UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ
CAMPUS PROFESSORA CINOBELINA ELVAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
MESTRADO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS

GILNAIR NUNES MONTEIRO

MODULAÇÃO DO CRESCIMENTO E FISIOLOGIA DO FEIJÃO-FAVA POR FORMAS DE FORNECIMENTO DE NITROGÊNIO EM DOIS SOLOS DE REGIÃO SEMIÁRIDA SOB ESCASSEZ HÍDRICA

Bom Jesus - PI
2024

GILNAIR NUNES MONTEIRO

MODULAÇÃO DO CRESCIMENTO E FISIOLOGIA DO FEIJÃO-FAVA POR FORMAS DE FORNECIMENTO DE NITROGÊNIO EM DOIS SOLOS DE REGIÃO SEMIÁRIDA SOB ESCASSEZ HÍDRICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - PPGCA, Campus Professora Cinobelina Elvas - CPCE, da Universidade Federal do Piauí - UFPI, na área de concentração Ciência do Solo como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias.
Orientadora: Dra. Elaine Martins da Costa.
Coorientadora: Dra. Priscila Alves Barroso.
Coorientador: Dr. Artur Mendes Medeiros.

Bom Jesus - PI

2024

FICHA CATALOGRÁFICA
Universidade Federal do Piauí
Biblioteca Setorial do Campus Professora Cinobelina Elvas
Serviço de Processamento Técnico

M775m Monteiro, Gilnair Nunes.
Modulação do crescimento e fisiologia do feijão-fava por formas de fornecimento de nitrogênio em dois solos de região semiárida sob escassez hídrica./ Gilnair Nunes Monteiro. – 2024.
56 f.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Piauí, Campus Professora Cinobelina Elvas, Programa de Pós-graduação em Ciências Agrárias, Bom Jesus-PI, 2024.
Orientação: "Profa. Dra. Elaine Martins da Costa".

1. Feijão-fava. 2. Semiárido-déficit hídrico. 3. Phaseolus lunatus L. I. Monteiro, Gilnair Nunes. II. Costa, Elaine Martins da. III. Título.

CDD 583.3

Elaborado por Sérvulo Fernandes da Silva Neto – CRB-15/603

GILNAIR NUNES MONTEIRO

MODULAÇÃO DO CRESCIMENTO E FISIOLOGIA DO FEIJÃO-FAVA POR FORMAS DE FORNECIMENTO DE NITROGÊNIO EM DOIS SOLOS DO SEMIÁRIDO SOB ESCASSEZ HÍDRICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, do Campus Professora Cinobelina Elvas, da Universidade Federal do Piauí, como requisito à obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias.
Área de concentração: Ciência do Solo.
Linha de pesquisa: Fertilidade, Biologia do solo e Nutrição de plantas.

Aprovado em 28 de fevereiro de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
gov.br ELAINE MARTINS DA COSTA
Data: 14/03/2024 16:34:37-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profa. Dra. Elaine Martins da Costa (UFPI)
Orientadora

Documento assinado digitalmente
gov.br PRISCILA ALVES BARROSO
Data: 14/03/2024 18:34:46-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profa. Dra. Priscila Alves Barroso (UFPI)
Coorientadora

Documento assinado digitalmente
gov.br ARTUR MENDES MEDEIROS
Data: 15/03/2024 08:25:34-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Artur Mendes Medeiros (UFPI)
Coorientador

Documento assinado digitalmente
gov.br ALINE OLIVEIRA SILVA
Data: 14/03/2024 16:49:12-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profa. Dra. Aline Oliveira Silva (UFLA)
Membro externo a Instituição

Documento assinado digitalmente
gov.br GABRIEL BARBOSA DA SILVA JUNIOR
Data: 15/03/2024 09:31:18-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Gabriel Barbosa da Silva Júnior (UFPI)
Membro interno ao Programa

Dedico esta dissertação a Deus, pelas graças concedidas e pelos momentos difíceis que só me fizeram crê que a fé tudo pode, pela mãe que me destes, Maria Santíssima que sob seu olhar maternal intercede junto a seu filho Jesus por mim. Àqueles que mais amo nessa vida, os meus pais Olindina Nunes da Silva e Gilson Monteiro de Carvalho, as minhas irmãs Gilmair Nunes Monteiro e Francimeire Nunes Monteiro e a meu namorado Laécio Santos de Carvalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias da UFPI/CPCE, por tudo que aprendi/vivi e pelas pessoas que lá conheci, que sequer sabem da importância que tiveram durante essa caminhada.

A minha orientadora Profª. Drª. Elaine Martins da Costa por sua dedicação, ensinamentos, sugestões e pelo interesse em contribuir para o meu desenvolvimento.

A todos os membros do grupo de Microbiologia do solo.

Registro os meus agradecimentos, respeito e admiração aos meus co-orientadores Profª. Drª. Priscila Alves Barroso e Prof. Dr. Artur Mendes Medeiros.

Ao tio Alzino Prudêncio e aos amigos Tatiana Santos, Lucas Quirino e Lucas Almeida, anjos bons na minha vida.

Agradeço a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pela concessão da bolsa de mestrado, possibilitando a realização desta pesquisa.

