



Adubação nitrogenada em tabaco Virgínia monitorado por plataforma multiespectral embarcada em aeronave remotamente pilotada

Alencar Lucas SOARES^{1*}, Lúcio de Paula AMARAL¹, Regiane Aparecida FERREIRA¹,
Luiz Patric KAYSER¹, Telmo Jorge Carneiro AMADO¹

¹Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil.

*E-mail: alencar.soares4@gmail.com

Submetido em 07/06/2023; Aceito em 27/08/2023; Publicado em 15/09/2023.

RESUMO: A produção de tabaco é uma das principais atividades da agricultura familiar na região Sul do Brasil, graças ao seu alto valor agregado, posiciona o país como segundo maior produtor e exportador mundial. O objetivo deste trabalho foi aplicar técnicas de Agricultura de Precisão, boas práticas de manejo e avaliar a viabilidade da taxa variável de adubação nitrogenada em Tabaco Virgínia. Este estudo foi conduzido em área comercial, em Agudo-RS. Foram realizados voos para obtenção dos índices de vegetação MPRI, NDRE, NDVI e NDWI com imagens multiespectrais do sensor RedEdge-Mx embarcado em Aeronave Remotamente Pilotada, sendo os índices gerados também com dados do espectrorradiômetro FieldSpec-HH2, em diversos estádios fenológicos do tabaco. A análise dos dados foi realizada com estatística multivariada, método de Análise Fatorial. As doses de nitrogênio utilizadas no experimento foram adequadas para obter a variabilidade no teor de nitrogênio nas folhas, produtividade, rendimento e nos índices de vegetação investigados. Os resultados obtidos indicaram que as ferramentas de AP aplicadas à cultura do tabaco, possibilitaram reduzir as doses de nitrogênio tradicionalmente utilizadas pelo agricultor sem prejuízo à produtividade. Ainda, tiveram potencial de incrementar a produtividade, qualidade de folhas e a rentabilidade com base na racionalização da adubação.

Palavras-chave: agricultura de precisão; doses de nitrogênio; índices de vegetação.

Nitrogen fertilization in Virginia tobacco monitored by a multispectral platform boarded in a remotely piloted aircraft

ABSTRACT: Tobacco production is one of the main activities of small farming in Southern Brazil, due its high economic value. Brazil is ranked as the second largest producer and the largest exporter in the world. The objective of this work was to apply Precision Agriculture tools, good management practices and variable rate nitrogen fertilization in Tobacco Virginia. The study was carried out in a commercial field of Virginia tobacco cultivar in the municipality of Agudo/RS. Aerial images were carried out to obtain the MPRI, NDRE, NDVI and NDWI vegetation indexes using multispectral images from the RedEdge-Mx sensor onboard a Remotely Piloted Aircraft, and the indices were also generated with data from the FieldSpec-HH2 spectroradiometer, in various phenological stages of the tobacco. Data analysis was performed using multivariate statistics with the Factor Analysis method. The rates of nitrogen input in the experiment were adequate to obtain a range of nitrogen content in the leaves, yield and vegetation indices. The results showed that PA tools applied in tobacco crops could reduce nitrogen rates in relation to farmer business as usual, and have the potential to increase economic returns, productivity, leaf quality and net income.

Keywords: precision agriculture; nitrogen doses; vegetation indexes.

1. INTRODUÇÃO

O cultivo de tabaco (*Nicotiana tabacum* L.- Família *Solanaceae*), caracteriza-se como a principal atividade econômica da agricultura familiar na Região Central do Rio Grande do Sul, líder em produção de tabaco. Na região Sul, o número de pessoas que dependem do tabaco vem diminuindo, na safra 2020/2021 para a safra 2021/2022 houve uma redução de 6,67%, 9.170 famílias produtoras deixaram a atividade, 26.766 hectares não cultivados, uma diferença de 67.308 toneladas de tabaco que deixaram de ser produzidas. Isso é preocupante, pois o setor fumageiro brasileiro em grande parte é voltado ao mercado internacional, colaborando para o superávit da balança

comercial brasileira e, socialmente, é responsável por dois milhões de empregos diretos, revelando a sua importância como principal produto agrícola gerador de renda para a pequena propriedade e municípios produtores, superando culturas como trigo, uva e cacau (AFUBRA, 2022).

O Brasil posiciona-se como o segundo maior produtor de tabaco em folha, ficando atrás somente da China, mantendo, porém, a posição de maior exportador deste produto no mercado mundial. Em 2021, cerca de 86% da produção tiveram como destino a exportação para a União Europeia, Ásia e Estados Unidos, tornando o tabaco um dos produtos agrícolas de maior relevância para a balança comercial do país. Dados do mesmo ano revelaram que a exportação

brasileira foi de 464.430 toneladas, com uma geração de receita na ordem de R\$ 7,93 bilhões (AFUBRA, 2022). A produção de tabaco na região Sul do país, estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná, ocupou uma área de 247 mil hectares, com 560 mil toneladas e geração de renda de R\$ 9,53 bilhões, para 128.448 famílias (AFUBRA, 2022).

Por ser uma das atividades agrícolas não alimentícias mais importantes do planeta, o tabaco contribui significativamente para a economia de diversos países. Os maiores incentivos aos agricultores na fumicultura são a estabilidade de preços proposta pelas empresas que compram a produção e o alto valor agregado do produto. Dessa forma, toda a produção de fumo brasileira é realizada no sistema integrado a indústria, no qual as fumageiras são responsáveis pelo fornecimento dos insumos utilizados em todo processo produtivo, desde financiamentos, assistência técnica ao produtor e garantia de compra do produto (SOUZA CRUZ, 2016).

O cultivo de tabaco não produz matéria-prima somente para a indústria do cigarro. Por meio do melhoramento genético, plantas como a *Nicotiana benthamiana* e *Nicotiana glauca* estão sendo utilizadas como matéria-prima para a fabricação de produtos que atendem uma grande variedade de terapias com base em proteínas para tratamento do ebola, do câncer e do HIV/AIDS (ZAMPIERI, 2015). Há um recente estudo francês publicado “*A nicotinic hypothesis for Covid-19 with preventive and therapeutic implications*”, o qual levantou hipóteses de que a nicotina poderia ter um importante papel protetor na infecção por Covid-19 (CHANGEUX et al., 2020). Isso justifica a importância da continuidade do cultivo de tabaco, não se restringindo apenas para produção de cigarros e fumo (INCA, 2019).

O desenvolvimento de tecnologias para o meio rural, através da pesquisa e inovação, bem como a difusão do conhecimento e o treinamento de pessoas, quando realizados em conjunto, podem impulsionar o setor da fumicultura e contribuir para mitigar o êxodo rural. A adoção de técnicas de agricultura de precisão (AP) e digital (AD) enquadra-se neste contexto, disponibilizando um conjunto de ferramentas com as quais o manejo da cultura pode ser aprimorado. A AP pode ser definida como um conjunto de técnicas que fazem uso intensivo de dados de diferentes fontes para analisar a variabilidade espacial e temporal dos cultivos, propondo intervenções a taxa variável de insumos com foco na eficiência, redução do impacto ambiental e retorno econômico (SRINIVASAN, 2009).

Dentre as técnicas agrônomicas e de AP com maior potencial de aplicação na fumicultura, destaca-se a correção da acidez e a elevação dos principais nutrientes do solo para o nível crítico ou superior, processo que se baseia na coleta de solo georeferenciada e na geração de mapas de variabilidade espacial visando subsidiar a aplicação da taxa variável de insumos. O monitoramento do estado nutricional dos cultivos, em especial de nitrogênio (N), utilizando ferramentas de sensoriamento proximal ou remoto, que embasam a taxa variável de N (VRN) é uma das técnicas mais aplicadas nas culturas do milho e arroz dentre outras (BOIARSKII; HASEGAWA, 2019; CARVALHO et al., 2020).

A aplicação da VRN na cultura do tabaco apresenta uma grande defasagem em relação às culturas supracitadas. Ainda

na pequena propriedade rural há necessidade de desenvolvimento e ajustes de tecnologias de AP para este nicho de mercado (HOFFMANN, 2020). No entanto, a AP apresenta um grande potencial porque o produto comercial é valorado em função da quantidade e qualidade das folhas produzidas, que podem ser sensoriadas durante o ciclo da cultura possibilitando ajustes finos na dose de N a ser prescrita integrando condições sítio-específicas de solo, clima, manejo e desenvolvimento da cultura (BREDEMEIER et al., 2016; MOGHIMI et al., 2020). A deficiência de N compromete a quantidade e a qualidade das folhas de tabaco. Já o excesso de N compromete a qualidade do produto, pois pode provocar desequilíbrios com outros nutrientes, notadamente enxofre e boro, e aumentar a suscetibilidade da planta a doenças e patógenos pelo decréscimo na síntese de compostos fenólicos como as fitoalexinas e lignina, o que torna a folha mais tenra e mais susceptível às infecções (MARSCHNER, 1995).

Dentre as ferramentas para monitorar o estado nutricional do tabaco, destaca-se o avanço no uso de imagens sub-orbitais geradas em sensores multiespectrais embarcados em aeronaves remotamente pilotadas (RPA). De acordo com Castro Jorge; Inamasu (2014), está ocorrendo uma crescente adesão das RPA na AP ao redor do mundo, justificado por avanços tecnológicos no desenvolvimento de seus componentes, como programas computacionais e plataformas digitais mais robustas, materiais mais leves, sistemas globais de navegação por satélite, sensores, entre outros. A aplicação das VRN com base no sensoriamento multiespectral com RPA na cultura do tabaco, pode auxiliar o produtor a identificar estratégias que possam aumentar a eficiência no gerenciamento das áreas de cultivo, podendo maximizar a rentabilidade, possibilitar a tomada de melhores decisões e possibilitar que a atividade possa ser mais competitiva. Também contribui para a diminuição das perdas de N por lixiviação e volatilização, diminuindo as emissões de óxido nitroso, que é um potente gás de efeito estufa (MEDEIROS, 2008; BREDEMEIER et al., 2016; MOGHIMI et al., 2020).

Bizari (2016) afirma que as RPA permitem ao agricultor realizar tarefas e obter informações das atividades realizadas em sua propriedade, como a demarcação do plantio, detecção de falta de fertilizantes, excesso ou falta de água, falhas no plantio, análise das plantações, ocorrências de doenças e pragas, a partir de produtos gerados por meio de sensores acoplados nas aeronaves. Entre os inúmeros produtos que podem ser gerados a partir da aplicação destas técnicas de sensoriamento multiespectral destaca-se a geração de diferentes índices de vegetação (IV), que são desenvolvidos com base na reflectância das coberturas vegetais. Existem diversos IV, como o Índice de Reflectância Fotoquímico Modificado (MPRI), Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), Índice por Diferença Normalizada da borda do vermelho (NDRE) e Índice de Diferença Normalizada da Água (NDWI).

Os IV são transformações de dados radiométricos, obtidos geralmente por sensores multiespectrais, que registram a reflectância da vegetação. Estes índices possuem relações com características e atributos de plantas, tais como, biomassa, teor de pigmentos, clorofila, sanidade, vigor,

estado nutricional, dentre outros, que podem ser utilizados para detecção de estresses, prescrição de aplicação de certos nutrientes a taxas variáveis, a exemplo do N, estimativa de vigor, crescimento, fitomassa e produtividade (FORMAGGIO; SANCHES, 2017). Porém, sua aplicação na cultura do tabaco ainda é incipiente e necessita de mais pesquisas para desenvolver aplicações semelhantes às já existentes para outras culturas, o que estimulou e justifica o desenvolvimento deste trabalho.

