

APLICAÇÃO TARDIA DE UREIA NO FEIJOEIRO: FOTOSÍNTESE E NUTRIÇÃO  
NITROGENADA

por

REBECA MARTINS DA SILVA FERNANDES DE OLIVEIRA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Bioenergia e Grãos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Bioenergia e Grãos.

Rio Verde – GO  
Novembro – 2024

APLICAÇÃO TARDIA DE UREIA NO FEIJOEIRO: FOTOSSÍNTESE E NUTRIÇÃO  
NITROGENADA

por

REBECA MARTINS DA SILVA FERNANDES DE OLIVEIRA

Comitê de Orientação:

Prof. Dr Aurélio Rubio Neto – IF Goiano Rio Verde

Prof. Dr Carlos Ribeiro Rodrigues – IF Goiano Rio Verde



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 108/2024 - SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO**

**ATA Nº 101 (CENTO E UM)**

**BANCA EXAMINADORA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO**

Aos dezanove dias do mês de novembro do ano de dois mil e vinte e quatro, às 08h00min (oito horas), reuniram-se os componentes da banca examinadora em sessão pública realizada na sala de videoconferência do Pavilhão da Pesquisa e Pós-Graduação, para procederem a avaliação da defesa de Dissertação, em nível de mestrado, de autoria de **REBECA MARTINS DA SILVA FERNANDES DE OLIVEIRA**, discente do Programa de Pós-Graduação em Bioenergia e Grãos do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A sessão foi aberta pelo presidente da Banca Examinadora, Prof. Dr. Aurélio Rubio Neto, que fez a apresentação formal dos membros da Banca. A palavra, a seguir, foi concedida à autora da Dissertação que, em 30 min, procedeu a apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu a examinada, tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação da defesa. Tendo-se em vista as normas que regulamentam o Programa de Pós-Graduação em Bioenergia e Grãos, e procedida às correções recomendadas, a Dissertação foi APROVADA, considerando-se integralmente cumprido este requisito para fins de obtenção do título de **MESTRE EM BIOENERGIA E GRÃOS**, na área de concentração Agroenergia, pelo Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A conclusão do curso dar-se-á quando da entrega na secretaria do PPGBG da versão definitiva da Dissertação, com as devidas correções. Assim sendo, a defesa perderá a validade, se não cumprida essa condição, em até **60 (sessenta) dias** da sua ocorrência. A Banca Examinadora recomendou a publicação dos artigos científicos oriundos dessa Dissertação em periódicos de circulação nacional e/ou internacional, após procedida as modificações sugeridas. Cumpridas as formalidades da pauta, a presidência da mesa encerrou esta sessão de defesa de Dissertação de Mestrado, e para constar, foi lavrada a presente Ata, que, após lida e achada conforme, será assinada eletronicamente pelos membros da Banca Examinadora.

Membros da Banca Examinadora

Nome	Instituição	Situação no Programa
Aurélio Rubio Neto	IF Goiano – Campus Rio Verde	Presidente
Carlos Ribeiro Rodrigues	IF Goiano – Campus Rio Verde	Membro externo
Alisson Fernando Chiorato	Instituto Agronômico de Campinas	Membro externo



## TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

### IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- |  |   |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese (doutorado)                            | <input type="checkbox"/> Artigo científico              |
| <input checked="" type="checkbox"/> Dissertação (mestrado)           | <input type="checkbox"/> Capítulo de livro              |
| <input type="checkbox"/> Monografia (especialização)                 | <input type="checkbox"/> Livro                          |
| <input type="checkbox"/> TCC (graduação)                             | <input type="checkbox"/> Trabalho apresentado em evento |
| <input type="checkbox"/> Produto técnico e educacional - Tipo: _____ |   |

Nome completo do autor: Rafaela M. S. F. de Oliveira Matrícula: 202220233154004

Título do trabalho: Aplicação da teoria de ureia no feijão: fotossíntese e mineração integridade

### RESTRICÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial:  Não  Sim, justifique:

\_\_\_\_\_

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 20/04/25

O documento está sujeito a registro de patente?  Sim  Não

O documento pode vir a ser publicado como livro?  Sim  Não

### DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Rafaela \_\_\_\_\_     
Local Data

Rafaela  
Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

Arnelio Ruy Nób  
Assinatura do(a) orientador(a)

APLICAÇÃO TARDIA DE UREIA NO FEIJOEIRO: FOTOSÍNTESE E NUTRIÇÃO  
NITROGENADA

por

REBECA MARTINS DA SILVA FERNANDES DE OLIVEIRA

Orientador: Prof. Dr Aurélio Rubio Neto

Co-orientador: Prof. Dr Carlos Ribeiro Rodrigues

Examinadores:

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do  
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBI**

O48 Martins da Silva Fernandes de Oliveira, Rebeca  
APLICARÇÃO TARDIA DE UREIA NO FEJJOEIRO:  
FOTOSSÍNTESE E NUTRIÇÃO NITROGENADA / Rebeca  
Martins da Silva Fernandes de Oliveira. Rio Verde 2024,  
39f. il.  
Orientador: Prof. Dr. Aurélio Rubio Neto.  
Coorientador: Prof. Dr. Carlos Ribeiro Rodrigues.  
Dissertação (Mestre) - Instituto Federal Goiano, curso de  
0233154 - Mestrado Profissional em Bioenergia e Grãos -  
Integral (Campus Rio Verde).  
1. Adubação tardia. 2. análise fotoquímica. 3. adubação  
nitrogenada. I. Título.

## DEDICATÓRIA

Dedico esta conquista à minha família, minha grande fonte de inspiração.

## AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia Goiano Campus Rio Verde por intermédio de meu orientador no PPGBG o Prof. Dr Aurélio Rubio Neto por todas as oportunidades ofertadas em prol de meu desenvolvimento acadêmico e sobretudo humano.

Ao grupo de pesquisa Life Soil coordenado pelo Prof. Dr Carlos Ribeiro Rodrigues por todo o apoio, suporte e ensinamentos prestados durante minha jornada acadêmica e profissional na graduação e pós-graduação.

A Marambaia Sementes por todo o apoio financeiro e estrutural prestados durante a idealização e condução do presente estudo.

## SUMÁRIO

RESUMO.....	
ABSTRACT.....	
1. INTRODUÇÃO.....	
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	
2.1 Importância do Feijoeiro comum ( <i>Phaseolus vulgaris</i> L.) no Mundo, Brasil e Goiás.....	
2.2 Adubação Nitrogenada no Feijoeiro.....	
2.3 Importância da adubação nitrogenada na produção do feijoeiro.....	
2.4 Dose.....	
2.5 Período de aplicação e efeito da adubação nitrogenada na fase vegetativa e na reprodutiva.....	
2.6 Fotossíntese.....	
2.7 Pigmentos Fotossintetizantes.....	
2.8 Fluorescência de Clorofila.....	
2.9 Formação e enchimento de vagens e grãos.....	
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	
5. CONCLUSÃO.....	
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	

# APLICAÇÃO TARDIA DE UREIA NO FEIJOEIRO: FOTOSÍNTESE E NUTRIÇÃO NITROGENADA

por

REBECA MARTINS DA SILVA FERNANDES DE OLIVEIRA

(Sob orientação do Professor. Dr. Aurélio Rubio Neto - IF Goiano Rio Verde)

## RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência da adubação nitrogenada na cultura do feijoeiro em função da época de aplicação. O experimento foi realizado a campo em faixa. As faixas tinham 32 x 450 m de comprimento. O delineamento experimental ocorreu em faixas com quatro tratamentos, com doses de nitrogênio aplicadas nos estádios V7 e R8 (90 e 40; 70 e 60; 50 e 80; 30 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, respectivamente). Dentro de cada faixa, foram realizadas quatro avaliações aleatoriamente. Sete dias após a aplicação da dose no estádio V7, foram realizadas avaliações dos teores foliares de N, índices de clorofila *a*, *b* e total, índices de fluorescência de clorofila, fotossíntese e número de vagens maior e menor que 40 mm. Sete dias após a aplicação, no estádio R8, foram realizadas as avaliações dos teores foliares de N, índices de clorofila *a*, *b* e total, índices de fluorescência de clorofila. Na colheita, foram avaliados: altura das plantas, número de vagens maior e menor que 40 mm, produtividade de grãos, peso de mil grãos, teor de N nos grãos e exportação de N. Os dados foram submetidos à análise de variância e teste de média Tukey (5% de probabilidade). No estádio vegetativo, baixas doses de N proporcionaram maior número de vagens do feijoeiro cv. Veloz no início do estado reprodutivo, com maior fotossíntese líquida, o que contrasta com menores índices de eficiência fotoquímica. Já nesse estádio, a maior dose de N, além de proporcionar plantas com menor número de vagens, houve, também, menor fotossíntese líquida e aumento nas concentrações de N amoniacal do tecido vegetal. No estádio reprodutivo, R8, as plantas adubadas com 80 kg ha<sup>-1</sup> de N obtiveram a maior eficiência no transporte de elétrons pelo fotossistema, a maior eficiência quântica do fotossistema e o melhor estado nutricional nitrogenado, ou seja, os maiores teores foliares de N. Com os resultados, pode-se concluir que, com a aplicação de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N em V7 e 80 kg ha<sup>-1</sup> de N, em R8, foram obtidas as maiores produtividades de grãos do feijoeiro cv. Veloz o que é justificado pela maior eficiência fotoquímica e menor perda de vagens formadas.

PALAVRAS-CHAVE: Nitrogênio, Clorofila *a* e *b*, Fluorescência de Clorofila *a*, Fotossíntese, Adubação Nitrogenada, *Phaseolus vulgaris* L. cv. Veloz

LATE APPLICATION OF UREA IN COMMON BEAN: PHOTOSYNTHESIS AND  
NITROGEN NUTRITION

by

REBECA MARTINS DA SILVA FERNANDES DE OLIVEIRA

(Under the Guidance of Professor. Dr Aurélio Rubio Neto-IF Goiano Rio Verde)

ABSTRACT

The study aimed to evaluate the efficiency of nitrogen fertilization in common bean (*Phaseolus vulgaris*) cultivation based on the timing of application. The field experiment was conducted in strips, each measuring 32 x 450 meters. The experimental design included four treatments with different nitrogen doses applied at the V7 and R8 growth stages (90 and 40; 70 and 60; 50 and 80; 30 and 100 kg ha<sup>-1</sup> of N, respectively). Within each strip, four evaluations were randomly conducted. Seven days after the application of the dose at the V7 stage, evaluations were conducted on leaf N content, chlorophyll *a*, *b*, and total indices, chlorophyll fluorescence indices, photosynthesis, and the number of pods greater and smaller than 40 mm. Seven days after the application at the R8 stage, evaluations were conducted on leaf N content, chlorophyll *a*, *b*, and total indices, and chlorophyll fluorescence indices. At harvest, plant height, the number of pods greater and smaller than 40 mm, grain yield, thousand grain weight, grain N content, and N export were evaluated. Data were subjected to analysis of variance and Tukey's mean test (5% probability). In the vegetative stage, lower N doses provided a higher number of pods in the common bean cv. Veloz at the beginning of the reproductive stage, resulting in higher net photosynthesis, which contrasts with lower photochemical efficiency indices. In this stage, the highest N dose not only resulted in plants with fewer pods but also in lower net photosynthesis and increased ammoniacal N concentrations in plant tissues. At the reproductive stage (R8), plants fertilized with 80 kg ha<sup>-1</sup> of N achieved the highest efficiency in electron transport through the photosystem, the highest quantum efficiency of the photosystem, and the best nitrogen nutritional status, evidenced by higher leaf N content. The results suggest that applying 50 kg ha<sup>-1</sup> of N at V7 and 80 kg ha<sup>-1</sup> of N at R8 resulted in the highest grain yields for the common bean cv. Veloz, justified by higher photochemical efficiency and lower loss of formed pods.

KEY WORDS: Nitrogen, Chlorophyll *a* and *b*, Chlorophyll *a* Fluorescence, Photosynthesis, Nitrogen Fertilization, *Phaseolus vulgaris* L. cv. Veloz

## INTRODUÇÃO

O feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma planta herbácea anual, altamente polimórfica, de metabolismo fisiológico do tipo C3, sendo considerada a leguminosa mais importante para o consumo humano (FAGERIA et al., 2015; SINGH; DUKARIYA; KUMAR, 2020). O feijoeiro se desenvolve de maneira satisfatória em todo o território brasileiro (CAMPOS, 2024) e pode ser cultivado em três safras durante o ano, sendo a primeira a “safra das águas” (verão); a segunda é a “safra da seca”; e a terceira é chamada de “safra de inverno” (OLIVEIRA; WANDER, 2023).

O feijoeiro é uma planta exigente em nutrientes, com alta demanda por nitrogênio (N) e a quantidade de fertilizantes nitrogenados depende da época de plantio, da quantidade e do tipo de resíduo deixado na superfície do solo pela cultura anterior e da expectativa de produtividade de grãos, que varia entre 60 e 150 kg ha<sup>-1</sup> de nitrogênio (FILHO, 2020; MARANHÃO, 2019).

A absorção de nitrogênio ocorre em praticamente durante todo o ciclo da cultura, mas a época de maior exigência, quando a velocidade de absorção é máxima, ocorre dos 35 aos 50 dias da emergência da planta, coincidindo com a época do florescimento, período em que a planta absorve de 2,0 a 2,5 kg ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> de N (BRITO; MURAOKA; DA SILVA, 2009; ROSOLEM; MARUBAYASHI, 1994). Quase 60% de todo o N mineral acumulado pelo feijoeiro ocorre entre o florescimento e o estágio de enchimento de grãos (HUNGRIA; NEVES; VICTORIA, 1985).

Na fase de enchimento de grãos do feijoeiro, ocorre uma alta taxa de remobilização do N para os grãos. Se nessa fase não houver disponibilidade de N no solo, as folhas do feijoeiro podem entrar em senescência precoce, reduzindo drasticamente a atividade fotossintética (PORTES, 1996). Em função disso se espera que a aplicação tardia do N na cultura do feijoeiro possa trazer maior eficiência de uso do nutriente.