RESUMO

Em regiões semiáridas, um fator limitante ao desenvolvimento das leguminosas é o déficit hídrico, causando sérios danos morfofisiológicos e bioquímico. Uma das alternativas para melhoraria da tolerância das leguminosas à seca seria a melhoria da sua nutrição nitrogenada. O objetivo desse estudo foi avaliar a eficiência da inoculação com *Bradyrhizobium viridifuturi*, bem como da aplicação de fertilizante químico nitrogenado na modulação do crescimento e fisiologia de plantas de feijão-fava (*Phaseolus lunatus* L.) cultivadas em casa de vegetação, sob níveis de déficit hídrico em dois solos do semiárido piauiense. Foram conduzidos dois experimentos, um para cada solo (arenoso e franco-arenoso), com delineamento em blocos casualizados e os tratamentos arranjados em esquema fatorial 3 x 3, correspondendo a três formas de fornecimento de nitrogênio (N) [N mineral (ureia), inoculação com *B. viridifuturi* (UFLA03-84) e sem inoculação e sem nitrogênio] sob três níveis hídricos [seca severa (30% da capacidade de vaso - CV), seca moderada (60% CV) o controle (90% CV)]. A escassez hídrica afetou negativamente a nodulação, parâmetros morfométricos, produção de biomassa e acúmulo de nitrogênio nas plantas em ambos os solos. A inoculação com *B. viridifuturi* aumentou a nodulação das plantas nos diferentes níveis hídricos nos dois solos, a eficiência de carboxilação da rubisco e a fotossíntese líquida nas plantas cultivadas no solo arenoso sob seca severa. A fonte de N mineral foi a mais eficiente na produção de biomassa vegetal no solo arenoso, no acúmulo de nitrogênio e conteúdo de pigmentos fotossintéticos nos três níveis hídricos, em ambos os solos. A ureia aumentou ainda a eficiência da carboxilação da rubisco e fotossíntese líquida das plantas sob seca severa no solo arenoso. O uso do nitrogênio mineral é mais indicado que a inoculação com *B. viridifuturi* para melhoraria da tolerância do feijão-fava ao déficit hídrico, especialmente no solo arenoso.

Palavras-chave: *Phaseolus lunatus* L. Fixação biológica de nitrogênio. Inoculação. Déficit hídrico.

ABSTRACT

In semi-arid regions, a limiting factor for the development of legumes is the drought. One alternative to improve legume tolerance to drought would be to enhance their nitrogen nutrition. The aim of this study was to evaluate the efficiency of inoculation with *Bradyrhizobium viridifuturi*, as well the application of nitrogen chemical fertilizer, in modulating the growth and physiology of lima bean plants (*Phaseolus lunatus* L.) under levels of water deficit in two soils from the semi-arid region of Piauí, in a greenhouse. Two experiments were conducted, one for each soil type (sandy and sandy loam), using a randomized block design with treatments arranged in a factorial scheme (3 x 3): three nitrogen (N) supply forms [mineral N (urea), inoculation with *B. viridifuturi* (UFLA03-84), and a control without inoculation and nitrogen] under three water levels [severe drought (30% of pot capacity - PC), moderate drought (60% PC), and control (90% PC)]. Drought negatively affected nodulation, morphometric parameters, biomass production, and nitrogen accumulation in plants in both soils. Inoculation with *B. viridifuturi* increased plant nodulation at different water levels in both soils, rubisco carboxylation efficiency, and net photosynthesis in plants grown in sandy soil under severe drought. The mineral N source was the most efficient in producing plant biomass in sandy soil, nitrogen accumulation, and photosynthetic pigment content at all three water levels in both soils. This source also increased rubisco carboxylation efficiency and net photosynthesis of plants under severe drought in sandy soil. The use of mineral nitrogen is more recommended than inoculation with *B. viridifuturi* to improve lima bean tolerance to water deficit, especially in sandy soil.

Keywords: *Phaseolus lunatus* L. Biological nitrogen fixation. Inoculation. Drought.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Altura de planta, diâmetro do coleto e número de trifólio de plantas de feijão-fava sob diferentes tratamentos com e sem nitrogênio, e inoculação com *Bradyrhizobium viridifuturi*, submetidas ao déficit hídrico.....26

Figura 2 - Número de nódulos e massa seca de nódulos de plantas de feijão-fava dos diferentes tratamentos de inoculação com *Bradyrhizobium viridifuturi* e aplicação de nitrogênio mineral, sob condições de déficit hídrico.....28

Figura 3 - Massa seca da parte aérea, raiz, total, e tolerância relativa ao estresse de plantas de feijão-fava dos diferentes tratamentos de inoculação com *Bradyrhizobium viridifuturi* e aplicação de nitrogênio mineral, sob condições de déficit hídrico.....29

Figura 4 - Acúmulo de nitrogênio na parte aérea de plantas de feijão-fava sob diferentes tratamentos com e sem nitrogênio, e inoculação com *Bradyrhizobium viridifuturi*, submetidas ao déficit hídrico.....31

Figura 5 - Fotossíntese líquida, transpiração e condutância estomática de plantas de feijão-fava submetidas aos diferentes tratamentos com e sem nitrogênio, e inoculação com *Bradyrhizobium viridifuturi*, e sob condições de déficit hídrico.....32

Figura 6 - Concentração interna de CO_2, eficiência de carboxilação da Rubisco, eficiência instantânea do uso da água e teor relativo de água de plantas de feijão-fava dos diferentes tratamentos de inoculação com *Bradyrhizobium viridifuturi* e aplicação de nitrogênio mineral, sob condições de déficit hídrico.....34

Figura 7 - Teores de clorofila *a*, clorofila *b*, clorofila total e carotenoides de plantas de feijão-fava submetidas aos diferentes tratamentos com e sem nitrogênio, e inoculação com *Bradyrhizobium viridifuturi*, e sob condições de déficit hídrico.....38

Figura 8 - Análise de componentes principais para variáveis estudadas em plantas de feijão-fava expostas aos diferentes tratamentos com e sem nitrogênio, e inoculação com *Bradyrhizobium viridifuturi*, e sob condições de déficit hídrico em dois tipos de solo 39