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar a eficiência de técnicas de AP, com base no manejo sítio-específico de solo e planta visando subsidiar a VRN no Tabaco Virginia. Além disso, teve como objetivos específicos: a) comparar a agricultura de precisão e boas práticas de manejo (PAPBPM), com correção da acidez e fertilização nitrogenada a taxa variável, com o cultivo tradicional do agricultor familiar com taxa uniforme destes insumos (CTAF); b) comparar o sensoriamento do tabaco através de diferentes IV.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Local do estudo e implantação do experimento

O estudo foi desenvolvido em área de cultivo comercial de Tabaco Virginia, safra 2020/2021, em Agudo estado do Rio Grande do Sul, localizada nas proximidades das coordenadas geográficas 29°40'55,56" S e 53°15'11,81" O (Figura 1), com altitude média de 65 m. A área possui 0,25 ha, declividade de 5%, solo classificado como Neossolo Regolítico Eutrófico Típico (STRECK et al., 2018), sendo cultivada há 10 anos com tabaco, alternando diferentes cultivares.

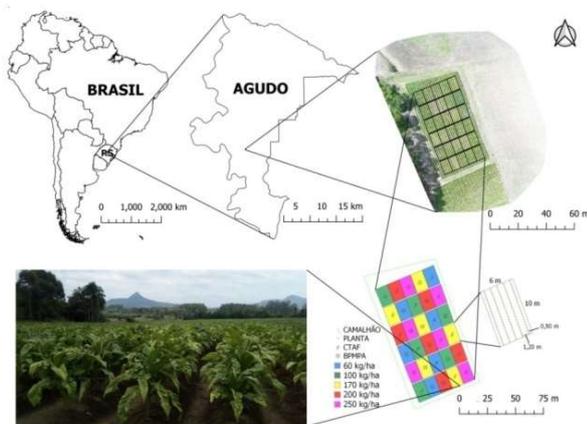


Figura 1. Localização do experimento com tabaco cultivado sob duas formas de manejo e com variação de doses de nitrogênio em área comercial em Agudo-RS, Brasil, safra 2021-2022.

Figure 1. Location of the experiment with tobacco cultivated under two forms of management and varying nitrogen doses in a commercial area in Agudo-RS, Brazil, 2021-2022 seasons.

O clima, segundo a classificação climática de Köppen, é do tipo subtropical úmido "Cfa2", com verões muito quentes e secos e invernos frios e úmidos com frequentes ocorrências de geadas e precipitação de granizo. Destaca-se que as médias normais de temperatura mais elevada ocorrem no mês de janeiro e as médias normais de temperatura mais baixa ocorrem no mês de junho. Durante o ciclo de produção, houve alto volume de precipitação em setembro, com redução dos volumes nos meses posteriores.

As mudas de tabaco foram produzidas na propriedade, com bandejas flutuantes em canteiro com água, cobertos por túnel de plástico (FOPPA et al., 2017). A semeadura foi realizada em 08/05/2020, com a cultivar Virginia (PVH 2299). A germinação ocorreu após nove dias, havendo repique de mudas e quatro podas no canteiro (45, 55, 65 e 75 dias após a semeadura). O preparo de solo foi realizado com grade aradora e aterrador acoplado ao trator para construção de 30 camalhões (40x60x30cm – altura, largura da base e topo). Foram alocadas, com receptores de navegação global por satélite (GNSS) de dupla frequência e correção cinemática em tempo real (RTK) (MONICO, 2008), 30 repetições de 60 m² (6x10 m), com capacidade para 100 plantas distribuídas em cinco camalhões. Os dados foram pós-processados e ajustados em relação à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) e obtiveram precisão e acurácia superior a 10 mm. Das 30 repetições, 15 foram cultivadas com princípios de Agricultura de Precisão e boas práticas de manejo (PAPBPM) e 15 com a forma tradicional de cultivo realizada pelo agricultor familiar (CTAF), definidas por sorteio.

Foi realizada correção parcial da acidez e adubação do solo, com base em análise de fertilidade, coleta de solo em quatro pontos georreferenciados distribuídos na área, na profundidade de 0-20 cm, onde cada amostra foi composta por cinco sub-amostras (uma central e quatro no entorno). Para correção do solo, nas repetições manejadas com PAPBPM, foram distribuídos 3000 kg ha⁻¹ de calcário dolomítico Faixa C (PRNT 71,85%) e 800 kg ha⁻¹ de fertilizante a base de cálcio e silício, aplicados a lanço, em área total. Não foi necessária adição de Fósforo e Potássio, pois os teores estavam altos para a cultura do tabaco, segundo a Rede Oficial de Laboratórios de Análise de Solo e Tecido Vegetal dos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (ROLAS RS/SC, 2016).

Para a adubação de base no transplante das mudas foram utilizados 35 kg ha⁻¹ de N, com a fórmula química NPK 14-16-10, aplicados 14 dias antes do transplante para evitar queima de raízes, em todas as repetições, com 15 gramas por planta. Porém, nas repetições PAPBPM a dose foi localizada e incorporada ao solo, enquanto que nas repetições CTAF as doses foram aplicadas sobre o solo e em filete contínuo, espalhadas com regador no topo do camalhão, sem haver incorporação. O transplante do tabaco para a lavoura foi realizado no dia 03/08/2020, 87 dias após a semeadura, com auxílio de uma plantadeira manual (135R Krupp), com ponta redonda para fazer a abertura de covas no camalhão. As mudas apresentavam tamanho médio de 10 cm, com aproximadamente duas folhas expandidas, sendo distribuídas de forma sistemática, com espaçamento de 0,50 m entre plantas e 1,20 m entre linhas/camalhão.

Na adubação de cobertura foram utilizadas diferentes doses de N (60, 100, 170, 200, 250 kg N ha⁻¹), com salitre do chile (15-00-15 NPK), aplicados a 10 cm das plantas, em ambos os manejos (PAPBPM e CTAF). Estas aplicações foram fracionadas em duas etapas, no 21º dia após o transplante (DAT) com as respectivas doses de fertilizante (4, 14, 28, 36 e 46 g planta⁻¹, respectivamente para as doses de N utilizadas) e no 43º DAT (6, 12, 26, 30 e 40 g planta⁻¹, respectivamente para as doses de N utilizadas). Nas repetições PAPBPM as doses foram aplicadas de forma localizada/incorporada, já nas repetições CTAF as doses foram aplicadas localizadas sobre o camalhão, sem

incorporação. As doses de 60 e 100 kg N ha⁻¹ foram aplicadas em um ponto apenas ao redor das plantas, devido à baixa quantidade de fertilizante. Já as demais doses, foram aplicadas em dois pontos, devido a maior quantidade.

O desponte do tabaco ocorreu em três etapas, sendo no 75°, 85° e 96° DAT, com aplicação de anti-brotante Prime Plus, na dose de 2,60 L ha⁻¹ em uma mistura de 250 litros de água. As colheitas seguiram a ordem de retirada das folhas da parte de baixo para o ápice das plantas, sendo colhidas apenas as folhas maduras, que apresentavam uma coloração amarelada. As colheitas foram realizadas em seis etapas a cada 14 dias aproximadamente, conforme disponibilidade da estufa para cura do tabaco e da condição climática. A primeira colheita denominada de baixeira foi realizada ao 78° DAT, da segunda até a quinta colheita foram denominadas de meeira, realizada respectivamente aos 91°, 108°, 123° e 137° DAT e a sexta colheita denominada de ponteira, foi realizada ao 149° DAT. Em função da dificuldade de encontrar na literatura uma escala fenológica específica para a cultura do tabaco, foi adotada a escala apresentada por Knies et al. (2011), na qual os estádios fenológicos que correspondem a cada colheita foram 1 colheita (1C), 2C, 3C, 4C, 5C 6Cf, respectivamente.

Para cura, as folhas de tabaco foram presas em grampos de 28 cm, levadas à estufa elétrica, alimentada por biomassa florestal, com ventilação forçada por três motores blindados, com temperatura entre 90 a 160° F e umidade entre 95 a 105° F, aquecida por fornalha à lenha, controlada por painel de comando digital, por um período de sete dias para cada colheita. Após a cura, foi realizada a pesagem das folhas secas por repetição, para a determinação da biomassa total das folhas comercializáveis, também separadas por classe de qualidade/valor de negociação. A biomassa foi determinada em balança digital de precisão (modelo 123 útil) e a classificação das folhas foi realizada conforme padrão da empresa Universal Leaf Tabacos. Para a determinação do valor de cada classe de tabaco, utilizou-se a tabela de referência da mesma empresa e para a obtenção dos resultados finais, utilizaram-se os valores recebidos (R\$) com a comercialização real do produto.

2.2. Delineamento experimental, variáveis analisadas e análise estatística

O experimento foi conduzido em Delineamento Bifatorial em blocos ao acaso. O primeiro fator teve dois níveis, sendo as duas formas de manejo PAPBPM e CTAF. Já o segundo fator teve cinco níveis, sendo as doses de N (60, 100, 170, 200, 250 kg ha⁻¹). O experimento contou com três blocos, em cada bloco havia 10 tratamentos, contendo uma repetição segundo os desdobramentos dos dois fatores. Em cada repetição haviam 100 plantas de tabaco, totalizando 1000 plantas por bloco e 3000 plantas no experimento (Figura 1). Para a proteção do experimento foi plantada uma borda com 1000 plantas na bordadura do mesmo.

Durante a evolução do cultivo foram obtidos IV, com uso de sensor multiespectral embarcado em RPA. Foram mensuradas as variáveis teor relativo de clorofila e de N nas folhas, e paras as colheitas, massa seca, classificação e valor real de venda da produção. Para a geração aérea das imagens foi utilizada uma RPA do tipo multirrotor/quadrícóptero modelo *Phantom 4 Advanced Plus- DJI*, contendo sensor RGB de 20 megapixels, na qual foi embarcado de forma adaptada o sensor multiespectral RedEdge-Mx (Micasense), que conta com cinco bandas espectrais (vermelho, azul, verde,

infravermelho próximo e borda do vermelho). Os planos de voo foram realizados no aplicativo *Precision Flight* versão gratuita, com sobreposição lateral e longitudinal de 75 e 80%, altura de 40 m, o que resultou numa resolução espacial de 2,76 cm pixel⁻¹ nas imagens geradas com o sensor multiespectral, sempre no horário das 15:00 h GMT, quando o sol estava próximo do seu zênite.

Os voos foram realizados no 21° DAT (Estádio Vx – plantas com 5 a 6 folhas maiores que 4 cm) referente ao desenvolvimento de plantas com a adubação de transplante, no 49° DAT (Estádio EC – alongamento do colmo superior a 3 cm) referente ao desenvolvimento de plantas com as duas aplicações de N, no 68° DAT (Estádio IA – Início da antese) referente ao início da florescência da cultura, no 75° DAT (Estádio 1C) referente a maturação das folhas da baixeira para colheita, aos 90°, 108°, 121° e 135° DAT (Estádios 2C, 3C, 4C e 5C) maturação das folhas da meeira para colheita e no 140° DAT (Estádio 6Cf), referente a maturação das folhas da ponteira, segundo a fenologia descrita por Knies et al. (2011).

O processamento das imagens e obtenção dos IV foram realizados com o software *Pix4D mapper Pro* - Educacional versão 3.3.29. Foram realizadas as etapas de inserção das imagens e ajustes de coordenadas de entrada e saída, alinhamento no modo rápido e geração da nuvem esparsa de pontos homólogos, inserção dos pontos de controle coletados a campo e ajuste de posição dos pontos homólogos e imagens para as novas coordenadas precisas inseridas; o processamento para a geração dos ortomosaico de bandas, para o qual foi realizada a calibração das bandas para as imagens multiespectrais, por meio de painel de calibração com seus fatores de correção e do sensor de luminosidade utilizados nos dias dos voos (DSL), gerando como resultado um arquivo geotiff; e por fim, a realização de equações matemáticas para a geração dos índices de vegetação (IV), que foi realizado por meio da calculadora de combinações de bandas no programa.