A aplicação de 50% do N (60 kg ha<sup>-1</sup>) na fase de enchimento de grãos (R6) no feijoeiro (linhagem CNFC 16242) aumentou o número de vagens por planta, ou seja, reduziu a perda de vagens (MARQUES DA SILVEIRA et al., 2023). Todavia, o acúmulo de nutrientes e a capacidade de redistribuição pode variar entre cultivares de feijoeiro (SILVA; MOREIRA, 2022). Para cultivares modernas como Alvorada e Perola, foi possível a obtenção de produtividades de 2.500 a 3.800 kg ha<sup>-1</sup> de grãos com acúmulo de 113 kg ha<sup>-1</sup> de N, com 65% desse total acumulado nos grãos (PEREZ et al., 2013; SORATTO et al., 2013). Cultivares de ciclo determinado, crescimento Tipo I (TAA Gol e BRS FC104), de maneira geral, apresentaram maior produtividade, extração e exportação de nutrientes, quando comparadas a cultivares de

ciclo indeterminado (Tipo II e III) (BRS Estilo, BRSMG Uai, IPR Tuiuiú, BRSMG Marte, Pérola e TAA Dama) (SILVA et al., 2024).

Para a cultivar IAC Veloz, por ser nova, lançada em 2018 (CHIORATO et al., 2020), há pouca informação quanto à época e à dose de N a ser aplicada. A cultivar IAC Veloz possui ciclo precoce, porte ereto (Tipo I), peso de 1.000 sementes de 220 gramas e potencial médio de produtividade de 3.770 kg ha<sup>-1</sup> (CHIORATO et al., 2020). Quando comparada com outras cultivares de ciclo precoce (IAC Polaco e IAC Nuance) a cultivar IAC Veloz foi a que mais respondeu à adubação nitrogenada com aplicação de 60 kg ha<sup>-1</sup> de N nos estádios V3, V4 e R5, obtendo 16 vagens planta<sup>-1</sup>, 218,58 g 1000 grãos<sup>-1</sup> e produtividade de grãos de 2.760,6 kg ha<sup>-1</sup> (DE OLIVEIRA et al., 2023).

Como uma parte do metabolismo do N ocorre dentro dos cloroplastos, toda alteração na disponibilidade de N para o feijoeiro pode influenciar diretamente a fotossíntese (ANTAL et al., 2010). O primeiro composto de carbono a conter o N após o processo de assimilação é o glutamato, precursor de clorofila (HAWKESFORD et al., 2011). Assim, a redução na disponibilidade de N reduz os teores de clorofila (FILLA et al., 2020). Inclusive a mensuração dos índices de clorofila por aparelhos portáteis pode ser um mecanismo para tomada de decisão e até definição de dose de N aplicada em cobertura no feijoeiro, através da obtenção do índice de suficiência de N (FILLA et al., 2020; MAIA et al., 2012), ou mesmo para avaliar a adaptabilidade de cultivares ao tipo de fertilizante nitrogenado (CARREÑO SIQUEIRA et al., 2023).

Com a redução dos teores de pigmentos fotossintéticos no feijoeiro comum, em função da deficiência de N, há conseqüentemente uma redução da eficiência fotoquímica das plantas (ANTAL et al., 2010). Outra conseqüência da deficiência de N é o acúmulo de amido nos cloroplastos (BONDADA; SYVERTSEN, 2003) e a redução da assimilação de CO<sub>2</sub>, em função da redução da expressão de várias enzimas do ciclo de Calvin em plantas sob deficiência de N (SUGIHARTO et al., 1990). E com a redução da assimilação de CO<sub>2</sub>, há um desbalanço entre produção e consumo de poder redutor pela fase fotoquímica da fotossíntese, alterando a taxa de transporte de elétrons pelo fotossistema, o que aumenta o *quenching* não fotoquímico e sugere aumento da excitação do transporte cíclico de elétrons, evitando a formação de espécies reativas de oxigênio (ANTAL et al., 2010).

Assim, a definição do momento e dose correta da adubação nitrogenada no feijoeiro pode influenciar significativamente o metabolismo fotossintético, com conseqüente aumento da produtividade de grãos. Diante disso, o objetivo do trabalho foi avaliar a época de dose de aplicação do N em cobertura no feijoeiro comum cv. Veloz.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Importância do Feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.) no Mundo, Brasil e Goiás

O feijoeiro é nativo da América Central e do Sul, no entanto foi domesticado quase 6.000 a.C no Peru e cultivado cerca de 5.000 a.C no México. O gênero *Phaseolus* abrange cerca de 55 espécies, sendo cinco conhecidas e domesticadas, com destaque para o feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.) (NASCIMENTO, 2022; SINGH; DUKARIYA; KUMAR, 2020).

O feijoeiro comum deve ser cultivado em solos livres de encharcamento, bem estruturados e livre de camada compactada até 60 cm de profundidade (FAGERIA et al., 2015), com a acidez do solo corrigida e níveis de adubação ajustados, de acordo com o cenário apresentado na análise química de solo e expectativa de produtividade da lavoura.

O feijoeiro é uma das leguminosas mais populares no mundo, sendo parte da dieta básica de inúmeras classes sociais e por isso tem seu cultivo realizado em diversos países, com as finalidades de abastecimento interno, exportação e importação.

Os maiores produtores do mundo são Índia, Brasil e Myanmar, com áreas de cultivo bem estabelecidas e boas produtividades (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED STATES, 2022).

O feijão é um dos grãos comestíveis mais importantes no mundo e possui grande representatividade no Brasil, que é o segundo maior produtor da leguminosa no planeta. Segundo um levantamento da FAO, o país fica atrás apenas da Índia (COÊLHO, 2023; FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED STATES, 2022; SANTOS et al., 2019), com uma produção estimada em 2.871.600 toneladas.

No Brasil a leguminosa possui grande adaptabilidade de cultivo e desenvolvimento, sendo consumido e produzido em todas as regiões agricultáveis do país (MORAES; MENELAU, 2017; OLIVEIRA; WANDER, 2023). Ela consegue atender às demandas de consumo interna e externa do mercado.

O feijoeiro pode ser cultivado em três safras durante o ano, sendo a primeira, a safra das águas, seguida pela safra da seca e a terceira é chamada de safra de inverno que, por sua vez, é cultivada com o auxílio de sistemas de irrigação (CONAB et al., 2024; OLIVEIRA; WANDER, 2023), tornando possível a produção do grão durante todo o ano.

Segundo a CONAB, em levantamento da produção de feijão no Brasil, na safra 2023/2024, o país produziu cerca de 3.243,9 mil toneladas, com uma área colhida de 2.858,2 mil hectares, o que representa um aumento produtivo de 7,0 % a mais comparado à safra anterior.

Os estados de maior produção foi o Paraná, maior produtor do país, seguido por Minas Gerais, Bahia, Mato Grosso, Goiás e São Paulo. Goiás produziu cerca de 274,4 mil toneladas, com uma área colhida de 106,5 mil hectares e destaque para o município de Cristalina que desponta como maior produtor da leguminosa no estado (CONAB, 2024).

Portanto, para que o Brasil consiga produzir feijão, de modo a atender às demandas internas e externas, é preciso dar continuidade a investimentos em tecnologias agrícolas que visam incrementar as produtividades, associando isso ao cuidado com a segurança alimentar, a fim de atender a todo o mercado consumidor da leguminosa.

## **2.2 Adubação Nitrogenada no Feijoeiro**

O manejo da adubação do feijoeiro comum no Brasil é feito por meio da adubação nitrogenada com fontes minerais associadas ou não a fontes orgânicas. A não substituição da adubação nitrogenada por organismos diazotróficos na cultura do feijoeiro comum não ocorre como na soja. Isso se deve, principalmente, à baixa eficiência em fornecer às plantas o exigido para atingir altas produtividades. A baixa eficiência na cultura do feijoeiro ocorre em função da não especificidade na interação planta-microorganismo e leva a vários efeitos práticos como, competição entre as estirpes nativas e inoculadas de bactérias diazotróficas, redução do processo de nodulação e conseqüentemente baixa fixação de N atmosférico (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

No cerrado goiano, a adubação nitrogenada na cultura do feijoeiro é realizada de forma parcelada. No plantio se aplica  $40 \text{ kg ha}^{-1}$ , quando utilizadas fontes minerais, como o sulfato de amônio ou ureia. No estágio de desenvolvimento entre V3 e V4 da cultura, faz-se a aplicação de até  $20 \text{ kg ha}^{-1}$  de N oriundo do sulfato de amônio. A utilização do sulfato de amônio nessa fase tem como objetivo, também, o fornecimento de enxofre para a cultura. Nos estádios V8 e R7, fazem-se mais duas adubações de cobertura com uso da ureia como fonte que totaliza, nessas aplicações,  $130 \text{ kg ha}^{-1}$ .

As duas últimas aplicações, nos estádios V8 e R7, concentram até 68% da dose de N na cultura, sendo preconizados  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  em V8 e  $30 \text{ kg ha}^{-1}$ , em R7. Todavia, em função dos tipos de desenvolvimento do feijoeiro, determinado ou indeterminado, a época de aplicação pode ter efeito de indução do crescimento vegetativo, levando ao abortamento de flores e vagens. A maior taxa de acúmulo de N pelo feijoeiro, como a cultivar BRS Estilo, ocorre a partir dos estágios reprodutivos, suscitando a hipótese de que a maior dose de cobertura deveria ser aplicada no estágio R7 e não no V8. Todavia, também há a hipótese de que esse manejo possa ser alterado em função do tipo de desenvolvimento da planta.

### **2.3 Importância da adubação nitrogenada na produção do feijoeiro**

O feijoeiro é muito exigente em nitrogênio e, diferentemente dos outros macronutrientes que tiveram maiores avanços nas suas recomendações, dadas a contribuições das análises químicas do solo, houve pouco avanço na sua recomendação. Portanto, o tema é ainda desafiador e motivo para pesquisa (MARQUES DA SILVEIRA et al., 2023).

O nitrogênio (N) é um dos elementos mais importantes e necessários na nutrição das plantas; ele participa do crescimento e desenvolvimento das células vegetais, está diretamente ligado à composição de estruturas como a clorofila, enzimas e proteínas, sendo considerado um dos nutrientes exigidos e absorvidos em maior quantidade pela cultura do feijoeiro e cerca de 50% do total absorvido é exportado via grãos (HANOON et al., 2020; IAMASHITA, 2023; OTSUBO, 2012).

O manejo do nitrogênio é difícil, pois o nutriente, apesar de ser o requerido em maior quantidade pelo feijoeiro, possui uma dinâmica complexa no solo e pode perder-se facilmente por lixiviação, volatilização e desnitrificação, o que compromete o meio ambiente e reduz a eficácia do manejo (JORGE et al., 2017).

Por se tratar de uma cultura de ciclo curto, a adubação inicial é essencial para o bom desenvolvimento e vigor das plantas (LACERDA et al., 2020), haja vista que o nitrogênio é o nutriente mais exportado para os grãos, com uma taxa de exportação de 51 a 54 Kg ha<sup>-1</sup> de N por tonelada (SETUBAL, 2021).

Assim, grande parte das necessidades de N para o feijoeiro se dá via adubação mineral, aplicada no momento da semeadura e em cobertura, podendo esta última ser realizada em dose única ou parcelada, em duas ou mais vezes, durante o ciclo da cultura (COSTA, 2021; JUNIOR, 2018). O nitrogênio é o nutriente exigido em maior quantidade, por ser responsável pelo crescimento vegetativo, produção de novas células e tecidos e formação de clorofila (RABELO et al., 2016).

O nitrogênio é também responsável por contribuir com o incremento produtivo da cultura do feijoeiro, haja vista que diversos estudos mostram que a adubação nitrogenada apresenta efeitos positivos em diversas características agrônômicas da cultura, como altura de plantas, teor de N nos grãos e folhas.

Segundo (VIÇOSI, 2018), o feijoeiro-comum, quando tratado com adubação nitrogenada, apresenta incrementos na extensão de seu sistema radicular e acúmulo de biomassa. Avaliações conduzidas no estudo de (SPAZIANI PEREIRA et al., 2022) mostraram que o índice de clorofila no feijoeiro foi maior com a adubação de 100 kg/ha de nitrogênio.

Com isso, baseando-se nos recentes estudos, em que é avaliado o desempenho da cultura do feijoeiro sob diferentes manejos de adubação nitrogenada, é possível observar que, para a cultura do feijoeiro, o nitrogênio é um importante fator para incremento de produtividade.

## 2.4 Dose

Dentre os elementos essenciais, o nitrogênio é considerado um dos principais fatores limitantes na produtividade do feijoeiro. Em solos brasileiros, o teor de N disponibilizado via adubação não é suficiente para proporcionar produtividades significativas (COSTA; DE CARVALHO; LOPES, 2022; LAFETÁ et al., 2022).

O N é um elemento que se perde facilmente por lixiviação, volatilização e desnitrificação no solo, assim seu manejo adequado é um dos mais difíceis. E a única alternativa para fazer recomendação de adubação nitrogenada é a determinação da curva de resposta em relação às várias doses desse nutriente (FAGERIA et al., 2015).

Solos de regiões tropicais geralmente apresentam baixos teores de matéria orgânica, o que contribui para gerar deficiência em nitrogênio, sendo esse fator limitante para a produção agrícola (SILVA; ANDRADE, 2022).

No feijoeiro, os períodos de adubação, bem como as doses de N recomendadas e aplicadas, devem ser planejados, devendo-se ter consideração as condições edafoclimáticas e características genéticas das cultivares de feijoeiro plantadas. A falta desse tipo de informação tem feito com que o potencial produtivo das cultivares utilizadas esteja aquém do potencial genético para a cultura (FERREIRA et al., 2021a).

Na agricultura brasileira, o fornecimento do nitrogênio é recomendado e aplicado em três momentos distintos: a adubação de plantio, de cobertura e via foliar, sendo esta última recomendada em alguns casos.

Normalmente, se recomenda a aplicação de 1/3 da dose de N na semeadura, e 2/3 devem ser aplicados até os 20 dias da emergência da cultura (ROSOLEM; MARUBAYASHI, 1994). Porém, com a expansão do cultivo comercial de feijoeiro no Brasil, pesquisadores vêm desenvolvendo estudos que busquem estimar as melhores doses de N para a agricultura brasileira.

Segundo o estudo realizado por (SILVA; ANDRADE, 2022), a cultivar BRS MG Talismã respondeu bem ao manejo de 400 kg ha<sup>-1</sup> do formulado 04-14-08 no plantio e 200 kg ha<sup>-1</sup> de N aplicados na cobertura do feijoeiro, aos 25 dias após emergência das plantas, tendo um incremento produtivo, com um maior número de vagens por planta.

