no estágio R1.(Figura 05). Em todas as doses de N aplicadas na pré-irrigação, a aplicação da dose de 37 kg ha⁻¹ de N no estágio R1 resultou em aumento da produtividade em relação à sua não aplicação.

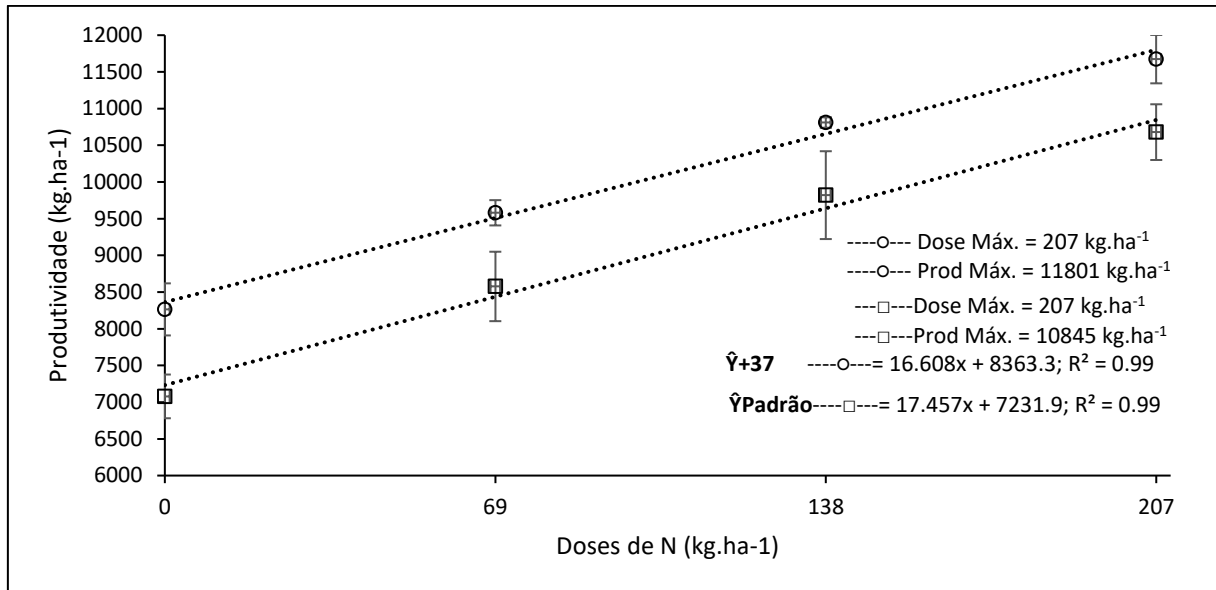


Figura 05: Produtividade de grãos de arroz irrigado, CV. IRGA 424 RI, em função de doses de nitrogênio em cobertura aplicadas um dia antes da entrada da água na lavoura, e com e sem a aplicação de 37 kg ha⁻¹ de N no estágio R1 na safra 2019/20.

A cultivar IRGA 424 RI atingiu a maior produtividade na dose 207 e 207 + 37 kg N ha⁻¹, o que corresponde a 10.845 kg ha⁻¹ na adubação em pré-irrigação, já na estratégia com adubação pré-irrigação + 37 kg, a resposta foi de 11.801 kg N ha⁻¹, ocorrendo um acréscimo de 956 kg de arroz na dose maior. A relação entre produtividade e nitrogênio aplicado em ambas as estratégias usadas, demonstram ganho de 17 kg e 16 kg ha⁻¹ de arroz para cada kg de N aplicado em pré-irrigação e pré-irrigação + cobertura de 37 kg N⁻¹, respectivamente. Onde a recomendação para doses acima de 100 kg de N ha⁻¹ objetiva fornecer a maior proporção na primeira cobertura (V₃/V₄), de modo que a segunda cobertura (R1) receba, aproximadamente, 40 kg de N ha⁻¹ (SOSBAI, 2018).

Tais diferenças observadas nas produtividades entre as safras e entre estratégias de adubação podem ter sido potencializadas pelo elevado número de dias com chuva no mês de janeiro de 2020, o que acarreta numa menor radiação solar, coincidindo com período de maior demanda pela planta, na fase reprodutiva. Porém, os dados demonstram estabilidade produtiva, resposta positiva à elevada adubação nitrogenada, independentemente da estratégia utilizada de adubação para a cultivar IRGA 424RI. A aplicação de doses de N baseadas na expectativa de resposta aos níveis de manejo adotado, pode ser utilizado como referência de faixa rica, para tomada de decisão. Porém, a falta de sincronismo entre a época de aplicação de N e a época de maior demanda da planta tem propiciado baixa eficiência de uso dos fertilizantes nitrogenados pelas culturas (SANTOS et al., 2015).