Os IV avaliados foram, o MPRI, proposto por Yang et al. (2008) consiste na diferença normalizada entre as bandas da região do verde e do vermelho, tendo como maior objetivo a facilidade de diferenciação de objetos como solo exposto e vegetação em área de cultivo. O NDRE, estabelecido por Barnes et al. (2000), que utiliza as bandas do infravermelho próximo e RedEdge e é um IV capaz de fornecer uma melhor análise para plantas com maior porte, permitindo avaliar melhor o dossel da planta. O NDVI, proposto por Rouse et al. (1973), que utiliza as bandas do vermelho e do infravermelho próximo para avaliar a sanidade, nutrição e estado hídrico das plantas. Também o NDWI, proposto por McFeeters (1996), para realçar nas imagens multiespectrais massas de água presentes na paisagem, sendo utilizado para detectar mudanças no teor de água, sendo sensível às estruturas construídas, tem relação com plantas em sua parte negativa (0 a -1), operando com as bandas do verde e do infravermelho próximo.

Após finalizar o processamento de imagem e a geração dos IV no software *Pix4D mapper*, os mosaicos foram exportados para o sistema de informações geográfica (SIG) *ArxMap* versão 10.8, nos quais fez-se o recorte para a área de estudo, a partir do uso do limite das parcelas, coletado com equipamento geodésico de precisão, com a ferramenta “*Extract By Mask*”. Para a classificação e separação dos valores dos IV somente relativos às plantas de tabaco, foi

utilizado como máscara o IV MPRI, com uso da ferramenta “Reclas”, com valores mínimos variáveis conforme a geometria da planta em cada estágio fenológico, que variaram de 0,15 a 0,30. Para conferir a geometria das plantas de tabaco no índice, fez-se o uso do mosaico RGB, para a verificação da sobreposição. Para a retirada de ruídos nos IV (solo exposto, palhada, plantas espontâneas, musgo, outros), classificados com o mesmo valor de *pixel* que o tabaco, foram feitas correções por meio da conversão raster para vetor e edição vetorial dos arquivos com o MPRI classificado.

Os pixels indesejados foram eliminados por meio de um novo recorte destes com os *shapefiles*, permanecendo, portanto, somente o valor do índice MPRI referente às plantas de tabaco em cada repetição. Estes limites foram utilizados como máscara para recortar os demais IV em cada estágio fenológico. Ainda no SIG utilizou-se a ferramenta “Zonal Statistics as Table”, para a geração da tabela com dados de valor mínimo, máximo, média, amplitude e área com base nos *pixels* presentes dentro de cada repetição do experimento, para todos os IV em cada um dos estágios fenológicos, sendo a tabela exportada para planilha eletrônica.

Foram utilizadas as tecnologias de sensoriamento proximal, com equipamento espectrorradiômetro *FieldSpec - HH2*, sendo realizadas medições em uma folha central da planta com repetição de cinco plantas por parcela, escolhidas aleatoriamente e identificadas com piquete. Para a medição do teor de clorofila da planta, foi utilizado o equipamento clorofilômetro portátil SPAD com leitura instantânea, em duas folhas centrais da planta com repetição de cinco plantas por parcela. As leituras efetuadas com clorofilômetro correspondem ao teor relativo de clorofila presente na folha da planta. Os valores são calculados pelo equipamento com base na quantidade de luz transmitida pela folha, em dois comprimentos de ondas, com diferentes absorbâncias da clorofila (MINOLTA, 1989). As leituras provenientes desse equipamento, são realizadas por diodos emissores de luz, nos comprimentos de onda de 650 a 940 nm, onde a luz que atravessa a folha entra em contato com o receptor, que converte os sinais elétricos em sinais digitais, ou seja, em valores SPAD (SALLA et al., 2007).

Foram avaliados parâmetros a campo como quantidade de folhas por planta, largura e comprimento da folha, altura da planta e diâmetro do colo, referente às mesmas cinco plantas por repetições, mensuradas no mesmo dia da geração das imagens e das medições com o Espectrorradiômetro e clorofilômetro. Além disso, foram colhidas cinco folhas de tabaco por repetição, referentes ao terço médio da planta, na qual foi realizada a limpeza das mesmas e secagem em estufa elétrica com temperatura fixada em 65°C, durante 10 dias. Após a secagem as folhas foram moídas em moedor elétrico e separadas em amostras de 0,2 grama por repetição com balança de alta precisão. O processo de análise laboratorial do teor de N nas folhas de tabaco seguiu a metodologia descrita por Tedesco (1995), realizada em laboratório na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). O teor de N foi determinado a partir de 0,2 gramas de tecido vegetal com H₂SO₄ e mistura de digestão (Na₂SO₄, CuSO₄.5H₂O e Selênio), sendo determinado em destilador de arraste de vapor semi-micro Kjeldahl (TEDESCO, 1995).

As variáveis em estudo foram analisadas inicialmente por análise multivariada fatorial (AF) para se obter melhor

entendimento das relações entre as variáveis significantes ao experimento (VICINI et al., 2018; MANLEY e ALBERTO, 2019). Também foi realizada ANOVA em três vias, para detectar se houve efeito ambiental nos blocos, e não detectado a influência deste fator, foi utilizada ANOVA em duas vias e comparação de médias pelo teste de Tukey ($p=0,05$), desde que atendidas as condicionantes de regressão, com uso do software Sigmaplot versão 15.0. Neste procedimento, verifica-se a homogeneidade de variância e normalidade dos dados, para aplicação da comparação de médias, e quando os dados atenderam aos condicionantes da ANOVA, a análise foi realizada. Precedendo estas análises, foi verificada a ocorrência de *outliers*, sendo os mesmos removidos da análise quando presentes. Os gráficos para ANOVA e análise de regressão foram realizados no programa *Statistica*® 12, já os gráficos de evolução dos IV, em relação aos estágios fenológicos do tabaco, foram realizados em planilha eletrônica. A máxima eficiência técnica (MET) foi obtida derivando-se e igualando a zero as funções quadráticas que melhor se ajustaram aos dados do experimento. Já a máxima eficiência econômica (MEE) foi baseada no preço do quilo do fertilizante utilizado e no preço do quilo das folhas curadas de tabaco da safra 2020/2021 (AFUBRA 2020).

3. RESULTADOS

Com as médias dos valores médios dos IV obtidos com a Rededge-Mx e com o FieldSpec-HH2, foram gerados gráficos de evolução temporal do índice ao longo dos estágios fenológicos da cultura, considerando para os manejos PABPBM e CTAF (Figura 2). Foram elaborados também, gráficos com as médias dos valores médios dos IV, ao longo dos estágios fenológicos da cultura, para demonstrar o seu comportamento de evolução em relação às doses de N aplicadas em cada manejo, tanto para o sensor Rededge-Mx (coluna da esquerda) como para o FieldSpec-HH2 (coluna da direita) (Figura 3).

A produtividade (massa de folhas curadas) e a renda do tabaco foram determinadas em função dos manejos e das doses de N, categorizados os valores pelas classes de qualidade da cura das folhas (X01, XR2, XR3, CO1, CR2, CR3, TO1, TR2, BR1, G2 e farelo) (Figura 4).

Para melhor compreender as relações entre as variáveis no experimento foi utilizada análise multivariada fatorial, com a rotação *varimax normalized*, a partir das relações das 143 variáveis foram obtidos 16 autovalores significativos, ou seja, aqueles com valor maior que 1, sendo que os autovalores 1 (46,88; % variância 32,78), 2 (34,79; % variância 24,33), 3 (11,16; % variância 7,80) e 4 (10,40; % variância 7,27), apresentaram juntos autovalor acumulado de 103,24 e explicação da variância de 72,20 %, sendo estes os mais significativos por acumular mais de 70% da explicação da variância dos dados. Dentre estes, os autovalores 1 e 2 foram os mais importantes, por carregarem a maior variabilidade do conjunto de dados originais. Foram obtidos 29 fatores e a contribuição das variáveis nos fatores mais importantes obtidos, 1 e 2 (Figura 5), que são correlatos aos autovalores, utilizando o *Factor loading*, sendo destacadas as variáveis que contribuem em mais de 70% para a composição de cada fator (VICINI et al., 2018; MANLY; ALBERTO, 2019).

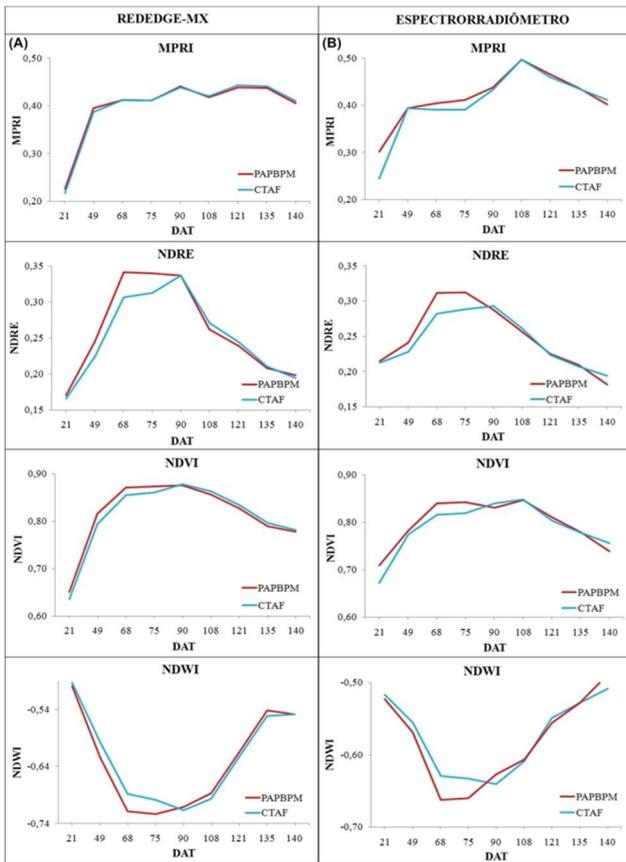


Figura 2. Comportamento dos índices de vegetação obtidos pela Rededge-Mx (A) e FieldSpec-HH2 (B) para os manejos PABPBM (agricultura de precisão e boas práticas de manejo) e CTAF (cultivo tradicional do agricultor familiar) por estágio fenológico da cultura do tabaco Virgínia em relação aos dias após o transplante (DAT), Agudo-RS, Brasil, safra 2021-2022.

Figure 2. Behavior of vegetation indices obtained by Rededge-Mx (A) and FieldSpec-HH2 (B) for the management PABPBM (Precision agriculture and good management practices) and CTAF (Traditional farming of family farmers) by phenological stage of the Virginia tobacco crop in relation to days after transplantation (DAT), Agudo-RS, Brazil, 2021-2022 seasons.

O teor de N absorvido pelas folhas de tabaco foi influenciado apenas pelas doses de N aplicadas e apresentaram diferença. Os menores teores absorvidos foram de 1,42 e 1,63%, respectivamente nas doses de 60 e 100 kg N ha⁻¹, e o maior teor (2,01%) foi obtido na dose de 250 kg N ha⁻¹ (Figura 6). A massa seca total de folhas (Figura 7) apresentou diferença significativa nas médias somente em função das doses de N, com maior produtividade (3.220,40 kg ha⁻¹) na dose de 170 kg N ha⁻¹, havendo queda de produtividade com as maiores doses de N (200 e 250 kg ha⁻¹). A partir da dose de 170 kg N ha⁻¹, com acréscimo de 30 kg de N ha⁻¹ houve uma queda de 72,50 kg MS ha⁻¹ (aproximadamente 4,83 arrobas de folhas de tabaco curado). Já com o acréscimo de 70 kg de N ha⁻¹ houve uma queda de produtividade de 156,30 kg MS ha⁻¹ (≅10,42 arrobas de folhas de tabaco curado).