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1	A cultura do feijão-fava	12
2.2	Impactos do déficit hídrico na produção vegetal	13
2.3	Fixação biológica de nitrogênio na cultura do feijão-fava	15
3	METODOLOGIA	19
3.1	Local de condução dos experimentos	19
3.2	Delineamento experimental	19
3.3	Estirpe inoculante	19
3.4	Origem e caracterização dos solos	20
3.5	Calagem e adubação dos solos	21
3.6	Tratamento de sementes e inoculação	21
3.7	Tratamentos de déficit hídrico	22
3.8	Análises fisiológicas	22
3.9	Parâmetros de crescimento e acúmulo de nitrogênio na parte aérea	23
3.10	Análise estatística	24
4	RESULTADOS	25
4.1	Parâmetros morfométricos	25
4.2	Nodulação	27
4.3	Produção de biomassa	28
4.4	Acúmulo de nitrogênio	30
4.5	Parâmetros fisiológicos	31
4.6	Pigmentos fotossintéticos	36
4.7	Análise de componentes principais	37
5	DISCUSSÃO	40
6	CONCLUSÃO	45
	REFERÊNCIAS	46
	ANEXOS	54

1 INTRODUÇÃO

O feijão-fava (*Phaseolus lunatus* L.) é uma das principais leguminosas cultivadas em regiões tropicais e apresenta grande importância no contexto social e econômico no Brasil, com forte expansão principalmente na região Nordeste, sendo plantada por pequenos e médios produtores em regime de sequeiro. Essa cultura apresenta boa adaptação às condições semiáridas e alta variabilidade genética (ASSUNÇÃO-FILHO et al., 2022; SILVA et al., 2023), além de ser apreciada nas mais diversas culinárias devido ao sabor característico e conteúdo proteico.

Apesar da importância socioeconômica e adaptação as condições semiáridas, essa cultura ainda é cultivada com baixo nível tecnológico, reduzindo assim o seu potencial produtivo. Uma forma de garantir uma maior produtividade, seria a adoção de um manejo adequado, principalmente no que diz respeito à adubação (PEREIRA-FILHO et al., 2022) e manejo da irrigação, especialmente em regiões tropicais. O nitrogênio (N) destaca-se como um nutriente exigido grande quantidade pelo feijão-fava para alcançar rendimentos satisfatórios (LOPES et al., 2015). Esse nutriente pode ser fornecido à cultura por meio da adubação química nitrogenada ou do processo de fixação biológica de nitrogênio (FBN) realizado por bactérias diazotróficas (rizóbios) (COSTA et al. 2017; RODRIGUES et al., 2021).

O feijão-fava é capaz de estabelecer simbiose com diferentes gêneros de rizóbios, sendo o gênero *Bradyrhizobium* o simbionte mais comumente relatado (COSTA et al., 2017; COSTA NETO et al., 2017; CHIBEBA et al., 2020; RODRIGUES et al., 2021). Estirpes desse gênero são capazes de suprir o N requerido pela cultura, de forma econômica e sustentável, reduzindo o uso de fertilizantes químicos nitrogenados (COSTA et al., 2017; COSTA NETO et al., 2017; RODRIGUES et al., 2021). Costa et al. (2017), em estudo conduzido em um solo franco-arenoso, verificaram que algumas estirpes *Bradyrhizobium* se destacaram no fornecimento de N ao feijão-fava, incluindo a UFLA03-84 (*B. viridifuturi*). Porém, mais estudos são necessários para confirmar sua eficiência simbiótica na cultura, em diferentes condições edafoclimáticas e genótipos.

A forma de fornecimento de N, seja uma fonte mineral ou biológica, pode modular o crescimento, aspectos nutricionais e fisiológicos de espécies de leguminosas (MENDES et al., 2020; ROCHA et al., 2023). Em alguns estudos foi

demonstrado que a inoculação com estirpes de *Bradyrhizobium* resultou em aumento no acúmulo de N nos tecidos, conteúdo de clorofila e carotenoides e eficiência fotossintética (MENDES et al., 2020; SHETEIWY et al., 2021; ROCHA et al., 2023). No entanto, nem sempre são observadas respostas positivas, pois vários fatores edafoclimáticos podem interferir na sobrevivência das bactérias e na formação de uma simbiose eficiente (GOYAL et al., 2021; DOLLETE et al., 2024).

Em condições semiáridas, um fator limitante à eficiência da simbiose rizóbios-leguminosas e ao desenvolvimento das culturas é o déficit hídrico (MOURADI et al., 2017; DOLLETE et al., 2024). O feijão-fava, mesmo apresentando certa tolerância ao déficit hídrico, tem sido afetado pela seca, levando a alterações morfofisiológicas e bioquímicas nas plantas (MARTÍNEZ-NIETO et al., 2020, 2022), culminando em menor produtividade. Uma das alternativas para aumentar a tolerância dessa cultura ao déficit hídrico seria a melhoria da nutrição nitrogenada, por meio da inoculação com estirpes de rizóbios eficientes na FBN e tolerantes à seca ou o uso de fertilizantes químicos nitrogenados.

Sob condições de seca, a disponibilidade adequada de N é muito importante para as plantas sintetizarem osmólitos (como glicina, prolina e açúcares solúveis), visando a proteção das suas células em resposta a esse estresse (LIU et al., 2022). No entanto, a falta de umidade no solo pode restringir a absorção e translocação do N e outros nutrientes (KHALIL et al., 2020; KHATUN et al., 2021). As características físico-químicas e biológicas dos solos podem influenciar a capacidade de retenção de água e o desenvolvimento das raízes para captação de água e nutrientes (PATEL et al., 2021), refletindo no desenvolvimento e rendimento das culturas, em condições de déficit hídrico (KHALIL et al., 2020).