De acordo com (FERREIRA et al., 2021b), foi conduzido um ensaio com duas cultivares de feijoeiro BRS FC104 e BRS Estilo, em que foram aplicados 250 kg ha<sup>-1</sup> do formulado 08-26-16 no plantio e doses crescentes de N na cobertura de 0, 40, 80 e 120 kg ha<sup>-1</sup>, em que foi observado, na cultivar BRS FC104, uma maior produção de clorofila, com a maior dose de N na cobertura.

A aplicação de até 120 kg ha<sup>-1</sup> de N no estágio fenológico V4 em sistema de plantio direto sob densa quantidade de palha de milho, por exemplo, propicia maior acúmulo de proteína bruta na semente do feijoeiro em relação à aplicação no estágio V6 (JUNIOR, 2018).

A adubação nitrogenada contribuiu para que a cultivar BRS Nova Era atingisse seu ponto máximo em altura (41,60 e 40,40 cm) nas doses de 69,49 e 61,50 Kg ha<sup>-1</sup> de N (C. M. DE et al., 2023).

Com isso, percebe-se que a adubação nitrogenada em plantio e cobertura contribui de maneira significativa para o incremento produtivo da cultura do feijoeiro, expressando ganhos em altura, produção de clorofila e acúmulo de proteína bruta em sementes.

## **2.5 Período de aplicação e efeito da adubação nitrogenada na fase vegetativa e na reprodutiva**

O feijoeiro-comum é uma planta exigente em nutrientes devido ao seu sistema radicular se concentrar majoritariamente na camada superficial do solo (SOUSA, 2021). Com isso, o uso de adubação torna-se fundamental para aumentar a produtividade da cultura (FAGERIA et al., 2015).

A absorção de nitrogênio ocorre em praticamente durante todo o ciclo da cultura, mas a época de maior exigência, que é quando a velocidade de absorção é máxima, ocorre dos 35 aos 50 dias da emergência da planta, coincidindo com a época do florescimento. Neste período a planta absorve de 2,0 a 2,5 kg de N por hectare ao dia (ROSOLEM; MARUBAYASHI, 1994).

O nitrogênio é um nutriente essencial, constituinte de diversas funções fisiológicas, como, por exemplo, da composição da clorofila, formação do protoplasma e proteínas, sendo possível observar nelas a ação do N ao longo do ciclo produtivo das plantas.

## **2.6 Fotossíntese**

A fotossíntese pode ser conceituada como o processo fisiológico que a planta realiza nos tecidos clorofilados, com objetivo de obter substâncias orgânicas (por exemplo, a glicose), a partir de substâncias inorgânicas (H<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub>), tendo como fonte de energia a luz solar (ZUCUNI; MARLON; ARENHARDT, 2015).

As plantas utilizam a luz como fonte de energia no processo de fotossíntese e respondem a essa energia luminosa de acordo com a sua intensidade, comprimento de onda e direção em que estão sendo emitidas (EDUARDO SANTOS LAZZARINI et al., 2017).

A partir do comprimento de onda luminoso incidido nas plantas, algumas culturas apresentam diferentes incrementos fotossintéticos produzidos, conforme afirma a literatura. O feijoeiro-comum, quando submetido aos comprimentos de onda vermelho e azul, apresenta maiores incrementos em produtividade, atingindo médias em altura de 44,5 cm (ARAÚJO; BARBOSA; BRITO, 2022). Tal fato se justifica, pois, segundo (TAIZ et al., 2017), ambas as clorofilas A e B apresentam dois picos de absorção de luz, no vermelho (665 nm) e no azul (465 nm), respectivamente.

A distribuição da luz dentro da planta é importante para a produção, pois é lá que a energia luminosa é transformada em energia química, armazenada e transferida para os órgãos de armazenamento ou reprodução (SILVA et al., 2016), o que irá impactar no enchimento de grãos e conseqüentemente no ganho em produtividade.

O feijoeiro é uma planta C3 e, em relação ao seu metabolismo, tem a capacidade de regeneração da rubisco, mas apresenta uma taxa de fotossíntese baixa em comparação à de plantas C4 (BRAGA, 2020; FAGERIA et al., 2015). Diversos estudos têm sido realizados com o objetivo de avaliar e recomendar posicionamentos de produtos e métodos de aplicação que possam melhorar a taxa fotossintética do feijoeiro, mesmo com as características fisiológicas da cultura.

No estudo realizado por (SILVA et al., 2016), cultivares comerciais de feijoeiro do tipo Preto e Carioca foram submetidos a avaliações de taxa fotossintética nos estádios V4, R6 e R7, em que foi observada uma queda da taxa de fotossíntese no estádio R7 atribuída à translocação de fotoassimilados da planta para os grãos.

Segundo (MORELI, 2022), a cultivar BRS Estilo, quando tratada com o regulador vegetal Thidiazuron (TDZ), combinado à aplicação de ureia nos estádios fenológicos V3 e R5, apresentaram um teor de taxa fotossintética elevado de  $25,29 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Isso acontece porque em V3 a planta passa a depender diretamente dos nutrientes extraídos do solo e a aplicação em conjunto de TDZ+Ureia funciona como um estímulo e complemento para absorção dos nutrientes; o TDZ tem ação de estímulo hormonal e a ureia funciona como complemento nutricional.

O estudo conduzido por (FERREIRA, 2017) mostrou que as cultivares de feijoeiro IAC “Milênio” (ciclo médio) e IAC “Imperador” (ciclo precoce), quando submetidas a quatro intervalos de irrigação (4, 8, 12 e 16 dias), a cultivar “Imperador” apresentou uma maior taxa

fotossintética avaliada. Tal fato é justificado pela redução da condutância estomática que promove uma baixa entrada de CO<sub>2</sub> e conseqüentemente uma redução na taxa fotossintética da planta.

Observando os relatos citados na literatura, na cultura do feijoeiro, é importante avaliar que, durante o cultivo e desenvolvimento da cultura, a fotossíntese precisa definir, no plano de condução da lavoura, o que pode afetar suas reações e quais manejos devem ser adotados para mitigar tais efeitos, visando a elevação do teto produtivo da cultura.

## **2.7 Pigmentos Fotossintetizantes**

Os pigmentos fotossintéticos são as moléculas responsáveis pela absorção da radiação eletromagnética, pela transferência da energia dos fótons absorvidos para o centro de reação e pela conversão fotoquímica nos sistemas fotossintéticos dos organismos capazes de fotossíntese (MONTERO, 2023).

A energia da luz solar é absorvida primeiro pelos pigmentos da planta. Todos os pigmentos ativos na fotossíntese são encontrados nos cloroplastos (TAIZ et al., 2017a), sendo a clorofila o principal pigmento envolvido na absorção, transferência e conversão da energia luminosa em energia química (FAGUNDES et al., 2022).

Os pigmentos fotossintetizantes são classificados de acordo com o comprimento de onda absorvido, sendo eles: clorofila “A” e “B” (azul e vermelho), carotenóides (luz violeta e azul esverdeada), xantofilas (amarelo), ficobilinas (vermelho).

As clorofilas (clorofila *a*, clorofila *b* e clorofila total) são pigmentos encontrados nas plantas, as quais têm, em sua estrutura química, porfirinas conjugadas e complexadas com íons de magnésio. Elas são de fundamental importância no processo da fotossíntese e podem absorver de ambas as extremidades do espectro eletromagnético visível, ou seja, da região azul e da região vermelha (DA SILVA et al., 2024; MANDAL; DUTTA, 2020), espalhando o comprimento de onda da região verde. O que conseqüentemente a torna verde na aparência são pigmentos que estão integralmente relacionados às funções fisiológicas das folhas, com uma complexa estrutura em anel, que é quimicamente relacionada com os grupos do tipo porfirina encontrados na hemoglobina e nos citocromos (TAIZ et al., 2017a).

Os carotenóides são pigmentos encontrados em todos os organismos fotossintetizantes naturais, constituintes integrais das membranas dos tilacóides e, em geral, são associados a proteínas que formam o aparelho fotossintetizante (TAIZ et al., 2017). Desempenham uma série de papéis importantes na fotossíntese e fornecem principalmente funções de coleta de luz e

dissipação de energia fotoprotetora dentro de complexos pigmento-proteína (NIEDZWIEDZKI et al., 2020).

São considerados pigmentos acessórios da clorofila e cooperam na captura e transferência de fótons para a clorofila *a*, bem como na dissipação do excesso de irradiância (azul) e, dessa forma, favorecem a proteção do cloroplasto contra a formação de peróxidos (uma forma altamente reativa de oxigênio), evitando a foto-oxidação da clorofila (CID; TEIXEIRA, 2017).

## **2.8 Fluorescência de Clorofila**

A nutrição nitrogenada afeta diretamente a fotossíntese das plantas. Isso porque o teor de clorofila e a fluorescência de clorofila *a* tem relação direta com a concentração de nitrogênio foliar. Os índices obtidos pelos clorofilômetros e fluorômetros portáteis são parâmetros que têm sido difundidos no estudo dos mecanismos fisiológicos, pois permitem fazer uma análise dos processos de absorção, transferência e aproveitamento de energia, através do fotossistema dois (PSII) (MESA, 2018; SANTOS et al., 2020).

A fluorescência é a propriedade de alguns átomos de absorver a luz de um comprimento de onda determinado e, depois de um breve intervalo, reemitir na forma de um comprimento de onda maior (CID; TEIXEIRA, 2017).

Quando expostas à luz, as plantas reemitem uma pequena quantidade de luz das moléculas de clorofila que, estimuladas, conseguem reemitir um fóton e, assim, retornar a seu estado-base, num um processo conhecido como fluorescência de clorofila (ŠPUNDOVÁ et al., 2024; TAIZ et al., 2017a).

A fluorescência da clorofila surge da energia luminosa absorvida, podendo ser interpretada como uma medida da atividade fotossintética, sendo amplamente utilizada para estudar a influência dos fatores de estresse abiótico no desempenho fotossintético. Fornece informações sobre a transferência de energia no aparelho fotossintético e processos fotossintéticos relacionados (MOUSTAKA; MOUSTAKAS, 2023; STEFANOV; RASHKOV; APOSTOLOVA, 2022).

No tocante à fotossíntese, à medida que os elétrons da molécula de clorofila, impactados pelos fótons solares, vão retornando a seu estado basal, a energia liberada vai sendo transferida para moléculas vizinhas, bem como parte dessa energia escapa via fluorescência, não sendo esta energia aproveitada para a fotossíntese (CID; TEIXEIRA, 2017).

A medição da fluorescência de clorofila é frequentemente usada não apenas para monitorar o estado hídrico das folhas, mas também para estudar os efeitos do déficit hídrico nas

plantas e contribuiu para a compreensão do mecanismo de ação da escassez hídrica das folhas na fotossíntese (ŠPUNDOVÁ et al., 2024)

A fluorescência da clorofila pode ser detectada usando vários métodos, como o método de modulação de amplitude de pulso (PAM) (MOUSTAKA; MOUSTAKAS, 2023). Ou então com auxílio de fluorômetro portátil FluorPEN 100 FP100® (ROHÁCEK, 2002).

De acordo com o levantamento realizado por (VENEZIANO, 2022), os parâmetros de fluorescência são: (F0): a intensidade da fluorescência inicial no momento de ativação dos pigmentos fotossintéticos do complexo antena; (FJ): a intensidade da fluorescência a 2 milissegundos, tempo esse necessário para o início da liberação de O<sub>2</sub> pela reação de Hill; (FI): a intensidade da fluorescência a 60 milissegundos, tempo necessário para a transferência de energia para o pool de plastoquinonas; (FM): a intensidade da fluorescência máxima em que todos os centros de reação do fotossistema II (PSII) estão abertos; (M0): taxa líquida do fechamento dos 15 centros de reação do PSII.

Instrumentos de sensoriamento remoto agora são capazes de medir a fluorescência da clorofila (que é emitida entre 650–850 nm) das copas para o globo (fluorescência da clorofila induzida pelo sol; SIF). (MAGNEY; BARNES; YANG, 2020, sendo sua imagem uma ferramenta poderosa para minerar a atividade da fotossíntese em escala celular, foliar e de planta inteira (PÉREZ-BUENO; PINEDA; BARÓN, 2019).

Métodos de análise de fluorescência da clorofila podem ser usados para construir bancos de dados abrangentes de tolerância ao estresse para várias variedades de culturas, a fim de que permitirão o aumento da produtividade das culturas otimizar a função fotossintética para mudanças climáticas em termos de condições ambientais (MOUSTAKA; MOUSTAKAS, 2023).

## **2.9 Formação e enchimento de vagens e grãos**

Após um período de crescimento vegetativo, as plantas respondem a uma combinação de estímulos internos e externos, incluindo tamanho, temperatura e fotoperíodo para experimentar a transição para o desenvolvimento reprodutivo (TAIZ et al., 2017a).

Quando o desenvolvimento reprodutivo é iniciado, o meristema vegetativo é transformado em meristema primário da inflorescência, que produz uma inflorescência alongada, gerando dois tipos de órgãos laterais: folhas e flores derivadas do caule (TAIZ et al., 2017a).

Durante a condução de uma lavoura, quando a planta está submetida a boas condições de campo, como uma boa semeadura, umidade do solo adequada, manejo fitossanitário e nutricional, é importante considerar que os adequados níveis de nitrogênio para o incremento da

fotossíntese – associados a potássio, fósforo, cálcio, boro e molibdênio pela formação de ATP devido à alta demanda energética da planta, translocação de açúcares e ácidos orgânicos, formação de tecidos novos e germinação do grão de pólen – são diretamente responsáveis pelo bom estabelecimento do estágio reprodutivo, desde a formação de flores até o enchimento de grãos, podendo contribuir para a produtividade.

É preciso salientar que durante o desenvolvimento de uma planta, esta é submetida a diversos estresses bióticos e abióticos que conseguem influenciar diretamente o estágio reprodutivo da cultura.

O estresse térmico afeta o desenvolvimento de grãos em leguminosas porque reduz o suprimento de nutrientes para micrósporos, levando à deiscência prematura das anteras; dificulta a síntese e distribuição de carboidratos para os grãos, reduzindo a duração do enchimento de grãos levando ao seu baixo peso (FAROOQ et al., 2017)

Durante o estágio de enchimento de grãos, o estresse hídrico reduziu significativamente a taxa de pegamento de sementes, comprimento e largura dos grãos, encorpamento e peso de 1.000 grãos, o que levou a reduções significativas no rendimento e nos teores de amilose, amilopectina e amido total, mas aumentando o teor de proteína dos grãos (MAN-NING CHAO et al., 2020).