O rendimento com a venda das folhas curadas (R\$ ha⁻¹) apresentou diferença significativa nas médias apenas em função das doses de N (Figura 8), ocorrendo o maior rendimento (3.220,40 R\$ ha⁻¹) com a dose de 170 kg N ha⁻¹, havendo queda de rendimento com as maiores doses de N (200 e 250 kg ha⁻¹). A MET para o maior rendimento foi obtida com a dose de 183 kg N ha⁻¹. Também foram determinadas as perdas de rendimento com as sub e superdoses de N, onde a maior perda de rendimento foi observada com a menor dose de N (Figura 9).

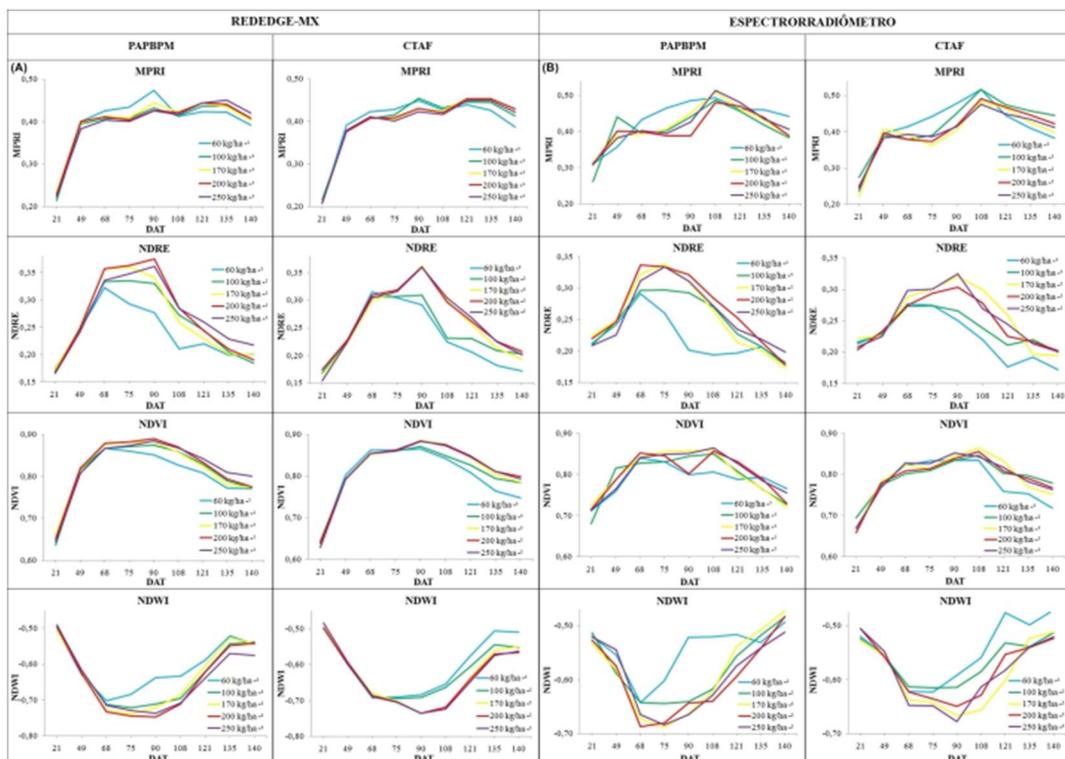


Figura 3. Comportamento dos índices de vegetação na obtidos pela Rededge-Mx (A) e FieldSpec-HH2 (B) para as doses de Nitrogênio, nos manejos PABPBM (agricultura de precisão e boas práticas de manejo) e CTAF (cultivo tradicional do agricultor familiar) por estágio fenológico do tabaco Virgínia em relação aos dias após o transplante (DAT), Agudo-RS, Brasil, safra 2021-2022.

Figure 3. Behavior of vegetation indices obtained by Rededge-Mx (A) and FieldSpec-HH2 (B) for Nitrogen dose, in the management PAPBPM (Precision agriculture and good management practices) and CTAF (Traditional farming of family farmers) by phenological stage of the Virginia tobacco crop in relation to days after transplantation (DAT), Agudo-RS, Brazil, 2021-2022 seasons.

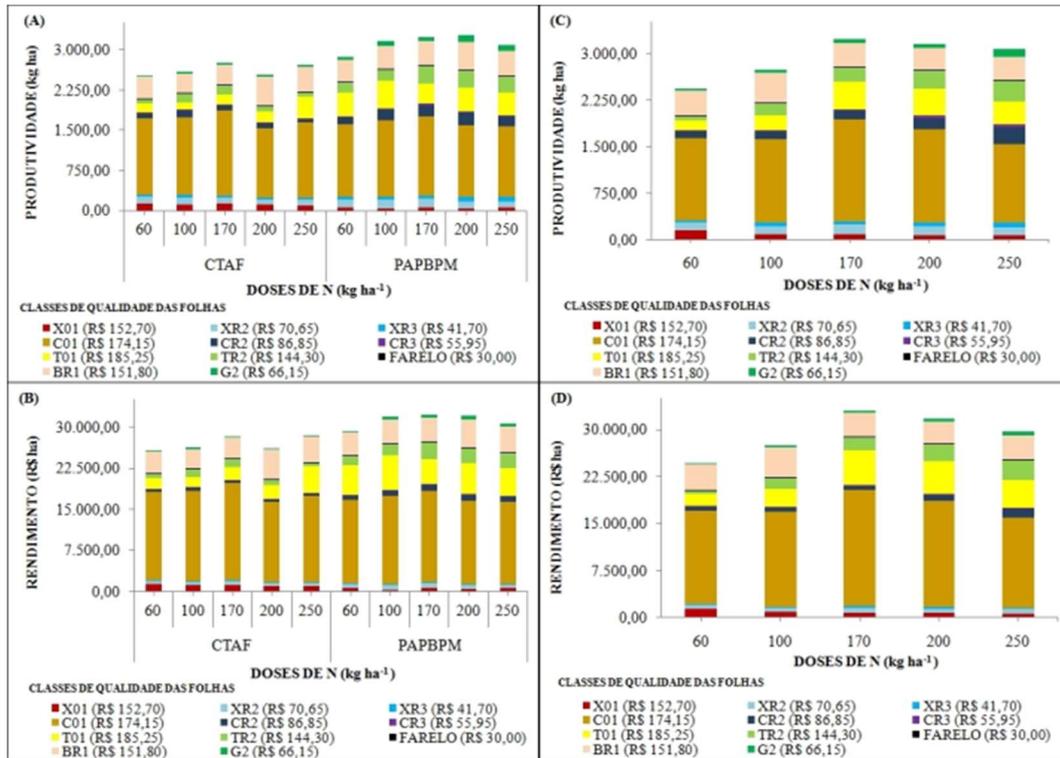


Figura 4. Produtividade e rendimento de tabaco Virginia por classes de qualidade das folhas curadas em função dos manejos PAPBPM (agricultura de precisão e boas práticas de manejo) e CTAF (cultivo tradicional do agricultor familiar) e das doses de nitrogênio (Fontes: NPK14-16-10/Salitre do Chile - 15% de N e 18% de K), Agudo-RS, Brasil, safra 2021-2022.

Figure 4. Productivity and yield of Virginia tobacco by quality classes of cured leaves as a management function of PAPBPM (precision agriculture and good management practices) and CTAF (traditional cultivation of family farmer) and nitrogen doses (Sources: NPK14-16-10/Chilean salt peter - 15% de N e 18% de K), Agudo-RS, Brazil, 2021-2022 seasons.

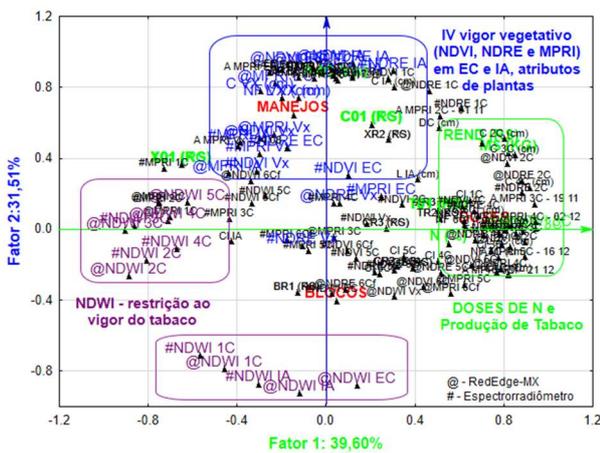


Figura 5. Dispersão das variáveis segundo análise fatorial, obtidas no experimento com dois manejos: aplicação de boas práticas de manejo e princípios de agricultura de precisão (PAPBPM) e cultivo tradicional na agricultura familiar (CTAF); e doses de nitrogênio em tabaco Virginia, Agudo-RS, Brasil, safra 2021-2022.

Figure 5. Dispersion of variables according to factorial analysis, obtained in the experiment with two management practices: Precision agriculture and good management practices (PAPBPM) and Traditional farming of family farmers (CTAF); and nitrogen doses in Virginia tobacco, Agudo-RS, Brazil, 2021-2022 seasons.

Em relação aos IV (NDRE, NDVI, NDWI e MPRI), a análise fatorial apontou as relações mais relevantes com as doses de N, com destaque nos estádios fenológicos relativos às colheitas 2C, 3C e 4C, considerando também o sensor multiespectral RedEdge-MX e o espectrorradiômetro FieldSpec-HH2 (Figuras 10, 11, 12 e 13). Para os IV NDRE, NDVI e MPRI as doses crescentes de N proporcionaram incremento em seus valores positivos, até atingir o ponto de máxima eficiência técnica (MET). Já para o NDWI o mesmo comportamento ocorre, mas o incremento se dá para os valores negativos, que para este IV representam vigor vegetativo e incremento de biomassa (Figura 12). Na maioria dos casos foi observada diferença significativa de médias para estes IV pela ANOVA e também boas relações de regressão em função das doses de N. A análise multivariada apontou relações para produtividade (massa folhas curadas) e rendimento do tabaco com o NDVI, obtido com o sensor RedEdge-Mx, na segunda colheita, e também com o comprimento de folhas obtidos na segunda e terceira colheita (Figura 14). O comprimento das folhas apresentou melhor explicação, com R^2_{adj} de 0,7795 e 0,7429 para massa seca (Figura 14 C e E), e R^2_{adj} de 0,6720 e 0,5978 para rendimento (Figura 14 D e F) em comparação ao NDVI R^2_{adj} de 0,6688 e 0,6161 (Figura 14 A e B).

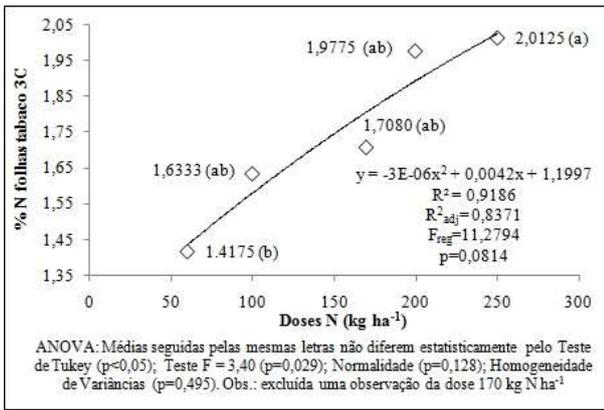


Figura 6. Relação entre doses de nitrogênio (Fontes: NPK14-16-10/Salitre do Chile - 15% de N e 18% de K) e teor de nitrogênio absorvido pelas folhas de tabaco Virgínia na terceira colheita, Agudo-RS, Brasil, safra 2021-2022.