Nessa perspectiva, as hipóteses desse trabalho são que o déficit hídrico afeta negativamente o crescimento e fisiologia do feijão-fava e que o desempenho das plantas sob deficiência hídrica seria melhor num solo franco-arenoso em relação ao um solo arenoso e que a inoculação com *Bradyrhizobium viridifuturi* (UFLA03-84) bem como a aplicação de ureia favorecem o crescimento e a melhoria de aspectos fisiológicos dessa cultura sob escassez hídrica. Para testar essas hipóteses, avaliamos a nodulação, o crescimento, o acúmulo de N e indicadores fisiológicos em plantas feijão-fava submetidas a inoculação com a estirpe UFLA03-84 e a aplicação de N mineral sob níveis de déficit hídrico em um solo arenoso e outro franco-arenoso do semiárido piauiense.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 A cultura do feijão-fava

O feijão-fava (*Phaseolus lunatus* L.) pertence à família Fabaceae e compõe as mais de 70 espécies do gênero *Phaseolus*, destacando-se por ser uma das cinco espécies cultivadas e de importância econômica (BITOCCHI et al., 2017). Além disso, apresenta ampla distribuição em todo o mundo, abrangendo quase todos os continentes, desde a América do Norte, América do Sul, Europa, África, até o Sudeste da Ásia (CHACÓN; MARTÍNEZ, 2017). É considerada como a segunda cultura de maior importância dentro do gênero, ultrapassada apenas pelo feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) (SERRANO-SERRANO et al., 2012).

O centro de origem dessa leguminosa foi evidenciado na América Central e região dos Andes onde a forma selvagem de *P. lunatus* foi domesticada de maneira isolada e independente (BITOCCHI et al., 2017). Na região dos Andes originou-se às variedades de sementes grandes (MOTTA-ALDANA et al., 2010), enquanto na América Central há indícios de origem de sementes pequenas (Serrano-Serrano et al., 2012). Os aspectos morfológicos de genótipos de feijão-fava apresentam diferenças notáveis, quanto a coloração, tamanho das sementes, porte e hábito de crescimento, podendo ser determinado e indeterminado trepador ou ramificado (BEYRA; ARTILES, 2004).

A semente de feijão-fava apresenta uma composição rica em proteínas, carboidratos, fibras e minerais como K, Zn, Ca e Fe (CHEL-GUERRERO et al., 2012). Estes elementos são essenciais na dieta humana e animal e faz do feijão-fava uma fonte alternativa em substituição ao consumo do feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) (MAQUET et al., 1999). Os grãos podem ser consumidos secos ou ainda verdes apreciado por apresentar um sabor característico e marcante refletindo à alguma região do mundo e as mais variadas culinárias e culturas.

A germinação da semente de feijão-fava é epígea, típica das dicotiledôneas, as folhas dispõe de uma cor verde-escuro que permanece até depois do amadurecimento das vagens, a inflorescência apresenta-se em forma de rácimo, na maioria das vezes maiores que as folhas, as vagens possuem um formato achatado e recurvado com

sua extremidade pontuda e comporta de duas a quatro sementes que podem ser arredondadas, romboides ou em forma de rins, as raízes são bem desenvolvidas com tendência a ser tuberosas (VIEIRA, 1992).

Vieira (1992) retrata que o feijão-fava semelhante ao feijão-comum se adapta a diversas condições ambientais, mas o seu desenvolvimento é mais favorecido quando em condições úmidas e quentes. Pode ser utilizado como adubo verde ou cultura de cobertura para proteção do solo, devido a elevada produção de biomassa, contribuindo ainda com a liberação de nitrogênio (PEGADO, 2008).

Ademais, a cultura adapta-se as condições edafoclimáticas de regiões semiáridas que se caracterizam por apresentar prolongados períodos de estiagem, baixa amplitude térmica, temperaturas elevadas e a solos geralmente com textura arenosa ou franco-arenosa (FOFANA et al., 1997 e SANTOS et al., 2017).

O feijão-fava apresenta sensibilidade quanto a restrição hídrica, principalmente quando se refere as variações climáticas que vem ocasionando mudanças no período chuvoso entre regiões e anos de cultivo, resultando em variações na produção e consequentemente em um baixo rendimento anual da cultura (JACINTO JUNIOR; LUCENA, 2022).

No último censo realizado no Brasil no ano de 2022 a produtividade do feijão-fava alcançou 12.061 toneladas em área colhida de 35.609 hectares. Dentre as regiões brasileiras produtoras de feijão-fava o Nordeste é responsável por mais de 90%, liderando a produção nacional (IBGE, 2022).

Mesmo tendo em vista a grande importância socioeconômica do feijão-fava no Brasil a cultura ainda não foi totalmente explorada agronomicamente, uma vez que esta geralmente é cultivada em regime de sequeiro em sua maioria por pequenos produtores que detém de pouca ou nenhum tipo de tecnologia, culminando em uma baixa produtividade (LOPES et al., 2015).

2.2 Impactos do déficit hídrico na produção vegetal

A água é um bem comum a todos e vem sofrendo reduções significativas nas últimas décadas, afetando sobretudo a vida vegetal em todo o planeta (HANNA et al., 2016). As regiões áridas e semiáridas por exemplo são as que mais sofrem com a

escassez hídrica, caracterizada por apresentar baixa pluviosidade anual, limitando o desenvolvimento das culturas agrícolas devido aos danos causados nos estádios fenológicos das plantas (ANJUM et al., 2016).

Em várias regiões do mundo, a maioria das culturas agrícolas são cultivadas de maneira que o suprimento de água dependa quase que exclusivamente das chuvas, o que muitas vezes devido à grande variabilidade de precipitação pluviométrica, estas sofrem com o déficit hídrico, causando uma condição estressante para planta, culminando em mudanças nas respostas fisiológicas durante suas fases de desenvolvimento e em consequência uma baixa produtividade (ZANDALINAS et al., 2017).

Bianchi et al. (2017) descreve uma série de fatores abióticos e bióticos que causam estresse em plantas, dentre eles destaca-se a falta de água, uma vez que este fator pode prejudicar diversos processos fisiológicos essenciais para o desenvolvimento vegetal. O excesso (inundação) e a falta de água (déficit hídrico) caracterizam uma condição de estresse hídrico, sendo este último muito comum em regiões semiáridas, principalmente em épocas de seca. As condições ambientais e as propriedades físicas do solo, como textura, estrutura, porosidade infiltração, capacidade de retenção de água e nutrientes influenciam diretamente a produtividade das culturas (PATEL et al., 2021).