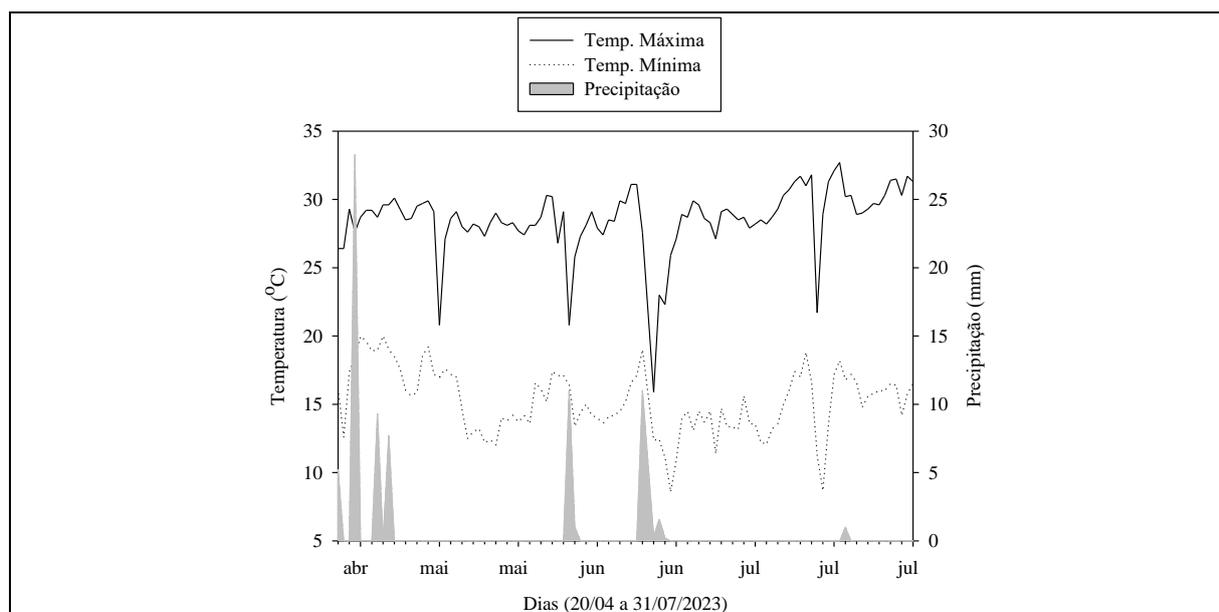
### 3 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado a campo na Fazenda Sementes Marambaia em área irrigada por aspersão sob pivô central em um Latossolo Vermelho Ácrico típico (LVw2) horizonte A moderado (“SIEG Mapas: Pedologia/Solo 1:250.000”, 2024) (ANEXO 1). O feijoeiro cultivar IAC Veloz foi semeadura com população de 300.000 plantas por hectare. Antes do plantio, foi coletada amostra de solo na profundidade de 0 a 0,2m de profundidade para a caracterização química (Tabela 1). Os dados meteorológicos durante o cultivo das plantas foram obtidos na estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) mais próximo, do município de Rio Verde-GO (Figura 1). Durante a condução do experimento, a área foi irrigada por aspersão, com lâmina de 10 mm e turno de rega de 36 horas.

**TABELA 1** Caracterização química do solo antes do plantio, na profundidade de 0 a 0,2 m.

pH <sub>CaCl2</sub>	P <sup>1</sup>	K	S-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca	Mg	Na	Al	H+Al	T <sub>pH 7,0</sub>	MO	
(1:2,5)	-----mg dm <sup>-3</sup> -----			-----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----							g dm <sup>-3</sup>
5,7	25,8	129,0	15,0	3,02	1,38	2,00	0,00	3,30	8,04	30,1	

<sup>1</sup>P, K e Na – fósforo e potássio obtido pelo extrator Mehlich 1, sendo o fósforo determinado por colorimetria pelo desenvolvimento da cor azul, formado pelo complexo P-Molibdênio em meio ácido, tendo o ácido ascórbico como doador de elétrons e o Na e o K determinados por espectrofotometria de chama; S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> extraído por solução de fosfato de cálcio diluída e determinado por turbidimetria com BaCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O; Ca, Mg e Al extraídos com solução de KCl 1 mol L<sup>-1</sup> sendo o Ca e Mg determinados por espectrofotometria de absorção atômica (aa) e o Al por titulação com NaOH 0,01 mol L<sup>-1</sup>. MO extraído com dicromato de potássio e determinado por colorimetria; H+Al – acidez potencial extraído com acetato de cálcio a pH 7,0 e determinado por titulação com NaOH 0,01 mol L<sup>-1</sup>. T<sub>pH 7,0</sub> – capacidade de troca de cátions potencial a pH 7,0 obtido pela soma dos teores de Ca, Mg, K, Na e H+Al (EMBRAPA SOLOS, 2009).



**FIGURA 1** Dados de temperatura máxima e mínima e precipitação obtidos da estação meteorológica de Rio Verde-GO junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), durante o período de realização do experimento (20 de abril a 31 de julho de 2023).

O delineamento experimental ocorreu em blocos casualizados, com quatro tratamentos, sendo doses de nitrogênio aplicados nos estádios V7 e R8 (90 e 40; 70 e 60; 50 e 80; 30 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, respectivamente), com cinco repetições. Em todos os tratamentos a dose total de N em cobertura foi de 130 kg ha<sup>-1</sup> no total e foi utilizada a ureia (45% de N) como fonte. As parcelas possuíam 64 m de largura por 100 m de comprimento. A aplicação dos tratamentos foi realizada a lanço com equipamento agrícola autopropelido Hercules®.

Antes da semeadura do feijão foi feita a rolagem de plantas de milho e aplicado 4 ton ha<sup>-1</sup> de cama de frango, totalizando 80 kg ha<sup>-1</sup> de N total via cama de frango. Em seguida foi realizada a semeadura do feijoeiro, cv. IAC Veloz, espaçado 0,45 cm entre linha e com 15 plantas por metro linear, totalizando população de 333.000 plantas ha<sup>-1</sup>. Na semeadura foi realizada a adubação fosfatada, com a aplicação de 1.000 kg ha<sup>-1</sup> de superfosfato simples (18% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). No estádio V4 foram aplicados a lanço 200 kg ha<sup>-1</sup> de Sulfato de amônio (20% de N e 22% de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), totalizando 40 kg ha<sup>-1</sup> de N e 100 kg ha<sup>-1</sup> de Cloreto de Potássio (62% de K<sub>2</sub>O), totalizando 62 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O.

Nos estádios V7 e R8, foram realizadas as aplicações a lanço das doses de nitrogênio dos diferentes tratamentos, utilizando-se a ureia (45% de N). Sete dias após a aplicação da dose no estádio V7, foram realizadas avaliações dos teores foliares de N (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997), N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> e N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (TEDESCO et al., 1995), índices de clorofila *a*, *b* e total, índices de fluorescência de clorofila *a* (STRASSER; SRIVASTAVA; TSIMILLI-MICHAEL, 2000; STRASSER; TSIMILLI-MICHAEL; SRIVASTAVA, 2004), fotossíntese e número de vagens maior e menor que 40 mm. Sete dias após a aplicação, no estádio R8, foram realizadas as avaliações dos teores foliares de N (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997), N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> e N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (TEDESCO et al., 1995) índices de clorofila *a*, *b* e total, índices de fluorescência de clorofila *a* (STRASSER; SRIVASTAVA; TSIMILLI-MICHAEL, 2000; STRASSER; TSIMILLI-MICHAEL; SRIVASTAVA, 2004).

Na colheita, foram avaliadas características, como: altura das plantas, número de vagens maior e menor que 40 mm, produtividade de grãos, peso de mil grãos. A definição de vagens maiores e menores que 40 mm foi em função de vagens menores que 40 mm estarem em fase de canivete e as maiores que 40 mm já estavam em fase de enchimento do grão.

Os índices de clorofila *a*, *b* e total foram obtidos com o aparelho Clorofilog. Foram realizadas as leituras na primeira folha completamente expandidas, sendo uma leitura em cada trifólio em cinco pontos por faixa, totalizando 60 leituras por tratamentos e 240 leituras no experimento.

As leituras de fluorescência de clorofila foram feitas com as folhas adaptas ao escuro por 20 minutos, com auxílio de papel alumínio, tanto para o protocolo OJIP, quanto para o NPQ1. Foi realizada uma leitura por folha, em cinco plantas por faixa, totalizando 15 leituras por tratamento e 60 no experimento. Os parâmetros de fluorescência da clorofila *a* foram obtidos com o auxílio de fluorômetro portátil FluorPEN 100 FP100® (ROHÁČEK, 2002) e estimados os índices de fluorescência da cinética OJIP e NPQ da curva de Kurtsky (STRASSER; SRIVASTAVA; TSIMILLI-MICHAEL, 2000; STRASSER; TSIMILLI-MICHAEL; SRIVASTAVA, 2004).

Os parâmetros de fluorescência obtidos foram: ( $F_0$ ): a intensidade da fluorescência inicial no momento de ativação dos pigmentos fotossintéticos do complexo antena; ( $F_J$ ): a intensidade da fluorescência a 2 milissegundos, tempo necessário para o início da liberação de  $O_2$  pela reação de Hill; ( $F_I$ ): a intensidade da fluorescência a 60 milissegundos, tempo necessário para a transferência de energia para o pool de plastoquinonas; ( $F_M$ ): a intensidade da fluorescência máxima em que todos os centros de reação do PSII estão abertos; ( $F_V$ ): fluorescência variável; ( $M_0$ ): taxa líquida do fechamento dos centros de reação do fotossistema II; ( $V_J$ ): fluorescência variável relativa a 2 ms; ( $V_I$ ): fluorescência variável relativa a 60 ms; ( $F_M/F_0$ ): produção quântica basal dos processos não fotoquímicos no fotossistema II; ( $F_V/F_0$ ): eficiência quântica potencial do PSII; ( $F_V/F_M$ ): rendimento quântico potencial; (AREA): área sobre a curva de fluorescência ( $F_0$ ) e ( $F_M$ ) corresponde à quantidade de aceptores de elétrons; (FIX AREA): área total acima da cinética OJIP – entre  $F_{40\mu}$  e  $F_{1s}$  (SM): medida de energia necessária para fechar todos os centros de reação do PSII; (SS): quantidade de energia necessária para reduzir a  $Q_a$  uma única vez e (N): número de *turnover*, ou seja, quantas vezes a  $Q_a$  foi reduzida em relação ao tempo zero ( $t_0$ ) (STRASSER; SRIVASTAVA; TSIMILLI-MICHAEL, 2000; STRASSER; TSIMILLI-MICHAEL; SRIVASTAVA, 2004).

Os Fluxos Específicos de Energia são: (ABS): fluxo de photons absorvidos pelos pigmentos; (DI): fluxo de photons dissipados na forma de calor, de fluorescência ou para outros sistemas; (TR0): fluxo de energia preso no centro de reação do PSII para o processo fotoquímico; (ET0): fluxo de energia correspondente ao transporte além da  $Q_a$  (STRASSER; SRIVASTAVA; TSIMILLI-MICHAEL, 2000; STRASSER; TSIMILLI-MICHAEL; SRIVASTAVA, 2004).

Foi utilizado um analisador de gás por infravermelho (IRGA) para a determinação da transpiração foliar (E), fotossíntese líquida (A), concentração interna de carbono ( $C_i$ ), taxa de transporte de elétrons (ETR), relação da fotossíntese líquida por carbono interno ( $A/C_i$ ), relação

da fotossíntese líquida por transpiração foliar ( $A/E$ ), condutância estomática ( $g_s$ ) e eficiência quântica efetiva ( $Y$ ).

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e teste de agrupamento de médias Scott Knott (5% de probabilidade), com auxílio do pacote *ExpDes.pt* (FERREIRA; CAVALCANTI; NOGUEIRA, 2021) e os gráficos foram editados com o pacote *ggplot2* (WICKHAM, 2016) no programa R (R CORE TEAM, 2024).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Resultado da aplicação do N no estádio vegetativo (V7)

O nitrogênio (N) é o nutriente mais acumulado pelas plantas, com destaque para o feijoeiro (ANTAL et al., 2010; CARREÑO SIQUEIRA et al., 2023; DE OLIVEIRA et al., 2023; FILLA et al., 2020; MAIA et al., 2012; PEREZ et al., 2013; PORTES, 1996; SILVA et al., 2024; SILVA; MOREIRA, 2022; SORATTO et al., 2013). Mais de 70% de todo o N na planta está dentro dos cloroplastos, organela-chave para o metabolismo vegetal que altera diretamente a fotossíntese e consequentemente a produtividade das culturas (ARGENTA; SILVA; BORTOLINI, 2001). Assim, qualquer alteração na nutrição nitrogenada pode alterar o metabolismo dentro dos cloroplastos.

No feijoeiro cv. IAC Veloz, quando aplicados 50 kg ha<sup>-1</sup> de N, foram obtidos os maiores valores de *turnover* da Quinona A (Qa) dos centros de reações do fotossistema II (CR/PSII). Ou seja, aumentou o número de vezes que a Qa foi reduzida em relação ao tempo zero (t<sub>0</sub>) (Tabela 2 e Figura 2 A). O aumento do *turnover* da Qa pode ser um indicativo de que há redução no número de CR/PSII ativos, sendo necessários mais ciclos por unidade. Assim, pode-se afirmar que, nas doses de 30 e 50 kg ha<sup>-1</sup>, houve aumento do *turnover* da Qa, podendo ser um indicativo de redução do número de CR/PSII ativos, ou seja, já pode ser um indicativo de danos ao fotossistema. A deficiência de N em planta é um dos fatores que levam à desestruturação de cloroplastos (DONCHEVA; VASSILEVA; IGNATOV, 2001; KUTÍK et al., 1995; LAZA; BERGMAN; VERGARA, 1993; ZAMBROSI; MESQUITA; TANAKA, 2023). Com dano ao fotossistema nas menores doses de N (30 e 50 kg ha<sup>-1</sup> de N), consequentemente há menor eficiência na dissipação de energia para a produção de NADP(H<sup>+</sup>) ( $\Phi P_0$ ) (Figura 2 B).