Figure 6. Relationship between nitrogen doses (Sources: NPK14-16-10/Chilean saltpeper - 15% de N e 18% de K) and nitrogen content absorbed by Virginia tobacco leaves in the third harvest, Agudo-RS, Brazil, 2021-2022 seasons.

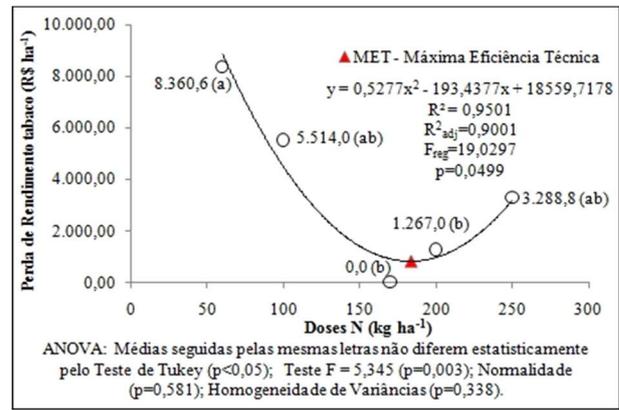


Figura 9. Relação entre doses de nitrogênio (Fontes: NPK14-16-10/Salitre do Chile - 15% de N e 18% de K) e perda de rendimentos com a comercialização de folhas de tabaco Virgínia, Agudo-RS, Brasil, safra 2021-2022.

Figure 9. Relationship between nitrogen doses (Sources: NPK14-16-10/Chilean saltpeper - 15% de N e 18% de K) and income loss from the sale of Virginia tobacco leaves, Agudo-RS, Brazil, 2021-2022 seasons.

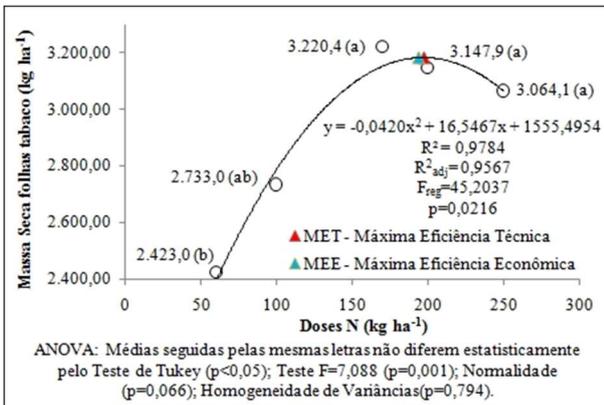


Figura 7. Relação entre doses de nitrogênio (Fontes: NPK14-16-10/Salitre do Chile - 15% de N e 18% de K) e massa seca total de folhas curadas de tabaco Virgínia, Agudo-RS, Brasil, safra 2021-2022.

Figure 7. Relationship between nitrogen doses (Sources: NPK14-16-10/Chilean saltpeper - 15% de N e 18% de K) and total dry mass of cured Virginia tobacco leaves, Agudo-RS, Brazil, 2021-2022 seasons.

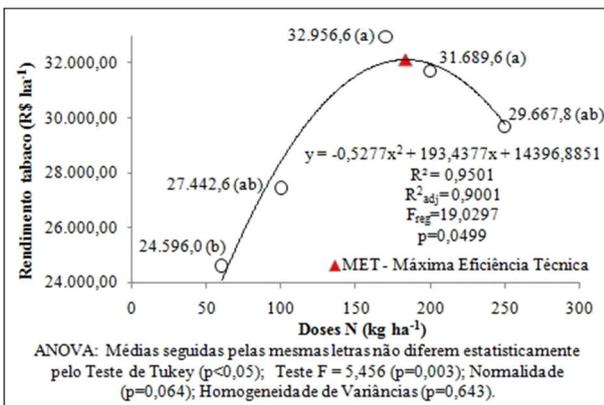


Figura 8. Relação entre doses de nitrogênio (Fontes: NPK14-16-10/Salitre do Chile - 15% de N e 18% de K) e rendimentos com a comercialização de folhas curadas de tabaco Virgínia, Agudo-RS, Brasil, safra 2021-2022.

Figure 8. Relationship between nitrogen doses (Sources: NPK14-16-10/Chilean saltpeper - 15% de N e 18% de K) and yields from the sale of cured Virginia tobacco leaves, Agudo-RS, Brazil, 2021-2022 seasons.

4. DISCUSSÃO

A evolução dos IV ao longo dos estádios fenológicos do tabaco (Figuras 2 e 3) demonstrou, quando considerado os manejos PABPM e CTAF, que no PABPM houve uma antecipação no ciclo da cultura. De fato, houve florescência e desponte antecipados nas plantas, o que possibilitou colher mais folhas de tabaco maduras nas seis colheitas realizadas em relação ao CTAF, sendo este comportamento mais evidente nos IV NDVI, NDRE e NDWI. Já no manejo CTAF, as folhas de tabaco permaneceram verdes por mais tempo, sendo colhidas mais tardiamente, com maior umidade e massa fresca. Isso ocasionou o aparecimento de folhas escuras após a cura do tabaco, de menor valor comercial.

Analisando as curvas de evolução dos IV em função das doses de N, obtidos pelo sensor Rededge-Mx (Figura 2.A), foi observado que o pico máximo atingido pelos IV foi registrado na segunda colheita (2C - 90 DAT). Já entre os IV obtidos pelo FieldSpec-HH2 (Figura 2.B), o NDRE e NDWI obtiveram o pico máximo na 1C e o MPRI e NDVI obtiveram o pico na 3C, respectivamente aos 75 e 108 DAT. Todos os IV apresentaram estabilização após estes estádios fenológicos. De modo geral, houve uma correspondência quanto ao formato das curvas de cada um dos IV investigados, independente do sensor utilizado. Porém, o NDRE e o NDWI foram mais eficientes em captar precocemente (até 90 DAT) as diferenças entre os tratamentos PABPM e CATF.

Para cada IV (Figuras 2 e 3), as datas referem-se a um estágio fenológico, onde apresenta a evolução dos IV MPRI, NDRE, NDVI e NDWI. Para os três primeiros IV, desde a fase inicial, a partir da qual houve ascensão da linha de tendência, indicando crescimento e expansão das folhas, e logo depois observou-se a estabilidade das curvas, indicando a maturação das folhas, e posterior queda, indicando senescência, quando as plantas apresentaram menor teor de clorofila e maior incidência de carotenóides. Já para o NDWI as curvas apresentam outra tendência, pois neste IV, o maior vigor vegetativo é associado aos valores mais próximos de -1. Assim, as suas curvas iniciam com valores negativos, mais próximos de -0,5 e tendem a aproximar de -1, com o incremento de biomassa até o auge da expansão e maturação das folhas. Com a senescência, a curva volta a buscar valores

mais próximos de 0, indicando perda de vigor vegetativo e biomassa. Os comportamentos dos IV analisados são justificados com o descrito na literatura (ROUSE et al., 1973; McFEETERS, 1996; BARNES et al., 2000; YANG et al., 2008; FORMAGGIO; SANCHES, 2017).

Produtividade e rendimento do tabaco (Figura 4) foram relacionados na análise fatorial com os fatores de variação e variáveis obtidas no experimento. A dispersão das variáveis (Figura 5) ocorreu segundo os fatores 1 e 2, os mais importantes (VICINI et al., 2018; MANLY; ALBERTO, 2019). O Fator 1 representou 39,60% da variabilidade geral do conjunto de dados. Foi possível observar relações entre variáveis relevantes ao experimento, tais como as relações das doses de N com as variáveis teor de N (%) absorvido pelas folhas de tabaco (Figuras 6), massa seca de folhas curadas (kg ha⁻¹) (Figura 7), rendimento com a comercialização (R\$ ha⁻¹) (Figura 8) e perdas de rendimento (Figura 9), assim como a relação de doses de N com NDRE na 2C, 3C e 4C, NDVI na 3 e 4 colheita, NDWI na 3 e 4 colheita, MPRI na quarta colheita (sensor multiespectral e espectrorradiômetro) (Figuras 10, 11, 12 e 13), bem como a relação de massa seca e rendimento com NDVI na 2 colheita e comprimento de folha na 2 e 3 colheita (Figura 14). Já o Fator 2 representou 31,51% da variabilidade geral do conjunto de dados. A

natureza deste fator foi composta pelos manejos (CTAF/PAPBPM) e blocos, sendo que ambas não apresentaram diferença significativa na análise do experimento pela ANOVA. Foi composto pelo comportamento dos IV, NDVI e NDRE, e por atributo de plantas, comprimento, largura e número de folhas, altura e área de plantas, nos estádios fenológicos iniciais.

De um modo geral, NDRE (Figura 10) e NDWI (Figura 12) demonstraram maior eficiência em captar o efeito de doses de N, obtidos por ambos os sensores (Rededge-Mx e FieldSpec-HH2). Isso ressalta que estes IV tem elevado potencial de utilização em plataformas de prescrição da VRN na cultura do Tabaco. A eficiência do NDRE em captar diferenças entre doses de N em estádios avançados de culturas, tais como milho e arroz, dentre outras, já havia sido reportada na literatura (BOIARSKII; HASEGAWA, 2019; CARVALHO et al., 2020). Na cultura do arroz, em trabalho conduzido no Japão, Boiarskii e Hasegawa (2019) reportaram que o NDRE foi capaz de detectar menores leituras associadas a reduzidas doses de N do que o NDVI. Para explicar este fato, os autores argumentaram que a clorofila tem a máxima absorção no comprimento do vermelho, que tem maior interação com as camadas superficiais do dossel de plantas.

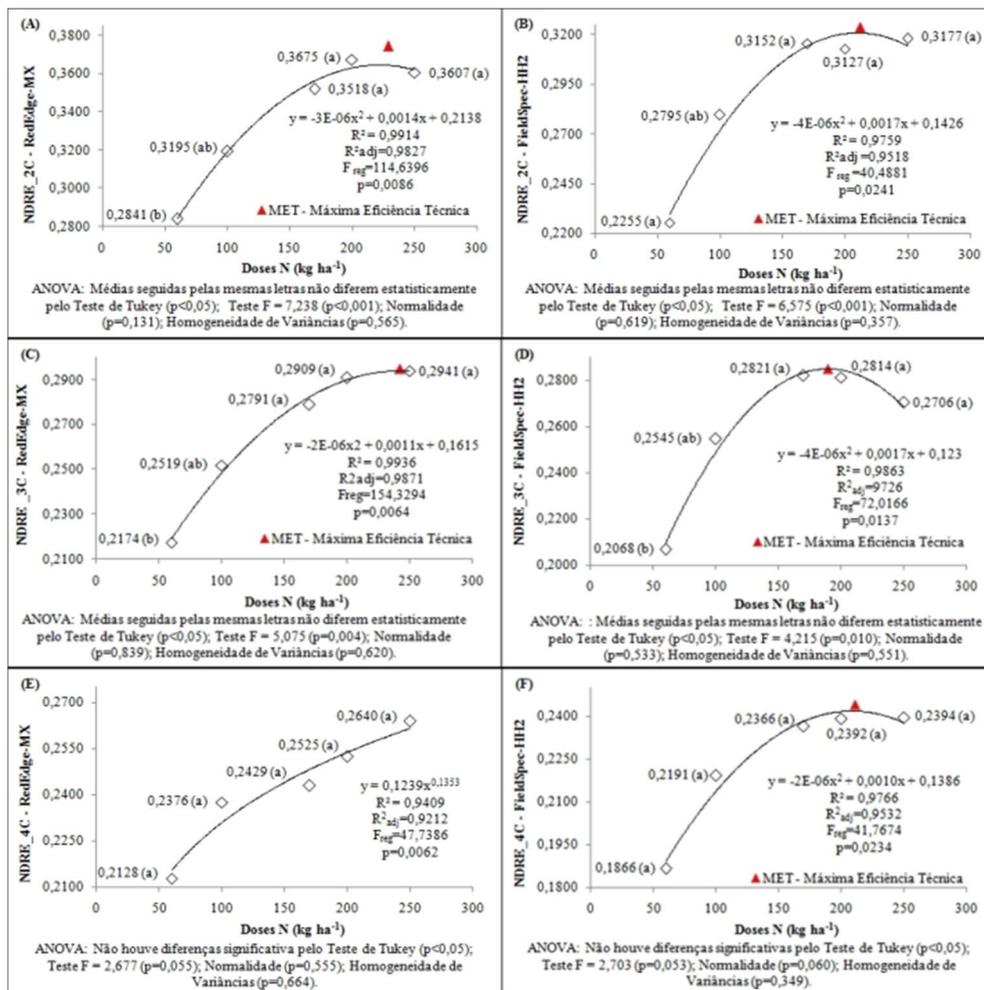


Figura 10. Relação entre doses de nitrogênio (Fontes: NPK14-16-10/Salitre do Chile - 15% de N e 18% de K) e NDRE nos estádios fenológicos 2C (A; B), 3C (C; D) e 4C (E; F) (sensor Rededge-Mx [A; C; E] e FieldSpec-HH2 [B; D; F]) em folhas de tabaco Virgínia, Agudo-RS, Brasil, safra 2021-2022.