7.4. Conclusão

Nas duas safras agrícolas, a cultivar IRGA 424RI demonstrou estabilidade produtiva, resposta positiva a doses de adubação nitrogenada, com acréscimo médio de 16 kg ha⁻¹ de arroz por kg de N aplicado, independentemente da estratégia utilizada de adubação.

Houve correlação positiva da produtividade com o número de panículas por área, tanto na adubação em pré-irrigação como na adubação de pré-irrigação + cobertura de 37 kg ha⁻¹ de N no estágio R1.

A utilização de alta adubação de N, (Faixa Rica) é uma forma de manejo que pode ser implementada pelo produtor, a fim de extrair o máximo potencial produtivo de sua lavoura, de forma simples e operacional, independentemente de tamanho e tecnologia empregada na propriedade.

7.5. Referências Bibliográficas

- ARNALL, D. B. et al. Relationship between grain crop yield potential and nitrogen response. **Agronomy Journal**, v. 105, n. 5, p. 1335-1344, 2013.
- CONAB, 2021. **Levantamento de safras**. Disponível em <<https://www.conab.gov.br/>>. Acesso em: 16 fev. 2021.
- COUNCE, P. A.; KEISLING, T. C.; MITCHELL, A. J. A uniform, objectives, and adaptive system for expressing rice development. **Crop Science**, [s. l.], v. 40, n. 2, p. 436-443, 2000. Disponível em: <<https://doi.org/10.2135/cropsci2000.402436x>>. Acesso em: 16 fev. 2021.
- CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. cap. 7, p. 375-470.
- FAGERIA, N.K.; STONE, L.F. Manejo do Nitrogênio. In: FAGERIA, N.K.; STONE, L.F.; SANTOS, A.B. dos. **Manejo da Fertilidade Solo para o Arroz Irrigado**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2003, p.51-94.
- EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa, 3ed., 2013. 353 p.
- FAO. Hunger Portal. United Nations Food and Agriculture Organization, 2018. **Trends current**. Disponível em: <<http://www.fao.org/hunger/en/>>. Acesso em: 06 jun. 2020.
- FAGERIA, N. K. & BALIGAR, V. C. Methodology for evaluation of lowland rice genotypes for nitrogen use efficiency. **Journal of Plant Nutrition**, 26:6, 1315-1333, 2003. DOI: 10.1081/PLN-120020373
- MARIOT, C.H.P.; SILVA, P.R.F.; MENEZES, V.G.; TEICHMANN, L.L. Resposta de duas cultivares de arroz irrigado à densidade de semeadura e à adubação nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 2, p. 233-241, fev. 2003.
- NAHER, U. A. et al. **Fertilizer management strategies for sustainable rice production**. [s.l.] : Elsevier Inc., 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-813272-2.00009-4>. Acesso em: 16 dez. 2020.
- SANTOS, T. G.; SILVA, E. D. L.; DA SILVA, M. A. S.; DOS SANTOS, A. B. **Produtividade do arroz irrigado afetada pela fonte e pela dose de nitrogênio baseada no índice de suficiência de nitrogênio**. In: Embrapa Arroz e Feijão-Resumo em anais de congresso (ALICE). In: SEMINÁRIO JOVENS TALENTOS, Santo Antônio de Goiás. Coletânea dos resumos apresentados. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2015.
- SARKAR U. M. I. et al. Soil Test Based Inorganic Fertilizer and Integrated Plant Nutrition System for Rice (*Oryza sativa* L.) Cultivation in Inceptisols of Bangladesh. **The Agriculturists**, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 33-42, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.3329/agric.v14i1.29098>>. Acesso em: 25 nov. 2020.
- SARTORI, G. M. I. et al. Rendimento de grãos e eficiência no uso de água de arroz irrigado em função da época de semeadura. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 3, p. 397-403, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0103-84782013000300004>>. Acesso em: 25 nov. 2020.

SCIVITTARO, W. B. et al. Perdas de nitrogênio por volatilização de amônia e resposta do arroz irrigado à aplicação de ureia tratada com o inibidor de urease NBPT. **Revista Ciência Rural**, v.40, n.6, p.1283-1289, jun, 2010.