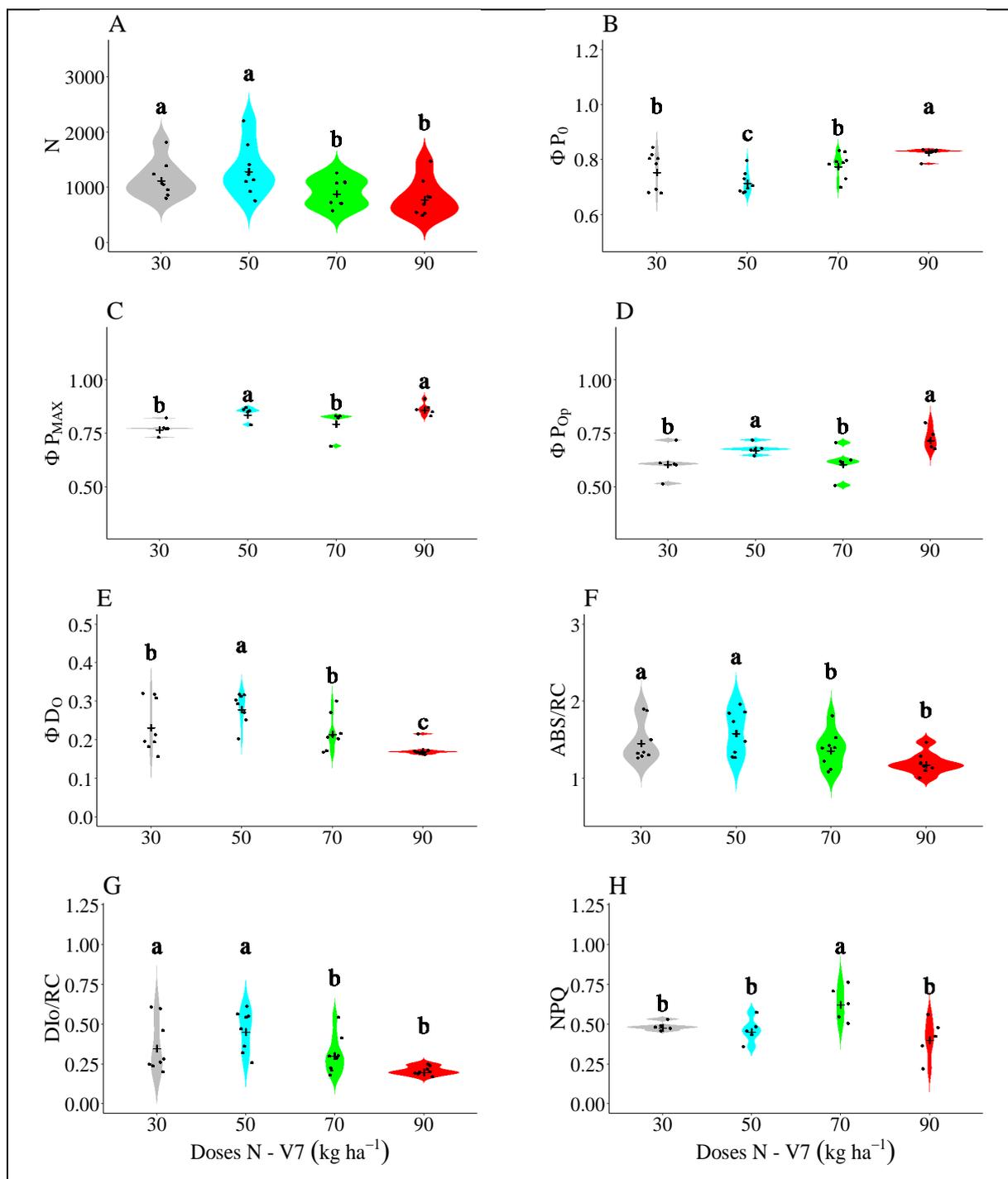
Quando avaliada a eficiência fotoquímica máxima da planta adaptada à luz ( $\Phi P_{MAX}$ ), observa-se que, nas doses de 50 e 90 kg ha<sup>-1</sup>, foram obtidos os maiores valores. Esse resultado demonstra que a planta com 50 kg ha<sup>-1</sup> tem diferenças em relação à eficiência fotoquímica da planta, quando obtido com a planta adaptada ao escuro ( $\Phi P_0$ ), e eficiência máxima quando a planta está adaptada à luz actínia ( $\Phi P_{MAX}$ ). Essa diferença pode estar associada à adaptação que a planta faz na presença de luz, pois de acordo com (YANYKIN et al., 2022), levou a maior eficiência fotoquímica da planta.

Sob condições de luminosidade, com a aplicação de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N, há eficiência fotoquímica máxima ( $\Phi P_{MAX}$ ) semelhante ao obtido na planta com 90 kg ha<sup>-1</sup> de N (Figura 2 C). Com a planta adaptada à luz, também é obtida a eficiência fotoquímica operacional ( $\Phi P_{OP}$ ) após a estabilização do fotossistema. A  $\Phi P_{OP}$  obteve o mesmo comportamento da  $\Phi P_{MAX}$ , com os maiores valores obtidos nas plantas adubadas com 90 e 50 kg ha<sup>-1</sup> de N o V7 (Figura 2 D).

Com a maior eficiência quântica nas plantas com 90 kg ha<sup>-1</sup> de N (Figuras 2 B, C e D), houve menor necessidade de dissipar energia na forma de calor, obtendo-se assim o menor valor de rendimento de dissipação de energia ( $\Phi D_0$ ) (Figura 2 E). Uma das adaptações das plantas com 50 kg ha<sup>-1</sup> de N para manter a alta eficiência fotoquímica, mesmo com baixo *turnover* das Qa (N), pode ser a alta eficiência na dissipação de energia (alto  $\Phi D_0$ ) (Figura 2 E), evitando-se danos ao aparato fotossintético. Essa adaptação já foi relatada na literatura, em que plantas de feijoeiro comum, sob deficiência de N, aumentam a excitação da via cíclica de transporte de elétrons, pois aumentam a perda de energia na forma de calor e, com isso, reduziram a biossíntese de formas reativas de oxigênio (ANTAL et al., 2010).

O fluxo de elétrons pelo aparato fotossintético auxiliou no entendimento de como a adubação nitrogenada alterou a estruturação dos cloroplastos e a consequência sob o seu funcionamento. Com uma possível redução do número de CR/PSII nas menores doses de N, a quantidade de energia absorvida pelos complexos antena foi maior nessas plantas, ou seja, maiores ABS/RC (Figura 2 F). Todavia, essa maior taxa de absorção de luz pelos complexos antena (alto ABSC/RC) não alterou o fluxo de elétrons capturados pelo CR/PSII (TRo/RC) (ANEXO 2), sendo necessário, assim, a alta taxa de dissipação de energia na forma de calor com as menores doses de N (alto  $\Phi D_0$ ). O excesso de energia absorvido pelos complexos antenas das plantas adubadas com 30 e 50 kg ha<sup>-1</sup> de N, e não transmitido pela CR/PSII, foi dissipado, como observado pelos altos valores de DIO/RC obtidos nessas plantas (Figura 2 G).

O *quenching* não fotoquímico (NPQ), um dos principais processos que regulam a distribuição da energia de excitação para os CR, pode ser considerado como um “botão para ajuste”. O NPQ regula o fluxo de excitações para o CR/PSII em um nível aceitável, dependendo da intensidade luminosa e de outras condições, atuando como forma de proteção do aparato fotossintético, e que está associado ao ciclo das xantofilas (TAIZ et al., 2017a). O ciclo das xantofilas é a captura de excesso de elétrons por moléculas do grupo das xantofilas, que são pigmentos acessórios do grupo dos carotenoides, protegendo os cloroplastos de danos por fotoxidação. Esse processo está associado, também, à proteção do sítio de reação da fotólise da água. Nas condições de estudo, o NPQ foi maior nas plantas adubadas com 70 kg ha<sup>-1</sup> de N (Figura 2 H), o que torna essa planta, possivelmente, mais adaptada à condição de estresse.



**FIGURA 2** Efeito das doses de N no estágio V7, sob os índices de fluorescência de clorofila “a” em folhas completamente expandidas do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Veloz quinze dias após a aplicação dos tratamentos no estágio V7: (A) N - o número de turnover, ou seja, quantas vezes a Qa foi reduzida em relação ao tempo zero (t0); (B)  $\Phi P_0$  - eficiência quântica do PSII adaptado ao escuro; (C)  $\Phi P_{MAX}$  - eficiência fotoquímica máxima com a planta adaptada à luz actínica; (D)  $\Phi P_{Op}$  - eficiência fotoquímica operacional após a planta se adaptar à luz; (E)  $\Phi D_0$  - eficiência na dissipação de energia; (F): (ABS/RC): fluxo de absorção de energia pelos complexos antena; (G) DIO/RC - taxa de dissipação de elétrons e (H) NPQ – *quenching* não fotoquímico. Letras distintas diferem grupo de tratamentos pelo teste de Scott Knott (5% de probabilidade) e símbolo + : representação no gráfico da média de cada tratamento.

Nas plantas com 90 kg ha<sup>-1</sup> de N, o baixo NPQ (Figura 2 H) pode ser explicado pelo fato de a energia obtida da luz interceptada pelos cloroplastos não ser transmitida para os CR/PSII, ou seja, baixo ABS/RC (Figura 2 F). Essa baixa transmissão de energia para o CR/PSII com altas doses de N, pode ser atribuída a complexos antena desconectados do CR/PSII. Plantas com complexos antena desconectados do CR/PSII apresentam alta fluorescência inicial e baixa eficiência fotoquímica, podendo ocorrer sob condições de deficiência de ferro (CAZZANIGA et al., 2020; MORALES et al., 2001).

Os complexos antenas são compostos basicamente de clorofilas e proteínas associadas. No presente experimento os maiores índices de clorofila *a*, *b* e total foram obtidos nos tratamentos com as maiores doses de N (70 e 90 kg ha<sup>-1</sup>) (Figuras 3 A, B e C, respectivamente). Mesmo com a redução dos teores das clorofilas (ChlA, ChlB e ChlT), ainda houve excesso de energia para cada CR/PSII, o que leva ao excesso de energia dissipada na forma de calor nas plantas com as menores doses de N (Figuras 2 E e G). A redução nos teores de clorofila do feijoeiro, com redução das doses de N, é clássica, sendo um índice utilizado para a tomada de decisão de quando aplicar o N (ARGENTA; SILVA; BORTOLINI, 2001; BONDADA; SYVERTSEN, 2003; DE OLIVEIRA et al., 2023; MAIA et al., 2012).

Os complexos de antena coletoras de luz do fotossistema contêm formas espectrais que absorvem e emitem fótons de energia mais baixa do que a de seu doador primário de elétrons (RANKELYTĖ et al., 2024) e são compostos basicamente de ChlA. Considerando-se o número de aceptores totais de energia no fotossistema (AREA), pode-se ter uma ideia da relação entre teores de ChlA por unidade de acceptor, através da divisão dos índices ChlA e AREA obtidos pelo ClorofiLog e pelo FluorPen. O tratamento com 70 kg ha<sup>-1</sup> de N no estágio V7 do feijoeiro cv. Veloz obteve os maiores valores da relação ChlA:AREA. Ou seja, seria um indicativo de que essa planta teria uma maior unidade de clorofila *a* por acceptor de elétrons no CR/PSII, o que indica maior eficiência de interceptação de luz. Todavia, essa possível maior eficiência na interceptação de luz não resultou em maior eficiência fotoquímica nas plantas adubadas com 70 kg ha<sup>-1</sup> de N (Figuras 2 B, C e D). Como essas plantas não obtiveram também eficiência na dissipação do excesso de energia (Figuras 2 G), essa energia possivelmente foi a responsável pela ativação do ciclo das xantofilas, resultando nos maiores valores de *quenching* não fotoquímico (NPQ) obtidos (Figura 1 H).

As plantas fertilizadas com 70 e 90 kg ha<sup>-1</sup> de N no estágio V7 obtiveram os menores valores da relação ChlA:ChlB (Figura 3 E). Como houve incremento dos teores de ChlA e ChlB nessas plantas, os menores valores da relação ChlA:ChlB significa um maior incremento da ChlB em relação à ChlA. O maior incremento da ChlB em relação à ChlA pode estar associado

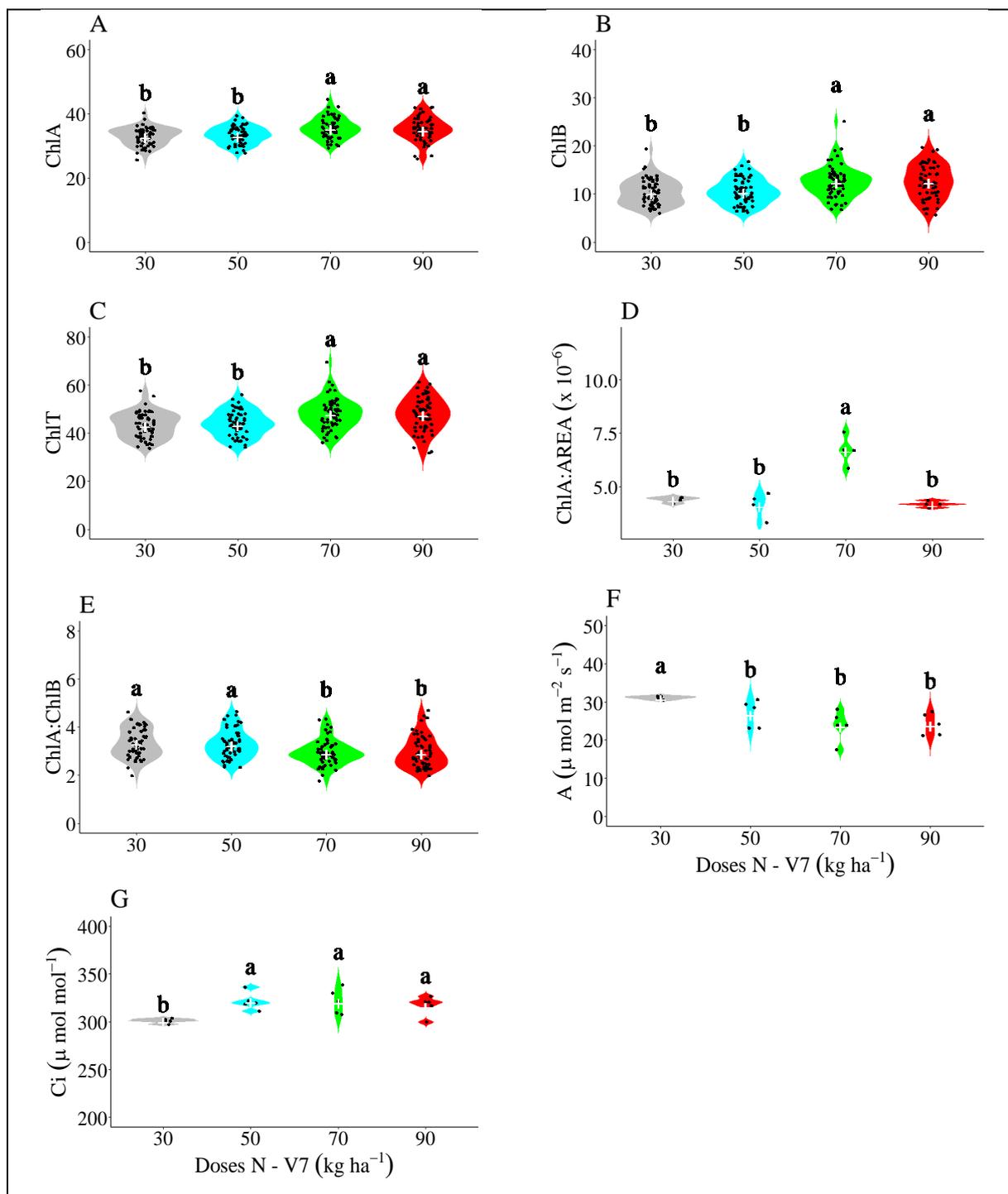
à proteção do aparato fotossintético contra a fotoxidação, uma vez que essa é uma das principais funções da ChlB (TAIZ et al., 2017b). A redução da relação ChlA:ChlB também é um indicativo do aumento da associação das clorofilas com o PSI e o centro de reação do PSII, pois as proteínas 2 (LHC2) do complexo antena do PSII possuem majoritariamente ChlB (EVANS, 1989; GREEN; DURNFORD, 1996). Assim, o aumento da redução da relação ChlA:ChlB é um indicativo da melhora da ultraestrutura dos cloroplastos (FRITSCHI; RAY, 2007).