Figure 10. Relationship between nitrogen doses (Sources: NPK14-16-10/Chilean saltpeter - 15% de N e 18% de K) and NDRE at 2C (A; B), 3C (C; D) and 4C (E; F) phenological stages (Redge-Mx [A; C; E] and FieldSpec-HH2 [B; D; F] sensor) in Virginia tobacco leaves, Agudo-RS, Brazil, 2021-2022 seasons.

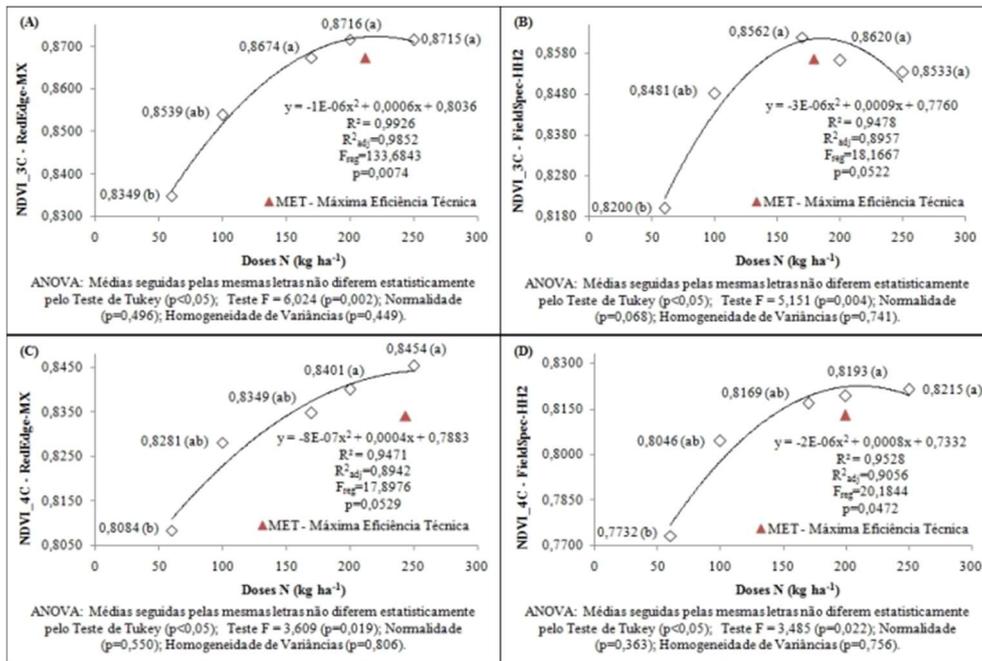


Figura 11. Relação entre doses de nitrogênio (Fontes: NPK14-16-10/Salitre do Chile - 15% de N e 18% de K) e NDVI nos estádios fenológicos 3C (A; B) e 4C (C; D) (sensor Rededge-Mx [A; C] e FieldSpec-HH2 [B; D]) em folhas de tabaco Virgínia, Agudo-RS, Brasil, safra 2021-2022.
 Figure 11. Relationship between nitrogen doses (Sources: NPK14-16-10/Chilean saltpeter - 15% de N e 18% de K) and NDVI at 3C (A; B) and 4C (C; D) phenological stages (Redge-Mx [A; C] and FieldSpec-HH2 [B; D] sensor) in Virginia tobacco leaves, Agudo-RS, Brazil, 2021-2022 seasons.

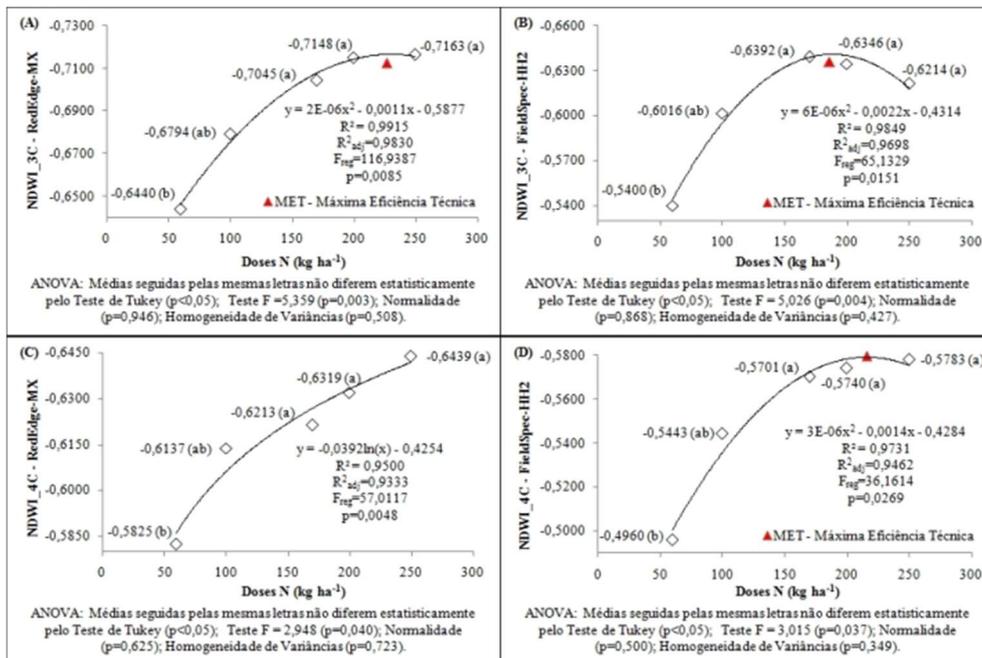


Figura 12. Relação entre doses de nitrogênio (Fontes: NPK14-16-10/Salitre do Chile - 15% de N e 18% de K) e NDWI nos estádios fenológicos 3C (A; B) e 4C (C; D) (sensor Rededge-Mx [A; C] e FieldSpec-HH2 [B; D]) em folhas de tabaco Virgínia, Agudo-RS, Brasil, safra 2021-2022.
 Figure 12. Relationship between nitrogen doses (Sources: NPK14-16-10/Chilean saltpeter - 15% de N e 18% de K) and NDWI at 3C (A; B) and 4C (C; D) phenological stages (Redge-Mx [A; C] and FieldSpec-HH2 [B; D] sensor) in Virginia tobacco leaves, Agudo-RS, Brazil, 2021-2022 seasons.

As folhas permitem maior passagem da radiação eletromagnética (REM) da faixa espectral da borda do vermelho do que na faixa do vermelho. O comprimento de ondas da REM na borda do vermelho é mais facilmente transmitido pela folha do que o vermelho ou o azul, justificando a maior eficiência deste comprimento em estádios fenológicos avançados da cultura, quando a concentração de clorofila é elevada, uma vez que a mesma absorve os comprimentos do azul e vermelho (FORMAGGIO; SANCHES, 2017). Este mesmo resultado

foi obtido para o tabaco neste trabalho (Figura 2, 3, 10, 11, 12 e 13). Após os 90 DAT, independente do sensor utilizado, o NDRE foi mais eficiente que o NDVI (Figura 11) em captar baixas doses de N aplicadas. Já o NDWI foi semelhante ao NDRE, no sentido de ser mais sensível que o NDVI. Boiarskii; Hasegawa (2019) concluíram que o NDVI seria mais eficiente para avaliar vigor e sanidade de plantas em grandes áreas, comparar densidades de semeadura, eficiência no estabelecimento da população de plantas prescrita. Já o NDRE, seria mais eficiente para captar a

relação de atributos químicos do solo, com destaque ao N, que afetam o teor de clorofila e o desenvolvimento vegetal, e, portanto, tem potencial para o desenvolvimento de algoritmos de VRN. Nosso trabalho com a cultura do Tabaco corrobora com as conclusões daqueles autores, acrescentando o NDWI como um IV também promissor.

Quanto ao teor de N absorvido, a faixa de valores foi de 1,42 a 2,01%, indicando que as doses de N aplicadas foram eficientes em criar as condições para avaliar os IV. Porém,

nas maiores doses houve queda de produtividade. Como a absorção de N pelas plantas é um processo fisiológico ativo, há um gasto energético que nem sempre é convertido em produtividade. Além, da ocorrência de desequilíbrios nutricionais associados ao excesso de absorção de N, que pode ocasionar deficiência de enxofre, boro e potássio. Ainda, pode ter ocasionado efeito salino uma vez que a fonte de N possui índice salino de 92 e concentração de 18% de sódio (MARSCHNER, 1995).

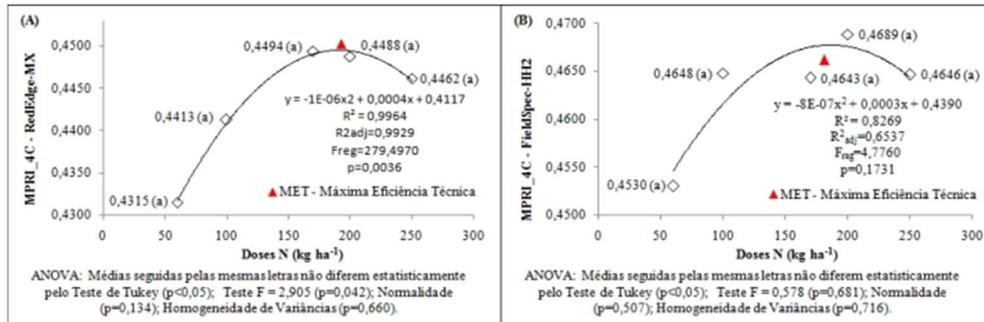


Figura 13. Relação entre doses de nitrogênio (Fontes: NPK14-16-10/Salitre do Chile - 15% de N e 18% de K) e MPRI no estágio fenológico 4C (sensor Rededge-Mx [A] e FieldSpec-HH2 [B]) em folhas de tabaco Virgínia, Agudo-RS, Brasil, safra 2021-2022.

Figure 13. Relationship between nitrogen doses (Sources: NPK14-16-10/Chilean saltpeter - 15% de N e 18% de K) and MPRI at the 4C phenological stage (Redge-Mx [A] and FieldSpec-HH2 [B] sensor) in Virginia tobacco leaves, Agudo-RS, Brazil, 2021-2022 seasons.