Uma planta sofre déficit hídrico quando a quantidade de água não se encontra suficiente, ficando em sua maioria retida no solo, reduzindo assim a disponibilidade para o suprimento pelas raízes, de forma a interferir na expressão do potencial produtivo, afetando sobretudo na taxa de transpiração (ANJUM et al., 2011). Por sua vez, as plantas respondem a essa condição estressante através de características morfofisiológicas, bioquímicas, celulares e moleculares (ILYAS et al., 2021).

Além disso, o estresse hídrico também causa redução no desenvolvimento de folhas e no crescimento de plantas, devido a diminuição da fotossíntese, danos oxidativos por causa da produção excessiva de espécies reativas de oxigênio, causando degradação de proteínas, morte celular e peroxidação lipídica (TODAKA et al., 2017). A translocação dos nutrientes também é afetada pela falta de água (ANJUM et al., 2017a). Ademais, fatores como duração do déficit hídrico, intensidade e frequência levam a mudanças nas respostas fisiológicas das plantas (BHATNAGAR-MATHUR et al., 2007).

Por consequência, os vegetais que passam por esse tipo de estresse, conseguem desenvolver mecanismos que toleram ao déficit hídrico, como o melhoramento do sistema radicular, da estrutura foliar, do conteúdo relativo de água, ajuste osmótico e regulação estomática (FANG; XIONG, 2015; ILYAS et al., 2021). Ilya et al. (2020) ainda destaca a eliminação de espécies reativas de oxigênio e vias de sinalização de cálcio e fitohormônios como mecanismos de respostas das plantas contra o estresse hídrico.

Conforme Vieira (1992), a falta de chuva caraterizada como seca, é o fator que mais limita a produtividade de feijões com destaque para a espécie *Phaseolus vulgaris*. O feijão-fava por sua vez em comparação com o feijão comum é mais resistente à seca e ao excedente de umidade. No entanto, mesmo sendo adaptado e cultivado em sua maioria em regime de sequeiro o feijão-fava também sofre interferências significativas no seu desenvolvimento, principalmente no período de florescimento e enchimento de grãos quando em condições de escassez hídrica (OLIVEIRA et al., 2014).

Jacinto Junior et al. (2019), avaliam a tolerância de quatro genótipos de feijão-fava cultivados no Ceará quanto a sua resistência ao estresse hídrico, sendo que um dos quatro genótipos apresentou maior tolerância a seca, cujos parâmetros morfofisiológicos que justificaram o resultado foi, maiores taxas de fotossíntese em associação a menores valores de transpiração, apresentando maior eficiência do processo fotossintético com redução de perda de água.

2.3 Fixação biológica de nitrogênio na cultura do feijão-fava

O nitrogênio (N) é um nutriente fundamental para a vida na Terra, contribuindo diretamente no desenvolvimento e crescimento de plantas, tornando-se limitante quando não presente, afetando diversos processos metabólicos do vegetal (TEIXEIRA et al., 2010). Apesar do N ser o elemento gasoso (N_2) de maior abundância na atmosfera, representando em sua totalidade mais de 78% do ar atmosférico, esse não se encontra prontamente disponível, necessitando passar por reações químicas para ser convertido a amônio (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-), formas utilizadas pelos vegetais e outros organismos. Na camada sólida da terra chamada de litosfera o N é encontrado

em quantidades muito baixas, principalmente em regiões de clima tropical (SILVA et al., 2024).

A transformação do N_2 para formas utilizáveis pelas plantas se dá através de três processos: descargas elétricas, que contribuem em pequenas quantidades para fornecimento do N as culturas; o processo industrial (Haber-Bosch), através do uso de combustíveis fósseis, elevadas pressões e temperaturas para fabricação dos fertilizantes nitrogenados, o os tornam muito onerosos; e fixação biológica de nitrogênio (FBN), realizada por organismos diazotróficos que possuem uma enzima chamada nitrogenase, a qual catalisa a ligação tripla do N_2 em amônia (NH_3). Em termos globais, estima-se que a FBN contribui com cerca de 65% do N que entra anualmente no planeta (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

Porém, de modo geral, a agricultura convencional depende de adubos nitrogenados, bem como de outros fertilizantes químicos, os quais têm sido utilizados em larga escala para aumentar a produtividade. Apesar do uso excessivo desses fertilizantes, as plantas só conseguem utilizar em torno de 50% de todo N aplicado (TEIXEIRA et al., 2010). Além disso, é importante ressaltar que os fertilizantes nitrogenados apresentam alto custo para os agricultores, e pode se tornar um poluente ambiental, devido às perdas que ocorrem após a sua aplicação, ao ser carreado para o lençol freático (GUEDES et al., 2010).

Na perspectiva de reduzir a utilização e mitigar os impactos ambientais ocasionados pelo uso indiscriminado de fertilizantes nitrogenados surgem alternativas sustentáveis e ecologicamente corretas que elevam a produtividade, atendendo a necessidade das culturas. Moreira e Siqueira (2006) apresentam FBN como uma fonte de nutrição para a maioria das espécies vegetais de interesse agronômico, com destaque para as leguminosas.

O processo de FBN, acontece exclusivamente nos seres procariontes pertencentes aos domínios Archea e Bacteria (RAYMOND et al., 2004). Esses diazotróficos podem ser de vida livre, viver associados aos tecidos vegetais e fixar o N_2 sem a necessidade de estruturas específicas, ou então, no caso das bactérias fixadoras de nitrogênio nodulíferas em leguminosas (rizóbios), estabelecer uma simbiose com plantas, resultando na formação de estruturas radiculares/caulinares hipertróficas chamadas de nódulos (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

Na maioria das leguminosas o processo de FBN ocorre nos nódulos que se originam nas raízes, os quais são formados por meio de sinalizações moleculares

entre a planta e os rizóbios (DABESSA et al., 2018). A partir dos nódulos, essas bactérias captam o N_2 e o transformam em amônia, a qual será convertida em aminoácidos requeridos pelas plantas; por sua vez, a planta fornece aos microssimbiontes os carboidratos necessários para o seu metabolismo (CARDOSO et al., 2017).