Mesmo ao apresentar alta eficiência fotoquímica (Figuras 2 B, C e D) nas plantas com as maiores doses de N (70 e 90 kg ha<sup>-1</sup> de N), a maior fotossíntese líquida foi obtida nas plantas com a aplicação da menor dose de N (30 kg ha<sup>-1</sup> de N) (Figura 4 A). Em consequência da baixa fotossíntese líquida nas plantas adubadas com 70 e 90 kg ha<sup>-1</sup> de N, há maiores teores de CO<sub>2</sub> interno (Figura 3 G). A atividade fotossintética da planta pode ser afetada tanto pela falta quanto pelo excesso de N. O excesso de N pode reduzir a atividade fotossintética das plantas por efeito sobre a condutância estomática e por efeitos bioquímicos, sendo o principal efeito, a redução da capacidade de carboxilação da ribulose bifosfato carboxilase (Rubisco) (YANG et al., 2024).

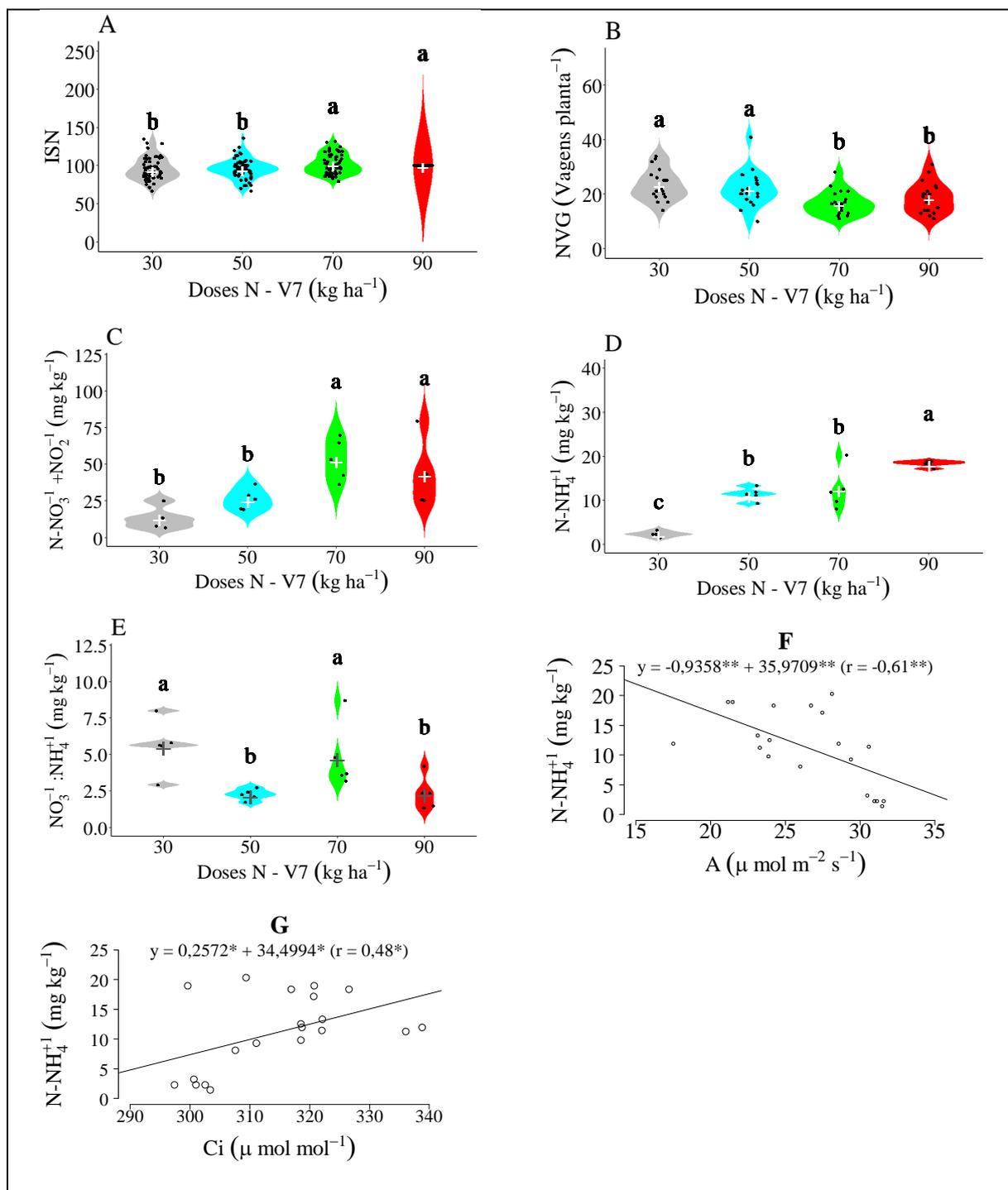
Outra questão importante é entender a relação entre o metabolismo de C e N em plantas de metabolismo C3, como o feijoeiro. A assimilação de N e C em plantas de metabolismo C3 ocorre na mesma organela, cloroplastos, e no mesmo tecido, o mesófilo. Ou seja, ocorrem no mesmo compartimento e assim competem por poder redutor. A assimilação de N só ocorre quando a cadeia fotossintética de transporte de elétrons gera agentes redutores em excesso, além do que é necessário para o ciclo C3, por exemplo, sob condições de alta luminosidade e baixo CO<sub>2</sub> (TAIZ et al., 2017). Assim, sob altas concentrações de CO<sub>2</sub>, plantas de metabolismo C3 tendem a reduzir a eficiência de uso do N quando fornecido na forma nítrica (BLOOM et al., 2012).

Com base nos índices de clorofila, foi obtido o índice de suficiência em nitrogênio (ISN) nas plantas e os valores foram altos nas maiores doses de N (70 e 90 kg ha<sup>-1</sup> de N) (Figura 4 A). Todavia, os teores de N total nas plantas não se alteraram entre os tratamentos, obtendo valor médio de 41,21 g kg<sup>-1</sup> (ANEXO 4).

Os teores de N na forma nítrica (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>+NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) e amoniacal (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) variaram com os tratamentos. Os maiores teores de N nítrico e amoniacal foram obtidos com as maiores doses de N (Figura 4 C e D). Isso significa que, nas maiores doses de N, a quantidade de N de estar acima da capacidade potencial que a planta tem de assimilar. E o acúmulo dessas formas de N pode influenciar na fotossíntese das plantas.



**FIGURA 3** Efeito das doses de N ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) no estágio V7 sob os índices de pigmentos fotossintéticos e fotossíntese em folhas completamente expandidas do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Veloz quinze dias após a aplicação dos tratamentos no estágio V7: (A) ChlA – clorofila *a*; (B) ChlB – clorofila *b*; (C) ChlT – clorofila total; (D) ChlA:AREA – relação clorofila *a* e a área sobre a curva de fluorescência ( $F_0$ ) e ( $F_M$ ), corresponde à quantidade de aceptores de elétrons e (E) ChlA:ChlB – relação clorofila *a* e clorofila *b*; (F) A – fotossíntese líquida ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  de  $\text{CO}_2$ ); (G)  $C_i$  – concentração interna de  $\text{CO}_2$  em ( $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ). Letras distintas diferem grupo de tratamentos pelo teste de Scott Knott (5% de *probabilidade*) e símbolo +: representação no gráfico da média de cada tratamento.



**FIGURA 4** Efeito das doses de N (kg ha<sup>-1</sup>) no estágio V7 sobre o índice de suficiência de N (ISN) e sobre número de vagens maiores que 40 no feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Veloz quinze dias após a aplicação dos tratamentos no estágio V7: (A) ISN – Índice de suficiência de nitrogênio; (B) NVG - Número de vagens por planta > 40 mm (Vagens planta<sup>-1</sup>); (C) teor foliar de nitrogênio nítrico (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>+NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) (mg kg<sup>-1</sup>); (D) teor foliar de nitrogênio amoniacal (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) (mg kg<sup>-1</sup>); (E) relação entre os teores foliares nitrato e amônio (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>:NH<sub>4</sub><sup>+</sup>); (F) correlação entre teores foliares de amônio (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) (mg kg<sup>-1</sup>) e fotossíntese líquida (A) (μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) e (G) correlação entre teores foliares de amônio (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) (mg kg<sup>-1</sup>) e concentração interna de CO<sub>2</sub> (Ci) (μmol mol<sup>-1</sup>). Letras distintas diferem grupo de tratamentos pelo teste de Scott Knott (5% de probabilidade) e símbolo +: representação no gráfico da média de cada tratamento. \*\*, \* e ns Significativo a 1 e 5% e não significativo pelo teste de t de Student.

O aumento da atividade de redução do nitrato a amônio, pela redutase do nitrato, inclusive, é uma forma de minimizar os efeitos deletérios de condições de estresse no feijoeiro, mantendo a atividade fotossintética das plantas (POSSO et al., 2020). O aumento da concentração de nitrato no tecido vegetal também pode levar ao incremento da formação de óxido nítrico no tecido vegetal, sendo esse um sinalizador fisiológico que ativa todo o mecanismo de defesa antioxidativo das plantas, reduzindo as formas reativas de oxigênio (DASILVA et al., 2021).

Mesmo o N utilizado estando na forma amídica, a ureia, ao aplicar e sob irrigação e com solo com pH corrigido (Tabela 1), uma parte desse N é transformado em nitrato ( $\text{N-NO}_3^-$ ) (CANTARELLA, 2007), que é a forma predominantemente absorvida pelo feijoeiro (CANTARELLA, 2007; HAWKESFORD et al., 2011). No presente trabalho, no estádio V7 observam-se 3 vezes mais  $\text{N-NO}_3^-$  nas folhas das plantas do que  $\text{N-NH}_4^+$  (Tabela 4). Os teores de nitrato obtiveram o valor máximo com  $70 \text{ kg ha}^{-1}$  e mantiveram-se com a aplicação de  $90 \text{ kg ha}^{-1}$  de N (Figura 4 C). Já os teores de amônio ( $\text{N-NH}_4^+$ ) foram maiores com a dose de  $90 \text{ kg ha}^{-1}$  de N (Figuras 4 C e D). Com isso, pode se inferir que nem todo o amônio no tecido vegetal das plantas adubadas com  $90 \text{ kg ha}^{-1}$  de N é oriundo da redução do nitrato e justifica a redução da relação nitrato:amônio nessas plantas (Figura 4 E). Como há redução da atividade de carboxilação da Rubisco com o excesso de N (YANG et al., 2024), parte do amônio nas folhas das plantas adubadas com  $90 \text{ kg ha}^{-1}$  de N pode ser oriundo do processo da fotorrespiração. E o aumento da fotorrespiração com doses mais altas de N explica a redução da fotossíntese líquida nessas plantas (Figura 3 F).

O processo de redução de N ocorre de forma simultânea à assimilação de C e eles competem por poder redutor. A assimilação de N só ocorre quando há excesso de produção de poder redutor, como com excesso de luz. Todavia, o excesso de N, dose de  $90 \text{ kg ha}^{-1}$  de N, reduziu a fotossíntese líquida das plantas (Figura 3 F). A redução da fotossíntese líquida pode estar associada ao excesso de amônio, pois quanto maiores os teores de amônio menor a fotossíntese líquida (Figura 4 F), paralisando a fixação de  $\text{CO}_2$ . Ou seja, quanto mais amônio, menos fotossíntese e conseqüentemente maiores os teores de  $\text{CO}_2$  (Figura 4 G). Todavia, não é possível com os dados obtidos saber se o aumento dos teores de N com a aplicação de  $90 \text{ kg ha}^{-1}$  de N é oriundo do processo de redução do nitrato ou da fotorrespiração, sendo necessários estudos futuros para entender e estudar mecanismos para manter a assimilação do N sem efeitos negativos sobre a fotossíntese em plantas de metabolismo C3.

Após a aplicação dos fertilizantes no estágio V7, quinze dias após, foi realizada a avaliação do número de vagens das plantas maiores que 40 mm e menores (canivetes), vagens correspondentes aos estádios R8 e R7, respectivamente. Nessa fase, somente o número de vagens grandes (> 40 mm) se alterou com os tratamentos, obtendo-se os maiores valores nas plantas com as menores doses de N (30 e 40 kg ha<sup>-1</sup> de N). As maiores doses de N podem ter estimulado as plantas a direcionarem maior energia para crescimento vegetativo, tornando esse o dreno preferencial.