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

WANG, Y. et al. Development of a model using the nitrogen nutrition index to estimate in-season rice nitrogen requirement. **Field Crops Research**, v. 245, n. 107664, 2020 Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429019300802>>. Acesso em: 04 jan. 2021.

WREGGE, M. S. et al. **Atlas Climático da Região Sul do Brasil - Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. [s.l: s.n.]. v. 53, 2011.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho realizado demonstrou que a adubação nitrogenada é uma forma de aumentar a produtividade da cultura do arroz irrigado, através de diferentes estratégias de adubação, compreendendo principalmente a fase inicial da cultura até o início do período reprodutivo. Ao ser preconizado doses altas de Nitrogênio (N), foi verificado a necessidade de se obter auxílio de tecnologias de agricultura de precisão. Dentre as possibilidades operacionais em escala comercial a utilização de faixa rica é uma forma de manejo que pode ser implementada pelo produtor, a fim de extrair o máximo potencial produtivo de sua lavoura, independente de tamanho da propriedade.

Para a realização e monitoramento efetivo em “estádios chave” da cultura do arroz irrigado, durante a safra em andamento, a utilização de sensores como GreenSeeker e Mapir foram sensíveis ao acréscimo de N em cobertura, possibilitando a adoção de medidas corretivas, visando atingir altas produtividades. Assim, os incrementos dos valores de NDVI foram acompanhados pelo aumento de produtividade, porém cada plataforma possui comportamento específico para cada safra.

Todavia, estudos futuros devem ser realizados a fim de difundir a tecnologia de sensoriamento remoto através de ARP em arroz irrigado; explorar outros índices de vegetação em estádios mais avançados da cultura; explorar adubação nitrogenada em estádios mais avançados da cultura, como em R₂ (emborrachamento); criar equações que possibilitem a relação de índice de vegetação como preditor de produtividade e determinar índices de suficiência de nitrogênio para a metade Sul do RS.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS GERAL

BACENETTI, J. et al. May smart technologies reduce the environmental impact of nitrogen fertilization. A case study for paddy rice. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 715, p. 136956, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136956>>

BAGHERI, N. et al. Multispectral remote sensing for site-specific nitrogen fertilizer management. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s. l.], v. 48, n. 10, p. 1394–1401, 2013.

BARBOSA, J. Z. et al. Uso de imagens digitais obtidas com câmeras para analisar plantas Use of digital images taken with camera for plant analysis. **Revista de Ciências Agrárias**, [s. l.], v. 39, n. 1, p. 15-24, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.19084/RCA15006>>. Acesso em: 20 fev. 2021.

BASTOS, M. A. **Índices de vegetação para o mapeamento de lavouras de arroz irrigado na bacia do rio gravataí no estado do rio grande do sul**. 2014. [s. l.], 2014.

BERGER, K. et al. Crop nitrogen monitoring: Recent progress and principal developments in the context of imaging spectroscopy missions. **Remote Sensing of Environment**, [s. l.], v. 242, n. March, p. 111758, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111758>

BOSCHETTI, M. et al. PhenoRice: A method for automatic extraction of spatio-temporal information on rice crops using satellite data time series. **Remote Sensing of Environment**, [s. l.], v. 194, p. 347–365, 2017.

CAO, Q. et al. Active canopy sensing of winter wheat nitrogen status: An evaluation of two sensor systems. **Computers and Electronics in Agriculture**, [s. l.], v. 112, p. 54–67, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2014.08.012>>.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. cap. 7, p. 375-470.

COLOMINA, I.; MOLINA, P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, [s. l.], v. 92, p. 79–97, 2014.

CONAB, 2022. **Levantamento de safras**. Disponível em <<https://www.conab.gov.br/>>. Acesso em: 16 ago. 2022.

COUNCE, P. A.; KEISLING, T. C.; MITCHELL, A. J. A uniform, objectives, and adaptive system for expressing rice development. **Crop Science**, [s. l.], v. 40, n. 2, p. 436-443, 2000. Disponível em: <<https://doi.org/10.2135/cropsci2000.402436x>>. Acesso em: 16 fev. 2021.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa, 3ed., 2013. 353 p.

FAO. Hunger Portal. United Nations Food and Agriculture Organization, 2018. **Trends current**. Disponível em: <<http://www.fao.org/hunger/en/>>. Acesso em: 06 jun. 2020.