As simbioses rizóbios-leguminosas destacam-se por serem os agentes fixadores de N_2 mais importantes em sistemas agrícolas (HERRIDGE et al., 2008). A fixação do N_2 realizado por bactérias diazotróficas é um dos mecanismos fundamentais para muitas espécies vegetais e tem trazido diversos benefícios às culturas, podendo dispensar parcial ou totalmente o uso de fertilizantes nitrogenado (GEURTS et al., 2012).

O feijão-fava, assim como outras leguminosas, possui a capacidade de estabelecer uma simbiose mutualista com rizóbios, principalmente do gênero *Bradyrhizobium* (ARAÚJO et al., 2015; RODRIGUES et al., 2021). Porém, até o momento ainda não existem inoculantes recomendado para essa cultura, reforçando a necessidade de pesquisas para obtenção desses inoculantes.

Santos et al. (2011) e Araújo et al. (2015), avaliando a diversidade genética de estirpes de rizóbios isoladas de nódulos de feijão-fava, indicaram predominância do gênero *Bradyrhizobium* entre as estirpes identificadas. Antunes et al. (2011) avaliaram a eficiência simbiótica de estirpes de rizóbios nativas de áreas produtoras da cultura no Piauí, e verificaram que algumas dessas estirpes promoveram melhoria na nutrição nitrogenada da cultura.

Rodrigues et al. (2021), trabalhando com 66 estirpes isoladas de nódulos de feijão-fava em solo do semiárido piauiense, identificaram a maioria das estirpes pertencentes ao gênero *Bradyrhizobium* e seis das estirpes destacaram-se na simbiose com a cultura em condições axênicas e em vasos solo não estéril, com potencial de substituição parcial da adubação química nitrogenada.

Costa et al. (2017) examinaram 17 estirpes de *Bradyrhizobium* isoladas de sete espécies de leguminosas quanto a eficiência simbiótica em feijão-fava. As estirpes mais eficientes foram isoladas de *Inga* sp. (INPA54B) e *Swartzia* sp. (INPA 86A). Além dessas, outra estirpe eficiente foi UFLA03-84 (*Bradyrhizobium viridifuturi*), a qual foi isolada de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L.) e é recomendada como inoculante para essa cultura do no Brasil (MAPA, 2011).

No entanto, existem algumas limitações relacionadas a maioria dos solos do semiárido a exemplo da acidez, baixa capacidade de troca de cátions, dentre outros fatores indicativos de baixa fertilidade, que podem limitar o desenvolvimento de estirpes de rizóbios introduzidas, uma vez que estas podem não se adaptar as condições da região. Rufini et al. (2011) destaca alguns fatores que podem dificultar a simbiose rizóbios-leguminosa e fixação de N_2, como baixa capacidade de troca catiônica, concentrações elevadas de alumínio e manganês e pH baixo.

3 METODOLOGIA

3.1 Local de condução dos experimentos

Foram conduzidos dois experimentos, com dois tipos de solos (arenoso e franco-arenoso), no período de julho a agosto de 2023, na casa de vegetação do *Campus* Professora Cinobelina Elvas, da Universidade Federal do Piauí (CPCE/UFPI), localizada no município de Bom Jesus, estado do Piauí, Brasil. Durante o período experimental, a temperatura e umidade interna na casa de vegetação foram de 28 °C ± 2 °C e 50% ± 10%, respectivamente.

3.2 Delineamento experimental

Para cada tipo de solo, o delineamento experimental foi o de blocos casualizados e os tratamentos arranjados em esquema fatorial 3 × 3, com 4 repetições. Os tratamentos foram constituídos por três níveis hídricos: controle (90% da capacidade de retenção de água no solo no vaso - CV), seca moderada (60% CV) e seca severa (30% CV), e três formas de fornecimento de nitrogênio (N): inoculação com a estirpe UFLA03-84 (IN), sem inoculação e adubação com N mineral (NM) e sem N mineral e sem inoculação (SI). Em cada vaso foi deixado apenas uma planta.

3.3 Estirpe inoculante

Uma vez que ainda não existe estirpe recomendada para inoculação em feijão-fava, foi usado nesse estudo a estirpe UFLA03-84 (*Bradyrhizobium viridifuturi*), homologada pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento como inoculante para a cultura do feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp) no Brasil (MAPA,

2011). Essa estirpe foi selecionada em função da sua boa eficiência na fixação de N_2 em simbiose com feijão-fava em estudo prévio (COSTA et al*.,* 2017).

3.4 Origem e caracterização dos solos

Os dois solos usados foram provenientes de áreas sob vegetação nativa, sem histórico de utilização anterior de qualquer tipo de inoculante microbiano, ambos coletados em região semiárida no município de Bom Jesus, PI, um na Comunidade Lagoa do Barro (9°07'17"S e 44°21'17"O) e o outro no CPCE/UFPI (9°05'03"S e 44°19'38"O). Para cada solo, foi realizado o georreferenciamento de um ponto principal e a partir dele foram coletadas 12 amostras simples dispostas em círculos concêntricos de 3,0 e 6,0 m de raio, na profundidade de 0 a 20 cm. As amostras simples de cada solo foram posteriormente misturadas para constituir a amostra composta dos pontos avaliados. Estas amostras foram secas ao ar e tamisadas em peneiras de malha de 2,0 mm e 6 kg foram colocados em vasos de plástico. Uma fração da amostra composta de cada solo foi submetida a análises químicas e granulométrica, cujas características encontram-se na tabela 1. De acordo com o resultado das análises granulométricas, o solo coletado na Comunidade Lagoa do Barro foi classificado com solo arenoso, e o solo coletado no CPCE/UFPI foi classificado como solo franco-arenoso, usando um triângulo textural (Lemos e Santos, 1996).