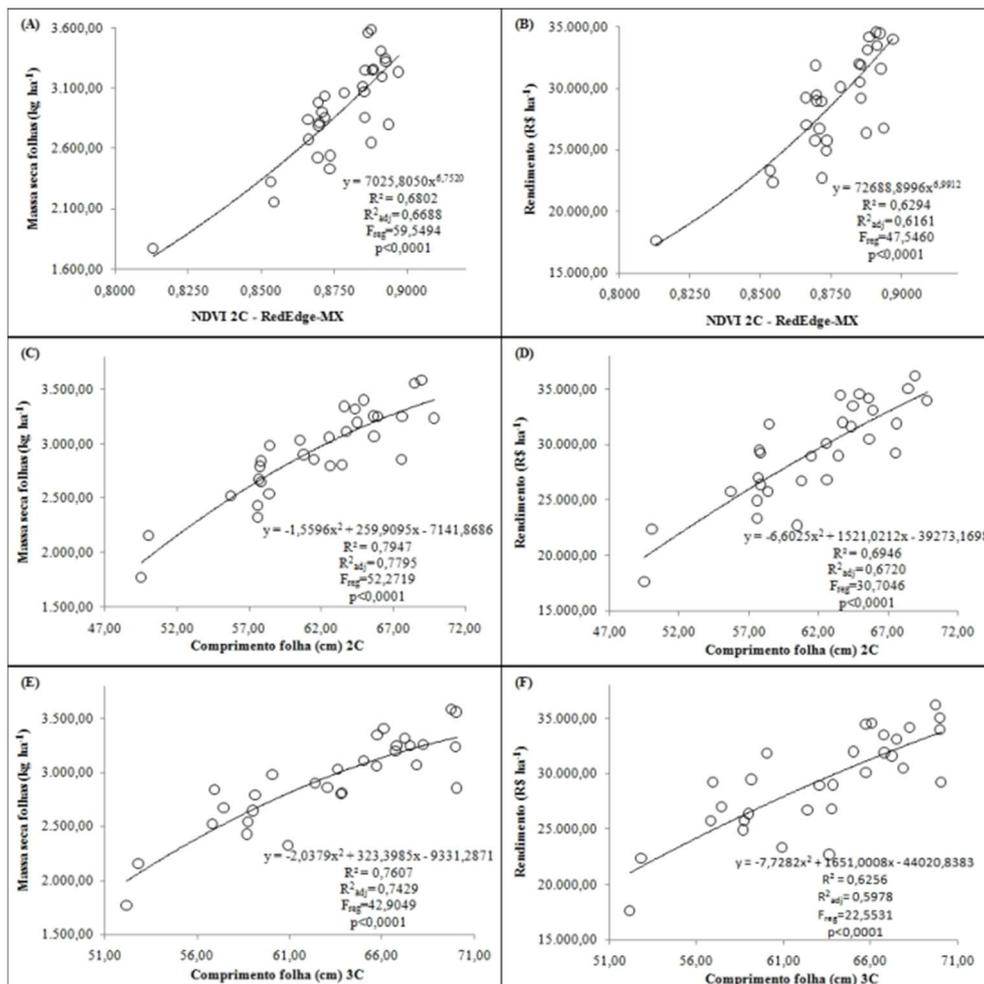


Figura 14. Relação entre massa seca (A; C; E) de folhas curadas ($kg\ ha^{-1}$) e rendimento com a comercialização ($R\$\ ha^{-1}$) [B; D; F] com NDVI (A; B) no estágio 2C (Rededge-Mx) e comprimento de folhas no estágio 2C (C; D) e 3C (E; F) em folhas de tabaco Virgínia, Agudo-RS, Brasil, safra 2021-2022.

Figure 14. Relationship between dry mass (A; C; E) of cured leaves ($kg\ ha^{-1}$) and yield on sale ($R\$\ ha^{-1}$) [B; D; F] with NDVI (A; B) at stage 2C (Rededge-Mx) and leaf length at stages 2C (C; D) and 3C (E; F) in Virginia tobacco leaves, Agudo-RS, Brazil, 2021-2022 seasons.

A maior produtividade, 3.185,22 kg ha⁻¹, foi obtida na dose de 196,98 kg N ha⁻¹ (MET) e a MEE, com o preço médio do insumo de 2,66 R\$ kg⁻¹ e o preço médio do produto de 10,03 R\$ kg⁻¹, ocorreu na dose de 193,83 kg N ha⁻¹. Viudes et al. (2018) obtiveram para o tabaco cultivado em ambiente controlado, comparando plantas transgênicas (acúmulo de prolina) *Nicotiana tabacum* L. cv. Petit Havana SR1 x plantas não modificadas, as maiores massas secas de parte aérea e total, com doses de N intermediárias e altas (100, 200 e 400 kg N ha⁻¹) e as menores massas secas com as menores doses de N (25 e 50 kg N ha⁻¹), corroborando parcialmente como o resultados obtidos, pois a campo doses baixas e altas de N proporcionaram perdas de produtividade, qualidade e rendimento de folhas (Figuras 4, 7, 8 e 9). Os autores observaram que o crescimento das plantas estabilizou a partir da dose de 200 kg N ha⁻¹.

Na região da Depressão Central RS, em áreas de baixa altitude, quando a colheita do tabaco é realizada em janeiro/fevereiro se tem um problema, devido à maior quantidade de horas de sol e às altas temperaturas que se tem nesses meses, o que provoca a queima das folhas ainda na planta, levando a perda de qualidade, além da questão da exaustão do trabalhador para executar a colheita em altas temperaturas (HEEMANN, 2009), fato que levou a realização das seis colheitas antes do pico de insolação que ocorrem geralmente em meados de janeiro.

As doses de N utilizadas no experimento foram adequadas para obter variabilidade de respostas de produtividade e renda, estando de acordo com outras pesquisas realizadas anteriormente. Endres (2018) testou doses de N de 0 a 260 kg N ha⁻¹, aplicadas com ureia, com e sem inoculação de *Rhizobium clarum*, em experimentos de lavoura com o tabaco Burley cultivar BAT2101, em Iraceminha-SC e Cruz Machado-PR. As doses de N investigadas induziram diferenças de produtividade de tabaco, corroborando com o observado em nosso trabalho. Já para o manejo, as duas formas de manejo utilizadas não apresentaram diferença estatística significativa conforme indicaram as análises de variâncias e delineamento bifatorial realizadas com as variáveis mais relevantes ao experimento, apontadas pelos resultados da análise fatorial realizada.

As médias de massa seca de folhas curadas oscilaram de 2.423,00 a 3.220,40 kg ha⁻¹, valores superiores aos observados por Vidal (2016) que obteve 1728,50 kg ha⁻¹ em cultivo de tabaco em Agudo-RS, que utilizou técnicas de agricultura de precisão para realizar correção e fertilização do solo, e Cremonesi et al. (2019) no cultivo do híbrido Virgínia 405 em Irati-PR, com valores de massa seca de folhas de 1.958,50 kg ha⁻¹, que correspondeu à 61,30% da massa total das plantas inteiras, resguardando o fato que este valor foi obtido a partir de folhas secas em estufa de circulação de ar forçada à 65°C até estabilizar a massa. Os autores ainda observaram que as maiores taxas de acúmulo de massa seca de planta, folhas e caule ocorreram em até 60 DAT de mudas a campo, apresentaram um comportamento decrescente do início ao fim do ciclo de produção.

Quanto ao rendimento do tabaco, a partir da dose de 170 kg N ha⁻¹, com acréscimo de 30 kg de N ha⁻¹, houve perda de rendimentos de 1.267,00 R\$ ha⁻¹. Já com acréscimo de 50 kg de N ha⁻¹, houve perda de 3.288,80 R\$ ha⁻¹. Em comparação, entre as doses de 170 e 200 kg N ha⁻¹, foi observado que não houve diferença significativa. Mas estas diferenças de valores pagariam custos importantes da lavoura. Com a dose de N

praticada pelo agricultor (200 kg ha⁻¹), por exemplo, com o valor da perda, 1.267,00 R\$ ha⁻¹, se pagaria 100% da conta de energia elétrica para a cura do tabaco (\cong 1.120,00 R\$ ha⁻¹) ou 100% da lenha necessária para abastecer a estufa (\cong 1.050,00 R\$ ha⁻¹) ou até mesmo 48,78% do arrendamento de terras (\cong 2.597,07 R\$ ha⁻¹), insumos necessários para o plantio do tabaco. Quanto à adubação nitrogenada, essa perda pagaria também 39,10% do N para as aplicações de cobertura da safra corrente (\cong 3.240,00 R\$ ha⁻¹). O menor rendimento de tabaco foi observado na dose de 183 kg N ha⁻¹.

Estes resultados indicam que a fertilização nitrogenada na cultura do Tabaco deve ser feita com elevada precisão, pois existe resposta com alto retorno econômico, que nesta pesquisa foi de \cong R\$ 8.360,00. Porém, quando o N é aplicado em excesso, pode apresentar um decréscimo de retorno econômico de \cong R\$ 1.270,00 (Figura 9). Assim, justifica-se que a utilização de ferramentas de AP, com o uso de sensoriamento do dossel vegetativo e VRN, seja desenvolvido para a cultura.

Porém, existe um limitante a ser entendido e superado pela pesquisa. O tabaco tem suas mudas produzidas em viveiros, com uso de adubo de liberação lenta e diversas podas das mudas, com o objetivo de reduzir seu porte e retê-las mais tempo no viveiro até que tenha condições adequadas para transplante a campo (FOPPA et al., 2017). Estes tratamentos podem influenciar no crescimento e desenvolvimento da muda a campo, e poderá retardar, por exemplo, a resposta em relação à adubação nitrogenada de plantio e em cobertura, alterando também a relação com o IV, devido à supressão de vigor com as podas e a liberação lenta de N pelo adubo presente no substrato e não, em um primeiro momento, das fontes de N adicionadas ao solo. Provavelmente isso explique o porquê das relações entre doses de N e IV (Figuras 10, 11, 12 e 13) e do NDVI com produtividade e rendimento (Figura 14A e 14B) terem ocorrido em estádios fenológicos mais tardios, a partir da segunda colheita, momento posterior ao término das adubações nitrogenadas de cobertura na cultura do tabaco.

5. CONCLUSÕES

As aplicações da Agricultura de Precisão na cultura do tabaco, com redução de doses de nitrogênio tradicionalmente aplicadas pelo agricultor, resultaram em maior produtividade, qualidade de folhas e renda.

O tratamento com melhor desempenho foi obtido com a dose de 170 kg N ha⁻¹ combinado com princípios de agricultura de precisão e boas práticas de manejo (PAPBPM), ou seja, com correção parcial do solo e recomendação de N indicada pelo Manual ROLAS RS/SC. Observou-se o tratamento com menor desempenho com a dose de 60 kg N ha⁻¹, denominado "Faixa Pobre", com o mesmo tipo de manejo.

Com tudo, os manejos não obtiveram diferenças significativas quando avaliadas as variáveis índices de vegetação, massa seca e rendimento. As doses de N utilizadas foram adequadas para obter variabilidade de respostas de produtividade e rendimento, sendo o fator que gerou diferenças significativas no experimento.

Os agricultores estão acertando na tomada de decisão em parte do processo quanto à adubação nitrogenada em cobertura para a cultura do tabaco. É indicado não utilizar subdosagens de N, pois elas promovem maiores perdas de

produtividade, qualidade e rendimento. No entanto, falta precisão de ajuste no uso das doses necessárias de N, para encontrar a máxima eficiência técnica, que esta pesquisa mostrou estar entre a recomendação técnica de 170 kg N ha⁻¹, indicada pelo Manual ROLAS RS/SC, e as dosagens utilizadas pelos agricultores (200 – 250 kg N ha⁻¹). Esta situação gera oportunidade para o desenvolvimento de ferramentas de agricultura de precisão que atendam esta demanda. Mas a pesquisa precisa continuar realizando experimentação e evoluir em certas etapas para alcançar este objetivo.