FAGERIA, N. K. & BALIGAR, V. C. Methodology for evaluation of lowland rice genotypes for nitrogen use efficiency. **Journal of Plant Nutrition**, 26:6, 1315-1333, 2003. DOI: 10.1081/PLN-120020373

- FU, Y. et al. Progress of hyperspectral data processing and modelling for cereal crop nitrogen monitoring. **Computers and Electronics in Agriculture**, [s. l.], v. 172, n. September 2019, p. 105321, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105321>>
- GUAN, X. D. et al. Mapping rice cropping systems in Vietnam using an NDVI-based time-series similarity measurement based on DTW distance. **Remote Sensing**, [s. l.], v. 1, n. 19, 2016. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2072-4292/8/1/19>>. Acesso em: 16 fev. 2021.
- GUPTA, B. K. et al. Manipulation of glyoxalase pathway confers tolerance to multiple stresses in rice. **Plant Cell and Environment**, [s. l.], v. 41, n. 5, p. 1186-1200, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/pce.12968>>. Acesso em: 16 fev. 2021.
- HUANG, Y. et al. BESS-Rice: A remote sensing derived and biophysical process-based rice productivity simulation model. **Agricultural and Forest Meteorology**, [s. l.], v. 256-257, n. November 2017, p. 253-269, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.03.014>>. Acesso em: 16 fev. 2021.
- IRGA, 2021. Instituto Rio Grandense do Arroz. **Serviços e Informações**. Disponível em <<https://irga.rs.gov.br/safras-2>>. Acesso em: 17 mai. 2020.
- KLERING, E. V. et al. Modelo agrometeorológico-espectral para estimativa da produtividade de grãos de arroz irrigado no Rio Grande do Sul. **Bragantia**, [s. l.], v. 75, n. 2, p. 247-256, 2016.
- LEMAIRE, G. . Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage. Theory and practices for crop N management. **European Journal of Agronomy**, [s. l.], v. 28, n. 4, p. 614-624, 2008.
- LIU, X. et al. Effect of continuous reduction of nitrogen application to a rice-wheat rotation system in the middle-lower Yangtze River region (2013-2015). **Field Crops Research**, [s. l.], v. 196, p. 348-356, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2016.07.003>> .
- MAIA, S. C. M. et al. Criteria for topdressing nitrogen application to common bean using chlorophyll meter. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s. l.], v. 52, n. 7, p. 512-520, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2017000700005>. Acesso em: 16 dez. 2020.
- MEHMOOD, M. Z. et al. Enhancing Water Use Efficiency and Productivity of Rice Crop Using Modern Farming Methods in Punjab, Pakistan, a Brief Review. **World Journal of Biology and Biotechnology**, [s. l.], v. 4, n. 3, p. 35, 2019. Disponível em: <[10.33865/wjb.004.03.0235](https://doi.org/10.33865/wjb.004.03.0235)>. Acesso em: 16 dez. 2020.
- MORAES, E. C. Fundamentos de Sensoriamento Remoto. São José dos Campos, INPE, 2002, 23p.
- NAHER, U. A. et al. **Fertilizer management strategies for sustainable rice production**. [s.l.] : Elsevier Inc., 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-813272-2.00009-4>. Acesso em: 16 dez. 2020.
- NUTINI, F. et al. An operational workflow to assess rice nutritional status based on satellite imagery and smartphone apps. **Computers and Electronics in Agriculture**, [s. l.], v. 154, n. May, p. 80-92, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.08.008>
- PEI, W. et al. Integrated sensor system for monitoring rice growth conditions based on unmanned ground vehicle system. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, [s. l.], v. 7, n. 2, p. 75-81, 2014.