Tabela 1 - Caracterização química e granulométrica das amostras dos solos que foram utilizados como substratos de cultivo de plantas de feijão fava cultivadas em função de déficit hídrico e fontes de nitrogênio.

Solo	pH	H+Al	Al	Ca	Mg	K	SB	T	P	K
	H_2O	---------- $cmol_c\ dm^{-3}$ ----------							mg dm^{-3}	
Arenoso	4,62	2,69	0,75	0,90	0,60	0,07	1,57	4,26	15,7	26
Franco arenoso	4,93	2,41	0,50	0,98	0,40	0,11	1,48	3,89	10,6	41

Solo	Micronutrientes				V	m	M. O.	Argila	Silte	Areia
	Cu	Mn	Fe	Zn						
	---------- mg dm^{-3} ----------				----- % ----		---------- g/kg ----------			
Arenoso	0,02	64,11	147	0,02	36,80	32,40	1,35	49	12	939
Franco arenoso	0,34	39,60	83,5	1,40	38,10	25,20	1,83	198	21	781

P, K, Cu, Fe, Mn e Zn - Extrador Mehlich1; Ca, Mg e Al - Extrator KCl - 1 mol/L; H + Al - Extrator Acetato de Cálcio a pH 7,0; Mat. Org. (MO) - método Walkley-Black.

3.5 Calagem e adubação dos solos

De acordo com análise química de cada solo, foi realizada a calagem em cada vaso para elevar a saturação por bases a 70%, que é o recomendado para cultura do feijão-comum (*Phaseolus vulgaris*) (SOUSA; LOBATO, 2004). Esta recomendação foi tomada como base uma vez que ainda não existe recomendação para correção e adubação do solo para a cultura do feijão-fava. Aos 30 dias após a aplicação do calcário com (PRNT de 92,38) foi realizada adubação com fósforo (super simples), potássio (cloreto de potássio) e micronutrientes (cobre e zinco), de acordo com a disponibilidade dos elementos em solos do Cerrado (SOUSA; LOBATO, 2004). Para o tratamento com N mineral, a ureia (45% de N) foi utilizada como fonte da adubação com 300 mg dm^{-3} de N solo, fornecido em 2 aplicações, uma no plantio e a outra 15 dias após o plantio, quando as plantas apresentavam três folhas desenvolvidas.

3.6 Tratamento de sementes e inoculação

As sementes de feijão-fava (*Phaseolus lunatus* L.) (Acesso CPCE Olho de ovelha) utilizadas foram provenientes do Banco de Germoplasma do CPCE/UFPI. As sementes foram desinfestadas utilizando-se álcool 70% por 30 segundos para rompimento da tensão superficial da semente, hipoclorito de sódio (2%), por dois minutos, para eliminação de patógenos e microrganismos indesejáveis, e sete lavagens sucessivas com água destilada esterilizada (VINCENT, 1970). Posteriormente, as sementes foram pré-germinadas em placas de Petri estéreis contendo papel filtro e algodão umedecido, as quais foram mantidas por 72 horas em câmara de crescimento à 28 °C. Foram semeadas três sementes por vaso e, 5 dias após a emergência, foi realizado o desbaste, deixando-se apenas uma planta por vaso.

Para a preparação do inóculo, a estirpe UFLA03-84 foi cultivada em meio de cultura 79 líquidos (FRED; WAKSMAN, 1928), agitado a 110 rpm a 28 °C por cinco dias em mesa agitadora. Nos vasos inoculados, foi aplicado 1,0 mL de inoculante (com uma concentração aproximada de 1×10^8 células bacterianas mL^{-1}) por semente. No

tratamento com N mineral e no tratamento sem inoculação e sem adição de nitrogênio mineral foi adicionado apenas 1,0 mL de meio de cultura 79 sem inóculo.

3.7 Tratamentos de déficit hídrico

Antes de iniciar os tratamentos de déficit hídrico, as plantas de feijão-fava foram regadas diariamente com água, mantendo a umidade do solo a 90% da capacidade de vaso, até o estágio de três folhas completamente desenvolvidas (V3). Posteriormente, os níveis de disponibilidade hídrica foram mantidos através da pesagem dos vasos em uma balança eletrônica, realizando mensurações diárias do conteúdo de água no solo, de acordo com os regimes hídricos estabelecidos. Dessa forma, foi possível obter a capacidade de vaso (CV, expresso em porcentagem) e estimar a perda diária de água pela evapotranspiração. No tratamento controle, a reposição de água foi tomada como base a quantidade necessária para atingir 90% da CV e os tratamentos de seca moderada e seca severa tiveram a CV equivalentes a 60% e 30%, respectivamente.

3.8 Análises fisiológicas

Para verificar o grau de estresse imposto nas plantas, foram realizadas determinações de trocas gasosas, nas primeiras folhas completamente expandidas através de um analisador de gás por infravermelho utilizando-se um analisador de gases por infravermelho (IRGA), LI 6400XT - Licor - USA. As medições foram realizadas entre 08:00 e 11:00 h da manhã aos 30 dias após o plantio, correspondendo ao início do florescimento. Obteve-se os valores de fotossíntese líquida (*A*, μmol m^{-2} s^{-1}), transpiração (*E*, mmol m^{-2} s^{-1}), condutância estomática (g_s, mmol m^{-2} s^{-1}) e concentração interna de CO_2 (Ci, ppm). A partir dos dados obtidos, foi estimada a eficiência momentânea do uso da água (A/E), e eficiência de carboxilação da rubisco (A/Ci).