O maior número de vagens com baixas doses de N pode estar associado também com a relação entre N e a sinalização hormonal nas plantas. A sinalização do ácido abscísico, da auxina e das citocininas tem estreita relação com a nutrição nitrogenada. A presença de nitrato aumenta a biossíntese de citocininas e de ácido abscísico e o transporte de auxina em *Arabidopsis*, com conseqüente aumento de crescimento de parte aérea e de raízes laterais (KIBA et al., 2011). O baixo transporte de auxina nas plantas sob deficiência de N, concentrado o fitormônio na parte aérea, pode justificar o aumento no número de vagens. Todavia, os modelos em *Arabidopsis* para descrever a relação entre nutrientes e auxina e a influência no crescimento radicular das plantas não se ajustam para culturas que possuem sistema radicular fibroso e com múltiplos desenvolvimentos (ATKINSON et al., 2014; BELLINI; PACURAR; PERRONE, 2014; GRUBER et al., 2013; SUN et al., 2020). No milho, a deficiência de N aumenta o transporte de auxina da parte aérea para as raízes das plantas e aumenta o crescimento de pelos radiculares (SUN et al., 2020). Sob deficiência de N também foi verificado o aumento da produção de óxido nitroso na parte aérea do milho, com alteração do metabolismo antioxidativo (SUN et al., 2020). Em *Vigna unguiculata* o maior número de vagens foi obtido com a menor dose de N e com a aplicação exógena de auxina (NAHID et al., 2024).

De maneira geral, no estágio vegetativo as menores doses de N proporcionaram o maior número de vagens > 40 mm e maior fotossíntese líquida. Todavia, houve baixa eficiência fotoquímica nessas plantas. Com o aumento das doses de N, há redução do número de vagens, da fotossíntese líquida, mas ocorre aumento da eficiência fotoquímica. Na dose de 90 kg ha<sup>-1</sup> há possível redução da fotossíntese líquida que pode estar associada ao aumento das formas inorgânicas de N que provoca a redução da atividade de carboxilação da Rubisco. Assim, em V7, as menores doses de N proporcionaram plantas que atendem aos requisitos de campo, que são plantas de porte mais baixo e com maior número de vagens.

#### **4.2 Resultado da aplicação do N no estágio reprodutivo (R8)**

Para obter altas produtividades, é necessário que as vagens produzidas até o início do estágio reprodutivo sejam mantidas e que haja enchimento dos grãos. Assim, em R8 foram aplicados os tratamentos em ordem inversa, mantendo-se dose final de 130 kg ha<sup>-1</sup> de N em todos os tratamentos. Após a aplicação dos tratamentos, foram realizadas as avaliações.

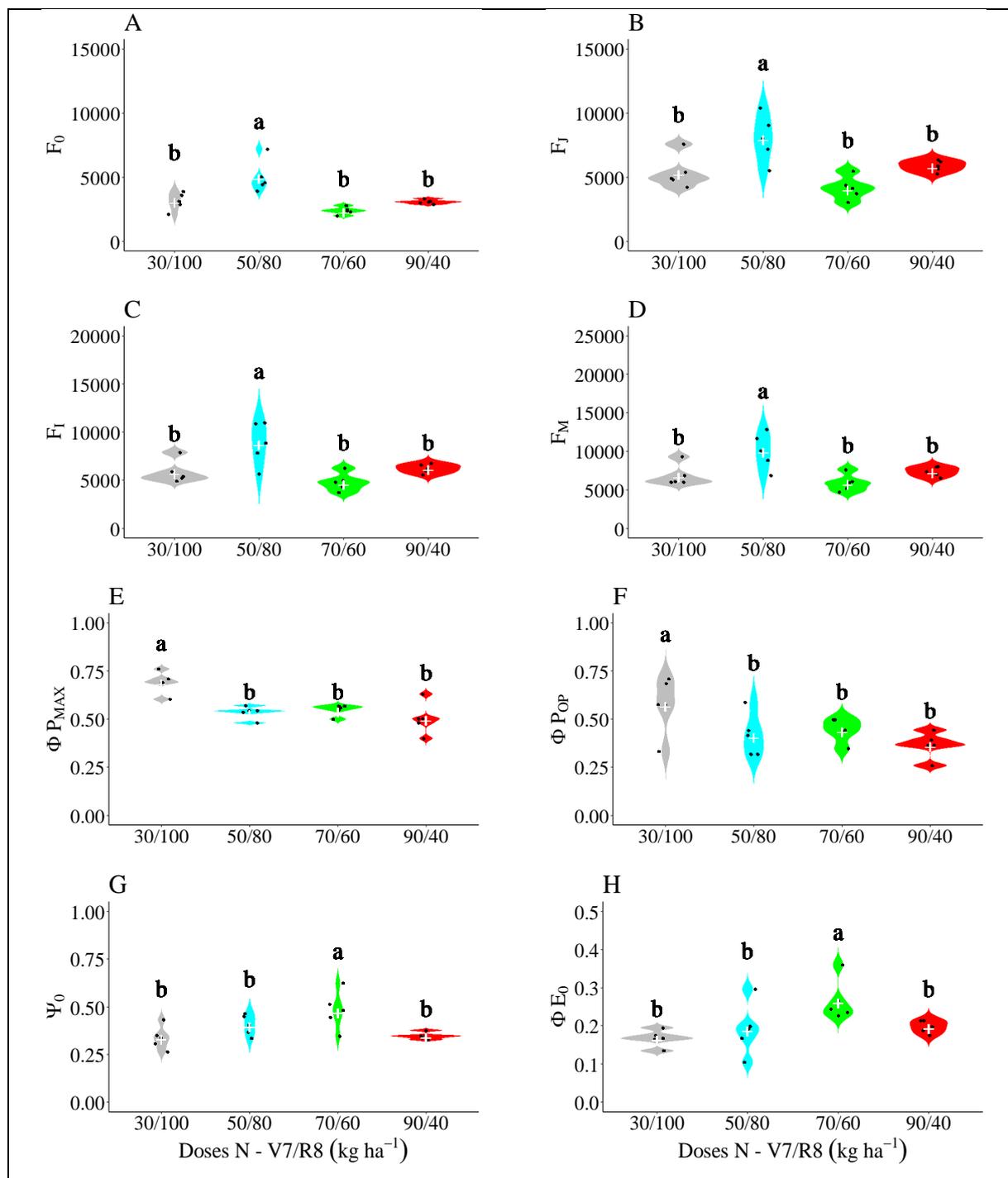
Quinze dias após a aplicação em R8, foi observada maior fluorescência inicial ( $F_0$ ), aos 2 ( $F_I$ ) e 60 ( $F_{I1}$ ) milissegundos e máxima ( $F_M$ ) nas plantas adubadas com 80 kg ha<sup>-1</sup> de N em R8 (Figuras 5 A, B, C e D). Em contrapartida, nas plantas com a maior dose de N em R8 (100 kg ha<sup>-1</sup>), foram obtidas a maioreficiência fotoquímica máxima ( $\Phi P_{MAX}$ ) e operacional ( $\Phi P_{OP}$ ) (Figuras 5 E e F). De forma semelhante ao que ocorreu na adubação em V7, as maiores eficiências fotoquímicas foram obtidas nos tratamentos com as maiores doses de N (Figuras 2 B, C e D). Em contrapartida, a eficiência pela qual a energia fixada move-se pela quinona *a* para a cadeia transportadora de elétrons ( $\Psi_0$ ) e a eficiência com qual um fóton absorvido move um elétron pela cadeia transportadora de elétrons ( $\Phi E_0$ ) foram maiores no tratamento com a aplicação de 60 kg ha<sup>-1</sup> em R8 (Figuras 5 G e H).

A alta fluorescência inicial com a aplicação de 100 kg ha<sup>-1</sup> em R8 pode estar associada ao excesso de clorofila desconectada dos centros de reações (CAZZANIGA et al., 2020; MORALES et al., 2001) que pode ocorrer sob condições de excesso de N. Todavia, essa hipótese precisa ser avaliada em trabalhos futuros. Os fótons interceptados por essas clorofilas desconectadas do fotossistema não movem elétrons pela cadeia transportadora de elétrons, o que resulta em baixa captura de elétrons pelos CR/PSII ( $TR_0/RC$ ), que foi maior com aplicação de 80 kg ha<sup>-1</sup> em R8 (Figura 6 B). Os tratamentos com maior fluxo de elétrons pela cadeia transportadora a partir do CR/PSII ( $ET_0/RC$ ) foram com aplicação de 80 e 60 kg ha<sup>-1</sup> em R8 (Figura 6 C). Todavia, o excesso de elétrons transmitidos pela cadeia transportadora de elétrons, a partir do CR/PSII ( $ET_0/RC$ ) e com a aplicação dos tratamentos com 80 kg ha<sup>-1</sup> de N em R8, está sendo dissipado na forma de calor ( $DI_0/RC$ ), obtendo-se os maiores índices (Figura 6 D).

A perda de energia dissipada na forma de calor é um mecanismo de proteção a qual as plantas adubadas com 80 kg ha<sup>-1</sup> de N em R8 parecem ter adaptado. Outra forma de proteção do fotossistema é o *quenching* não fotoquímico (NPQ), que foi maior nas plantas com as menores doses de N em R8 (60 e 40 kg ha<sup>-1</sup> de N) (Figura 6 E). Em resumo, o rendimento quântico médio de reações fotoquímicas primárias foi menor somente nas plantas fertilizadas com 60 kg ha<sup>-1</sup> de N (Figura 6 A). As demais variáveis de fluorescência de clorofila *a* avaliadas após a adubação em R8 não se alteraram com os tratamentos (ANEXO 5).

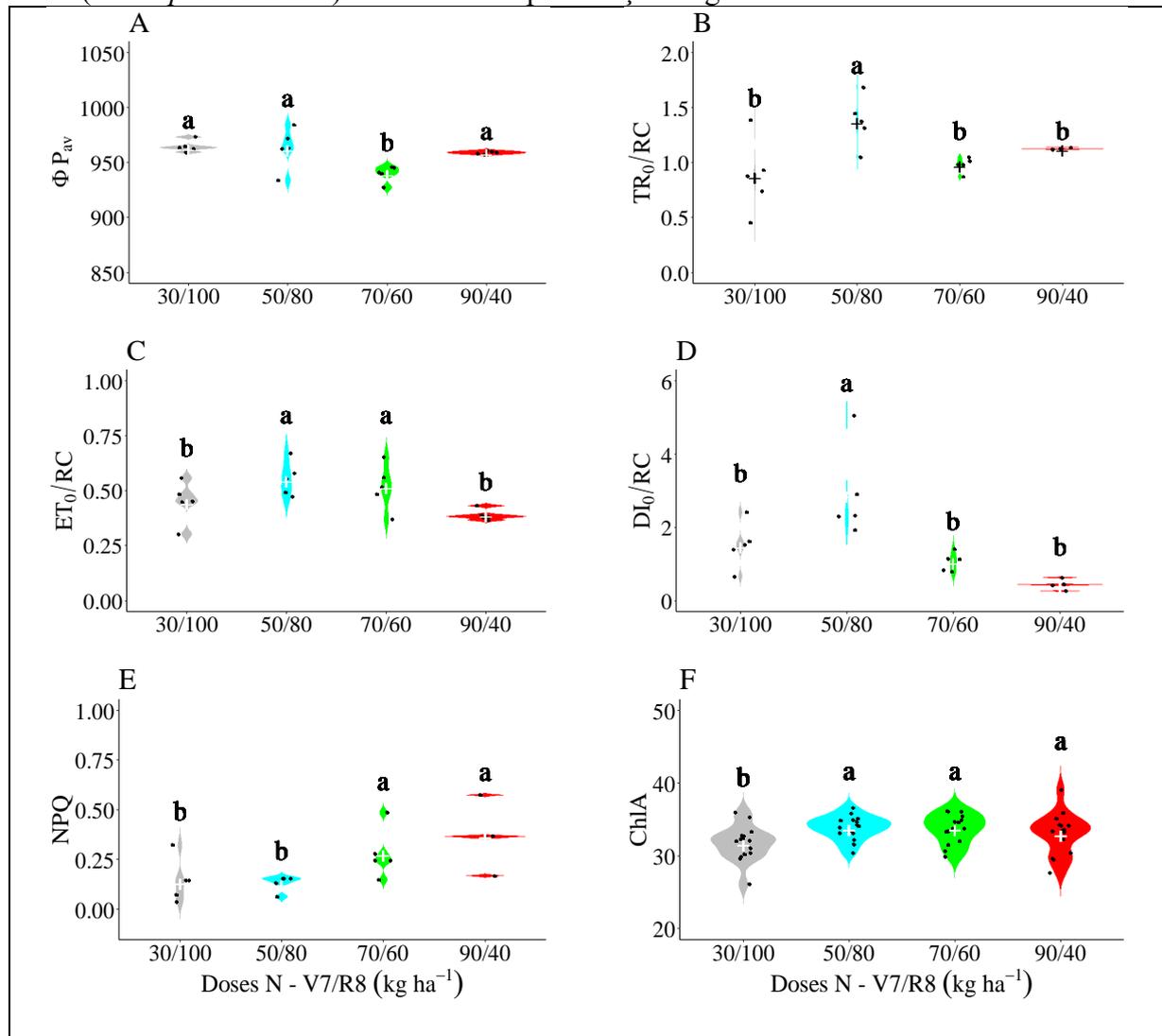
Em relação aos índices dos pigmentos fotossintéticos avaliados pelo Clorofilog, após a aplicação dos fertilizantes em R8, não foi observada alteração significativa, com exceção das

plantas adubadas com a maior dose de N em R8, que obteve os menores teores de clorofila *a* (ChlA) (ANEXO 6 e Figura 6 F).



**FIGURA 5** Efeito das doses de N no estágio V7/R8, sob os índices de fluorescência de clorofila “a”, em folhas completamente expandidas do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Veloz, quinze dias após a aplicação dos tratamentos no estágio R8: (A) F<sub>0</sub> – fluorescência inicial; (B) F<sub>J</sub> – a intensidade da fluorescência a 2 milissegundos, tempo esse necessário para o início da liberação de O<sub>2</sub> pela reação de Hill; (C) F<sub>I</sub> – a intensidade da fluorescência a 60 milissegundos, tempo necessário para a transferência de energia para o pool de plastoquinonas; (D) F<sub>M</sub> – a intensidade da fluorescência máxima em que todos os centros de reação do PSII estão abertos; (E) Φ P<sub>MAX</sub> – eficiência fotoquímica

máxima com a planta adaptada à luz actínica; (F)  $\Phi P_{OP}$  – eficiência fotoquímica operacional após a planta se adaptar à luz; (G)  $\Psi_0$  – eficiência pela qual a energia fixada move-se pela Qa para a cadeia transportadora de elétrons e (H)  $\Phi E_0$  – eficiência que um photon absorvido moverá um elétron pela cadeia transportadora de elétrons. Letras distintas diferem grupo de tratamentos pelo teste de Scott Knott (5% de probabilidade) e símbolo + : representação no gráfico da média de cada tratamento.