- RAUN, W. R. et al. Optical sensor-based algorithm for crop nitrogen fertilization. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, n. 36, p. 2759-2781 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/00103620500303988>>. Acesso em: 05 dez. 2020.
- RISSINI, A. L. L.; KAWAKAMI, J.; GENÚ, A. M. Índice de vegetação por diferença normalizada e produtividade de cultivares de trigo submetidas a doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], v. 39, n. 6, p. 1703-1713, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/01000683rbc20140686>>. Acesso em: 04 dez. 2020.
- ROGOVSKA, N. et al. Development of field mobile soil nitrate sensor technology to facilitate precision fertilizer management. **Precision Agriculture**, [s. l.], v. 20, n. 1, p. 40–55, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11119-018-9579-0>>. Acesso em: 04 dez. 2020.
- ROUSE J. et al. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. **Third ERTS Symposium, NASA**, p.309-317, 1973. Disponível em: <<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19740022614.pdf>>. Acesso em: 04 dez. 2020.
- SABERIOON, M. M. et al. Assessment of rice leaf chlorophyll content using visible bands at different growth stages at both the leaf and canopy scale. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, [s. l.], v. 32, n. 1, p. 35-45, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2014.03.018>>. Acesso em: 25 nov. 2020.
- SARKAR U. M. I. et al. Soil Test Based Inorganic Fertilizer and Integrated Plant Nutrition System for Rice (*Oryza sativa* L.) Cultivation in Inceptisols of Bangladesh. **The Agriculturists**, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 33–42, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.3329/agric.v14i1.29098>>. Acesso em: 25 nov. 2020.
- SARTORI, G. M. I. et al. Rendimento de grãos e eficiência no uso de água de arroz irrigado em função da época de semeadura. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 3, p. 397-403, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0103-84782013000300004>>. Acesso em: 25 nov. 2020.
- SETIYONO, T. D. et al. Spatial rice yield estimation based on MODIS and Sentinel-1 SAR data and ORYZA crop growth model. **Remote Sensing**, [s. l.], v. 10, n. 2, p. 1–20, 2018.
- SHRESTHA, R. K., & LADHA, J. K. (1996). Genotypic Variation in Promotion of Rice Dinitrogen Fixation as Determined by Nitrogen-15 Dilution. **Soil Science Society of America Journal**, 60(6), 1815. Acesso em: 25 nov. 2020.
- SILVA, M. A. G. Da. et al. Monitoring and evaluation of need for nitrogen fertilizer topdressing for maize leaf chlorophyll readings and the relationship with grain yield. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, [s. l.], v. 54, n. 4, p. 665-674, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1516-89132011000400004>>. Acesso em: 25 nov. 2020.
- SCIVITTARO, W.; GOMES, A. **Adubação e Calagem para o Arroz Irrigado no Rio Grande do Sul**. Circular Técnica, n. 62. 2007.
- SCIVITTARO, W. B. et al. Perdas de nitrogênio por volatilização de amônia e resposta do arroz irrigado à aplicação de ureia tratada com o inibidor de urease NBPT. **Revista Ciência Rural**, v.40, n.6, p.1283-1289, jun, 2010.
- SCHWALBERT, R. A. et al. Fine-tuning of wheat (*Triticum aestivum*, L.) variable nitrogen rate by combining crop sensing and management zones approaches in southern Brazil. **Precision Agriculture**, [s. l.], v. 20, n. 1, p. 56-77, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11119-018-9581-6>>. Acesso em: 04 jan. 2021.

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

TAO, M. et al. Smartphone-based detection of leaf color levels in rice plants. **Computers and Electronics in Agriculture**, [s. l.], v. 173, n. February, 2020.

TEDESCO, M.J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico de Solos, 5).

USDA. **United States Department of Agriculture**. Production, Crops, Rice. 2022. Disponível em <<https://www.ers.usda.gov/topics/crops/rice/>>. Acesso em: 05 jun. 2022.

VIAN, A.L. et al. Uso de imagens digitais e sensor de vegetação para estimativa do potencial produtivo e estado nutricional em milho. **Congresso Brasileiro de agricultura de Precisão**. Set, 2014. Disponível em: <<http://conbap.sbea.org.br/2014/trabalhos/R0031-2.PDF>>. Acesso em: 02 jun. 2018.

WANG, Y. et al. Estimating nitrogen status of rice using the image segmentation of G-R thresholding method. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 149, p. 33–39, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2013.04.007>>. Acesso em: 04 jan. 2021.

WANG, Y. et al. Development of a model using the nitrogen nutrition index to estimate in-season rice nitrogen requirement. **Field Crops Research**, v. 245, n. 107664, 2020 Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429019300802>>. Acesso em: 04 jan. 2021.

WREGGE, M. S. et al. **Atlas Climático da Região Sul do Brasil - Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. [s.l: s.n.]. v. 53, 2011.

YAN, Y. et al. MiR444a has multiple functions in the rice nitrate-signaling pathway. **Plant Journal**, [s. l.], v. 78, n. 1, p. 44-55, 2014. Disponível em:<<https://doi.org/10.1111/tpj.12446>>. Acesso em: 06 jan. 2021.

YUAN, Z. et al. Indicators for diagnosing nitrogen status of rice based on chlorophyllmeter readings. **Field Crops Research**, v. 185, p. 12-20, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429015300630>>. Acesso em 02 jun. 2018.