Os IV NDRE e NDWI mostraram-se eficientes em detectar o estado nutricional em nitrogênio nas folhas de tabaco Virgínia, induzidos por doses de nitrogênio aplicadas via fertilização mineral. Estes IV tem potencial de serem utilizados em algoritmos visando à prescrição de taxa variável de nitrogênio na cultura do tabaco. Já o NDVI e o comprimento de folhas podem ser usados para estimar produtividade e rendimento.

A cultura do tabaco por ser muito sensível a deficiência de nitrogênio e também ao excesso deste nutriente, com reflexos tanto na produtividade quanto na qualidade das folhas produzidas e renda, o que justifica a utilização de ferramentas da agricultura de precisão e digital para o aprimoramento da prescrição da dose de nitrogênio evitando deficiências e excessos na fertilização, bem como perda de rendimento (R\$ ha⁻¹) e problemas ambientais por uso excessivo de N.

6. REFERÊNCIAS

- AFUBRA_Associação dos Fumicultores do Brasil. **Fumicultura no Brasil. Fumicultura regional**, 2022. Disponível em: <<https://afubra.com.br/fumicultura-brasil.html>>. Acessado em: 22 Dez. 2022.
- BARNES, E. M.; CLARKE, T. R.; RICHARDS, S. E.; COLAIZZI, P. D.; HABERLAND, J.; KOSTRZEWSKI, M.; WALTER, P.; CHOI, C.; RILEY, E.; THOMPSON, T.; LASCANO, R. J.; LI, H.; MORAN, M. S. Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground-based multispectral data. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 5. **Proceedings...** 2000. 15p. Disponível em: https://www.tucson.ars.ag.gov/unit/publications/PDF_files/1356.pdf
- BIZARI, F. G. T. **O uso de Veículos Aéreos Não Tripulados na Agricultura de Precisão**. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE TECNOLOGIA EM AGRONEGÓCIO, 7. **Anais...** Jales, 2016.
- BOIARSKII, B.; HASEGAWA, H. Comparison of NDVI and NDRE to detect differences in vegetation and chlorophyll content. **Journal of Mechanics of Continua and Mathematical Sciences**, Special Issue, n. 4, p. 20-29, 2019. <https://doi.org/10.26782/jmcms.spl.4/2019.11.00003>
- BREDEMEIER, C.; VIAN, A. L.; PIRES, J. L. F. Aplicação de nitrogênio em tempo real: modelos e aplicações. In: SANTI, A. L.; GIOTTO, E.; SEBEM, E.; AMADO, T. J. C. **Agricultura de Precisão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria: CESPOL, 2016. 309p.
- CARVALHO, L. F. D.; AMADO, T. J. C.; CARDOSO SOBRINHO, J.; AMARAL, J. P.; POTT, L. P.; PICCIN, M.; PEDRON, V. F. Nutritional status of corn plants estimated through different vegetation Indices in the growth stages. **Engenharia na Agricultura**, v. 28, p. 255-264, 2020. <https://doi.org/10.13083/reveng.v28i.8564>
- CASTRO JORGE, L. A.; INAMASU, R. Y. Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) em agricultura de precisão. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. **Agricultura de Precisão: resultado de um novo olhar**. Brasília: EMBRAPA, 2014. 596p. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/114264/1/CAP-8.pdf>>. Acessado em: 23 Ago. 2023.
- CHANGEUX, J. P.; AMOURA, Z.; REY, F. A.; MIYARA, M. **A nicotinic hypothesis for Covid-19 with preventive and therapeutic implications**. 2020. Acessado em: 17 Ago. 2021. <https://doi.org/10.5802/crbiol.8>
- CQFS_Comissão de Química e Fertilidade do Solo - RS/SC. **Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. Viçosa: SBCS, 2016. 376p. Disponível em: https://www.sbcs-nrs.org.br/docs/Manual_de_Calagem_e_Adubacao_para_os_Estados_do_RS_e_de_SC-2016.pdf
- CREMONESI, M. V.; RAMALHO, B.; GOLFETTO, P.; KREPKE, L. S.; PAULETTI, V. Marcha de absorção, taxa de acúmulo e exportação de micronutrientes e alumínio pelo tabaco (*Nicotiana tabacum* L.). **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 18, n. 1, p. 13-23, 2019. <https://doi.org/10.5965/223811711812019013>.
- ENDRES, G. F. **Efeito da colonização com fungos micorrízicos arbusculares (Rhizophagus Clarus) na produtividade de plantas de tabaco (Nicotiana Tabacum) submetidas a diferentes doses de adubação nitrogenada**. 61p. Dissertação [Mestrado em Microbiologia Agrícola e do Ambiente] - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.
- FOPPA, C. L.; TACCA, D.; MITTMANN, G.; MOURA, J. S.; KELIN, C. Crescimento inicial da cultura do tabaco (*Nicotiana tabacum* L.) em diferentes substratos. **Anuário Pesquisa e Extensão Unoesc São Miguel do Oeste**, v. 2, p. 1-9, 2017.
- FORMAGGIO, A. R.; SANCHES, I. D. **Sensoriamento Remoto em Agricultura**. São José dos Campos: Oficina de Textos, 2017. 49p.
- HEEMANN, F. **O cultivo do fumo e condições de saúde e segurança dos trabalhadores rurais**. 170p. Dissertação [Mestrado em Engenharia de Produção] - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- HOFFMANN, J. P. Agricultura Familiar: Agricultura de precisão na pequena propriedade. **Revista A Granja**, abril de 2015. Disponível em: <<https://edcentaurus.com.br/agranja/edicao/796/mat-eria/6831>>. Acessado em: 13 Mar. 2020.
- INCA_Instituto Nacional do Câncer. Disponível em: <<https://www.inca.gov.br/observatorio-da-politica-nacional-de-controle-do-tabaco/consumo-cigarros-capita>>. Acesso em: 17 de julho de 2020.
- KNIES, A. E.; CARLESSO, R.; PETRY, M. T.; OLIVEIRA, Z. B.; DUBOU, V.; GASEL, L. F. Caracterização do desenvolvimento da cultura do tabaco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 17. 2011, Guarapari/ES. **Anais...** Santa Maria: SBAGRO,

2011. p. 1 - 5. Disponível em: <https://www.sbagro.org/files/biblioteca/3501.pdf>
- MANLY, B. F. J.; ALBERTO, J. A. N. **Métodos estatísticos multivariados**: uma introdução. 4 ed. Porto Alegre: Bookman, 2019. 254p.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. San Diego: Academic Press, 1995. 888p.
- McFEETRS, S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. 1996. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 7, p. 1425-1432, 2007. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- MEDEIROS, F. A.; ALONÇO, A. S.; BALESTRA, M. R. G.; DIAS, V. O.; LANDERHAL JÚNIOR, M. L. Utilização de um veículo aéreo não tripulado em atividades de imageamento georreferenciado. **Ciência Rural**, v. 38, n. 8, 2008, p. 2375-2378. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782008000800046>
- MINOLTA, C. C.; Ltda. **Manual forchlrophyll meter SPAD 502**. Osaka, Minolta, Radiometric Instruments divisions. 1989. 22p.
- MOGHIMI, A.; POURREZA, A.; ZUNIGA-RAMIREZ, G.; WILLIAMS, L. E.; FIDELIBUS, M. W. A novel machine learning approach to estimate grapevine leaf nitrogen concentration using aerial multispectral imagery. **Remote Sensing**, v. 12, n. 31, e3515, 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12213515>
- MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS**. Descrição, fundamentos e aplicações. 2 ed. São Paulo: Editora Unesp, 2008. 476p.
- ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D.W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. **Earth Resources Technology Satellite – 1 Symposium**, 3, 1973. **Proceedings...** 1973, v. 1, Sec. A, p. 309-317. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614>
- SALLA, L.; RODRIGUES, J. C.; MARENCO, R. A. Teores de clorofila em árvores tropicais determinados com o SPAD-502. **Revista Brasileira de Biociências**, v. 5, supl. 2, p. 159-161, 2007.
- SRINIVASAN, A. Precision Agriculture: An overview. In: SRINIVASAN, A. (Ed.) **Handbook of precision agriculture**, Principles and applications. Boca Raton: CRC Press, 2009. 16p.
- SOUZA CRUZ. **Impacto e Importância econômica**, 2016. Disponível em: http://www.souzacruz.com.br/group/sites/SOU_7U VF24.nsf/vwPagesWebLive/DO7V9>. Acesso em: 15 de janeiro de 2021.
- STRECK, E. V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; GIASSON, E.; SPINELLI PINTO, L. F.; FLORES, C. A.; SCHNEIDER, P. **Solos do RS**. 3. ed., rev. e ampl. Porto Alegre: Emater/RS, 2018. 252p.
- TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEM, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2 ed. Porto Alegre, Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1995. 174p. (Boletim Técnico de Solos, 5)
- VICINI, L.; SOUZA, A. M.; MORALES, F. E. C.; SOUZA, F. M. **Técnicas Multivariadas Exploratórias: teorias e aplicações no software Statística®**. Santa Maria: UFSM, 2018. 240p.
- VIDAL, L. R. **Aplicação de técnica de agricultura de precisão em áreas do cultivo do fumo na agricultura familiar**. 104p. Dissertação [Mestrado em Agricultura de Precisão] - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.
- VIUDES, E. B.; SILVA, F. L. B.; RIBAS, A. F.; VIEIRA, L. G. E.; SANTOS, C. H.; PACHECO, A. C. Eficiência do uso de nitrogênio em plantas transgênicas de tabaco com alto acúmulo de prolina. **Colloquium Agrariae**, v. 14, n. 4, p. 67-79, 2018. <https://doi.org/10.5747/ca.2018.v14.n4.a250>
- YANG, Z.; WILLIS, P.; MUELLER, R. Impact of Band-Ratio Enhanced AWIFS image to crop classification accuracy. in: pecora - the future of land imaging. In: GOING OPERATIONAL, 17. Colorado, USA. **Proceedings...** Maryland: ASPRS, 2008. Disponível em: <http://www.asprs.org/a/publications/proceedings/pe cora17/0041.pdf>>. Acesso em: 24 de abril de 2022.
- ZAMPIERE, A. G. **As plantas de tabaco podem ser os medicamentos do futuro**. Motherboard Techby Vice. 2015. Disponível em: <https://www.vice.com/pt/article/gvdxn7/as-plantas-de-tabaco-podem-ser-os-medicamentos-do-futuro>>. Acesso em: 15 de agosto de 2020.

Agradecimentos: Ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura de Precisão (PPGAP/UFSM), ao Colégio Politécnico da UFSM e ao Projeto Aquarius/UFSM.

Contribuição dos autores: A.L.S. – Financiamento da pesquisa, coleta e análise de dados, redação de texto (esboço original, revisão e edição); L.P.A. – Orientador, conceituação, metodologia, coleta e análise de dados, revisão de texto, disponibilidade da RPA; R.A.F. – Coleta de dados, revisão de texto; L.P.K. – Co-orientador, revisão e edição de texto, análise de dados; T.J.C.A. – Disponibilidade do sensor multiespectral RedEdge-Mx e clorofilômetro, revisão de texto, revisão de texto especializada quanto ao Nitrogênio; análise de do teor N nas folhas de tabaco. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Financiamento: Apoio do Projeto de Pesquisa de Extensão n. 053943 – “Adoção de agricultura de precisão na cultura do tabaco na Quarta Colônia, Rio Grande do Sul”.

Revisão por comitê institucional: Não se aplica.

Comitê de Ética: Não se aplica.

Disponibilização de dados: Os dados do estudo podem ser obtidos mediante solicitação, via e-mail, ao autor correspondente.

Conflito de Interesse: Os autores declaram que não existem conflitos de interesse com outros pesquisadores ou instituições.