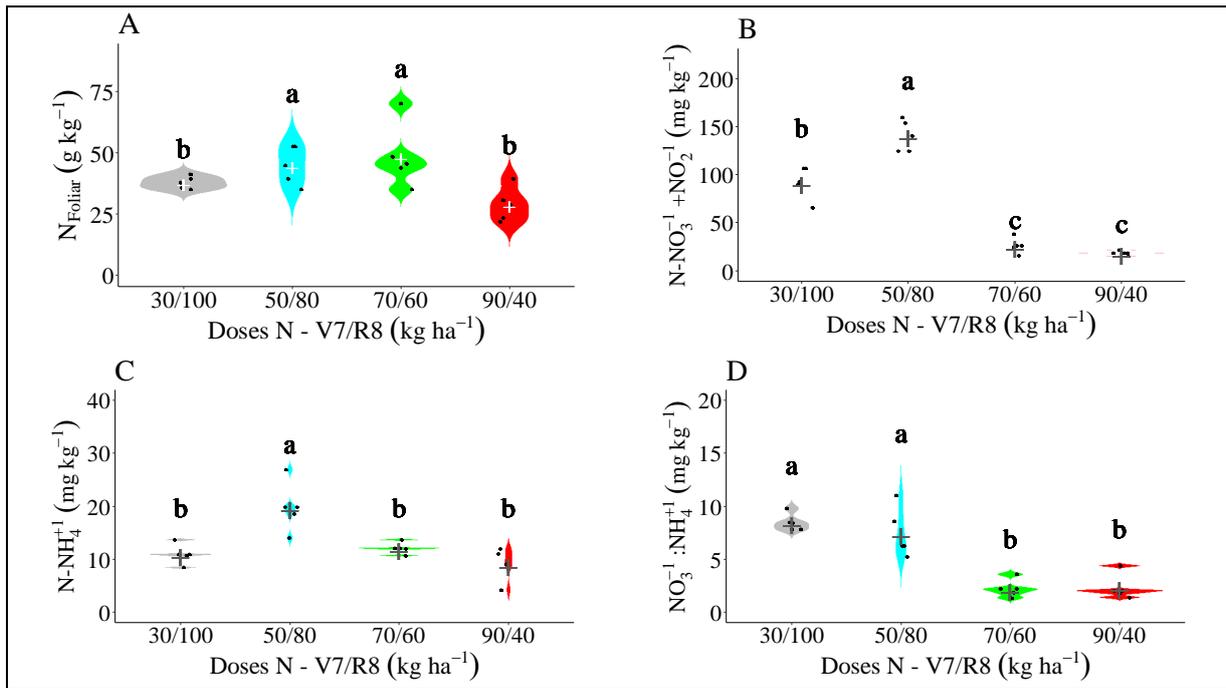


**FIGURA 6** Efeito das doses de N no estágio V7/R8, sob os índices de fluorescência de clorofila “a”, em folhas completamente expandidas do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Veloz, quinze dias após a aplicação dos tratamentos no estágio R8: (A)  $\Phi P_{av}$  – rendimento quântico médio de reações fotoquímicas primárias (B) TRo/RC – fluxo de captura de elétrons pelos CR/PSII; (C) ETo/RC – fluxo de elétrons transportado pela cadeia transportadora a partir do CR/PSII; (D) DIo/RC – taxa de dissipação de elétrons; (E) NPQ – *quenching* não fotoquímico e (F) ChlA – clorofila a. Letras distintas diferem grupo de tratamentos pelo teste de Scott Knott (5% de probabilidade) e símbolo + : representação no gráfico da média de cada tratamento.

As plantas adubadas com a maior dose de N em R8 foram as que receberam a menor dose de N em V7 e, nesse período, já obtiveram baixos teores de ChlA (Figura 3 A). A maior dose de N aplicado no estágio reprodutivo (R8) não foi suficiente para recuperar essas plantas que receberam a menor dose de N no estágio vegetativo (V7). Esse resultado é importante, pois

sugere que as alterações metabólicas provocadas pela baixa adubação nitrogenada no estágio vegetativo do feijoeiro cv. Veloz não são recuperadas com a aplicação de altas doses no estágio reprodutivo.

Os baixos teores de clorofila obtidos com 100 kg ha<sup>-1</sup> de N em R8 corroboram os menores teores foliares de N total, nítrico e amoniacal, obtidos nesse mesmo tratamento (Figuras 7, A, B e C). Mesmo aplicando altas doses de N, possivelmente esse nutriente não foi absorvido, o que pode sugerir danos no sistema radicular.

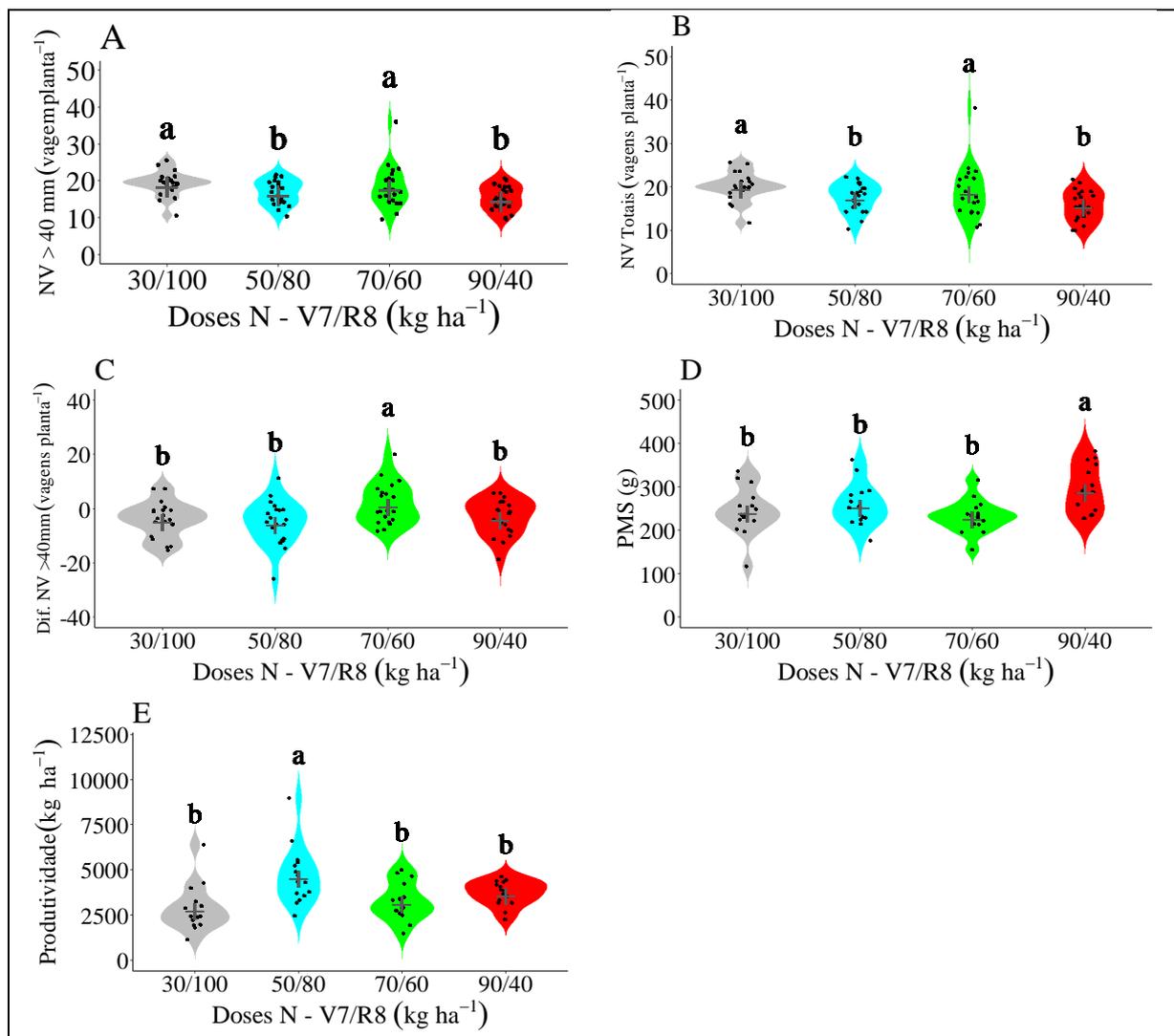


**FIGURA 7** Efeito das doses de N no estágio V7/R8 sob a nutrição nitrogenada do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Veloz quinze dias após a aplicação dos tratamentos no estágio R8: (A) teor foliar de N (g kg<sup>-1</sup>); (B) teor foliar de nitrogênio nítrico (N-NO<sub>3</sub><sup>-1</sup>+NO<sub>2</sub><sup>-1</sup>) (mg kg<sup>-1</sup>); (C) teor foliar de nitrogênio amoniacal (N-NH<sub>4</sub><sup>+1</sup>) (mg kg<sup>-1</sup>); (D) relação entre os teores foliares nitrato e amônio (NO<sub>3</sub><sup>-1</sup>:NH<sub>4</sub><sup>+1</sup>).

As baixas doses de N podem alterar o balanço de auxina, aumentando o transporte para o sistema radicular, com consequente aumento de pelos radiculares em modelos descritos para a cultura do milho (SUN et al., 2020). Para a cultura do feijoeiro, são necessários estudos para descrever essa relação e entender como o aumento do número de vagens provocado pela deficiência de N no período vegetativo pode ser mantido no período reprodutivo e não só manter as vagens, como também aumentar o peso do grão.

A baixa relação NO<sub>3</sub><sup>-1</sup>:NH<sub>4</sub><sup>+1</sup> após a adubação em R8 foi obtida com as menores doses de N (Figura 7 D), justificada pelos baixos teores do N nítrico (Figura 7 B). Já com a aplicação de 80 kg ha<sup>-1</sup> de N, foi obtida a maior relação NO<sub>3</sub><sup>-1</sup>:NH<sub>4</sub><sup>+1</sup> (Figura 7 D). As plantas com a aplicação de 80 kg ha<sup>-1</sup> de N em R8 têm os maiores teores das formas inorgânicas de N (Figuras

B e C) e N total (Figura 6 A). O processo de redução e assimilação do N ocorre somente quando ocorrer excedente de poder redutor da fase fotoquímica das plantas (TAIZ et al., 2017). Nessas mesmas plantas, adubadas com 80 kg ha<sup>-1</sup> de N, foram obtidos altos índices de transmissão de elétrons pelo fotossistema (Figuras 6 B, C e D) e alto rendimento quântico do fotossistema (Figura 6 A). Assim, é possível afirmar que, nessas plantas, o processo de redução e assimilação do N ocorreu normalmente. Esses efeitos da fotoquímica e do metabolismo do N podem resultar em alterações na biometria das plantas (Figuras 8 A a E).



**FIGURA 8** Efeito das doses de N no estágio V7/R8 sob os índices de produção e produtividade de grãos do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Veloz: (A) número de vagens maiores que 40 mm (NV > 40 mm) avaliados no momento da colheita (vagens planta<sup>-1</sup>); (B) número de vagens totais avaliado no momento da colheita (NV Totais) (vagens planta<sup>-1</sup>); (C) diferença entre o número de vagens maiores que 40 mm avaliadas entre R8 e o momento da colheita (Dif. NV > 40 mm) (vagens planta<sup>-1</sup>); (D) peso de mil semente (PMS) (g) e (E) produtividade de grãos (Produtividade) (kg ha<sup>-1</sup>).

Nas avaliações biométricas realizadas na colheita, observa-se que os tratamentos com a aplicação de 30/100 e 70/60 kg ha<sup>-1</sup> de N em V7/R8 obtiveram os maiores números de vagem maiores que 40 mm e totais (Figuras 8 A e B). A diferença entre o número de vagens avaliado na colheita e aquele avaliado após a adubação em V7 foi maior com a aplicação de 70/60 kg ha<sup>-1</sup> de N em V7/R8 (Figura 8 C), o que indica ser esse o tratamento que teve o menor abortamento de vagens entre os períodos avaliados. Todavia, o maior peso de mil grãos foi obtido com a aplicação da menor dose de N no estágio R8 (40 kg ha<sup>-1</sup> de N) (Figura 8 D). Tanto o número de vagens quanto o peso de mil grãos são componentes da produtividade do feijoeiro que sempre estão em equilíbrio e são inversamente proporcionais, ou seja, quando se aumenta uma, a outra diminui. Isso ocorre em função de diluição ou concentração dos fotoassimilado quando há muitas e poucas vagens, respectivamente. Nesse equilíbrio, a maior produtividade de grãos foi obtida com a aplicação de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N em V7 e 80 kg ha<sup>-1</sup> de N em R8 (Figura 8 E).

Dentre todas as variáveis avaliadas após a adubação em R8, a maior eficiência no transporte de elétrons pelo fotossistema (Figuras 6 B, C e D), a maior eficiência quântica do fotossistema (Figura 6 A) e o melhor estado nutricional nitrogenado, ou seja, os maiores teores foliares de N na fase de enchimento de grãos (Figura 7 A) são as variáveis que podem explicar a maior produtividade com a aplicação de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N em V7 e 80 kg ha<sup>-1</sup> de N em R8.

## 5 CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos, pode-se concluir que:

- No estágio vegetativo, baixas doses de N proporcionaram maior número de vagens do feijoeiro cv. Veloz no início do estado reprodutivo, com conseqüente maior fotossíntese líquida, contrastando com menores índices de eficiência fotoquímica. Já nesse estágio, com a maior dose de N, além de plantas com menor número de vagens, houve, também, menor fotossíntese líquida e aumento nas concentrações de N amoniacal do tecido vegetal;
- No estágio reprodutivo, R8, a dose de 80 kg ha<sup>-1</sup> de N obteve maior eficiência no transporte de elétrons pelo fotossistema, a maior eficiência quântica do fotossistema e o melhor estado nutricional nitrogenado, ou seja, maiores teores foliares de N;
- Com a aplicação de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N em V7 e 80 kg ha<sup>-1</sup> de N em R8, foram obtidas as maiores produtividades de grãos do feijoeiro cv. Veloz.