Para estimar o status hídrico das plantas foi mensurado o teor relativo de água (TRA), determinado em folhas completamente expandidas coletadas no horário de maior pico de radiação solar. Seguindo a metodologia de Catsky (1960), o TRA foi avaliado utilizando dez discos foliares com 1,0 cm de diâmetro, cuja massa fresca (MF) foi mensurada pela pesagem em balança analítica, e posteriormente foram imersos em água destilada, onde permaneceram por três horas, para obtenção da massa túrgida (MT). Em seguida, o material foi transferido para estufa a 60 °C, por 72 h, para secagem. Após esse tempo, as amostras foram pesadas para obtenção da massa seca (MS). O TRA foi calculado através da seguinte fórmula: TRA (%) = [(MF-MS) / (MT-MS)] x 100. Foram realizadas também avaliações dos teores de clorofila *a*, *b*, *total* e carotenoides, de acordo com método proposto por Wellburn (1994), coletando o segundo trifólio totalmente expandindo, a partir do ápice de cada planta.

3.9 Parâmetros de crescimento e acúmulo de nitrogênio na parte aérea

No início do florescimento aos 30 dias após o plantio por ser esta a fase de maior atividade de fixação biológica de nitrogênio, foram conduzidas avaliações de parâmetros morfométricos, nodulação, produção de biomassa, além do acúmulo de N no tecido vegetal. Inicialmente, foram mensurados a altura das plantas (ALT cm planta^{-1}) com auxílio de uma fita métrica graduada, diâmetro do coleto (DC mm por planta) aferida usando um paquímetro digital e número de trifólios por planta (NTF). Posteriormente, as plantas foram coletadas para avaliar o número de nódulos por planta (NN), massa seca de nódulos (MSN, g planta^{-1}), massa seca da parte aérea (MSPA, g planta^{-1}), massa seca da raiz (MSR, g planta^{-1}), massa seca total (MST, g planta^{-1}) e acúmulo de nitrogênio na parte aérea (ANPA, mg planta^{-1}). Foi avaliado ainda a tolerância relativa ao estresse TRE (%) (massa seca total (MST) das plantas do estresse/MST das plantas do controle).

Os nódulos, raízes e parte aérea foram colocados para secar em sacos de papel em estufa de circulação forçada de ar, a 60 ºC até a obtenção de massa constante para aferição em balança analítica. O teor de nitrogênio na parte aérea (TNPA) foi avaliado pelo método semimicrokjedahl, de acordo com Sarruge e Haag (1979), onde foi determinado a percentagem de N presente na matéria seca da parte

aérea das plantas de feijão-fava. O acúmulo de N foi calculado multiplicando-se o valor da MSPA pelo teor de nitrogênio na parte aérea e dividindo o resultado por 100.

3.10 Análise estatística

Os dados dos experimentos foram avaliados quanto à normalidade e homogeneidade dos resíduos através dos testes de Shapiro Wilk e Bartlett, respectivamente. Atendidos os pressupostos, foi realizada análise de variância, seguida do teste de Tukey a 5% de probabilidade, usando o Sisvar 5.6 (FERREIRA, 2019). Os gráficos com as médias foram plotados usando SigmaPlot (versão 14.0). Para as variáveis número de nódulos e massa seca de nódulos, os dados foram transformados pela raiz quadrada de (y+0,5). Posteriormente, foi conduzida para cada experimento uma avaliação simultânea das relações entre as variáveis avaliadas, os níveis de déficit hídrico e as fontes de N, através da Análise de Componentes Principais (PCA) a partir das variáveis padronizadas. Os tratamentos estudados foram representados no *biplot* a partir dos scores obtidos para os dois primeiros componentes principais.

4 RESULTADOS

4.1 Parâmetros morfométricos

Foi observada interação significativa entre os níveis hídricos e fontes de N para altura de plantas (ALT) e número de trifólios (NTF), e efeito individual de ambos os fatores para o diâmetro do coleto (DC) no solo arenoso (Tabela S1). Nesse solo, houve redução significativa da ALT no nível de seca severa (30%) em relação ao controle (90%) apenas para a fonte IN (Figura 1A).

No solo arenoso, para a fonte NM a média de ALT no nível de 60% foi inferior em relação aos níveis de 30 e 90%, e para a fonte SI não houve diferenças significativas nas médias entre os níveis hídricos. Dentro do nível de 30%, a fonte NM apresentou média de altura de plantas superior as demais fontes de N, enquanto no nível de 60% não houve diferenças significativas entre as fontes de N, e no nível de 90%, as fontes MN e IN apresentaram médias semelhante entre si e superiores a fonte SI. Para o DC, houve uma redução significativa da média no nível de 30% em relação aos níveis hídricos de 90 e 60% que apresentaram médias semelhantes entre si, e a fonte NM promoveu média superior as demais fontes de N, as quais apresentaram médias iguais (Figura 1B).

Em relação ao NTF, foi observada uma redução significativa da média no nível de 30% em relação ao nível de 60%, e deste em relação ao controle (90%) para a fonte NM (Figura 1C). Contudo, as fontes IN e SI apresentam médias maiores no nível de 60% em relação aos demais níveis. Dentro dos níveis hídricos, a fonte NM apresentou médias de NTF superiores as demais fontes de N, em todos os níveis hídricos.

Para o solo franco-arenoso, houve interação significativa entre fatores para DC e NTF e apenas efeito isolado dos níveis hídricos para a ALT (Tabela S2). Foi observada uma drástica redução da ALT no nível de 30%, com média de aproximadamente metade dos valores das médias obtidas níveis de 60 e 90% (Figura 1D). Para o DC, houve uma redução significativa da média no nível de 60% em relação

ao nível 30%, o qual não diferiu do nível de 90% para fonte IN, enquanto para as demais fontes não houve diferenças entre os níveis hídricos (Figura 1E).

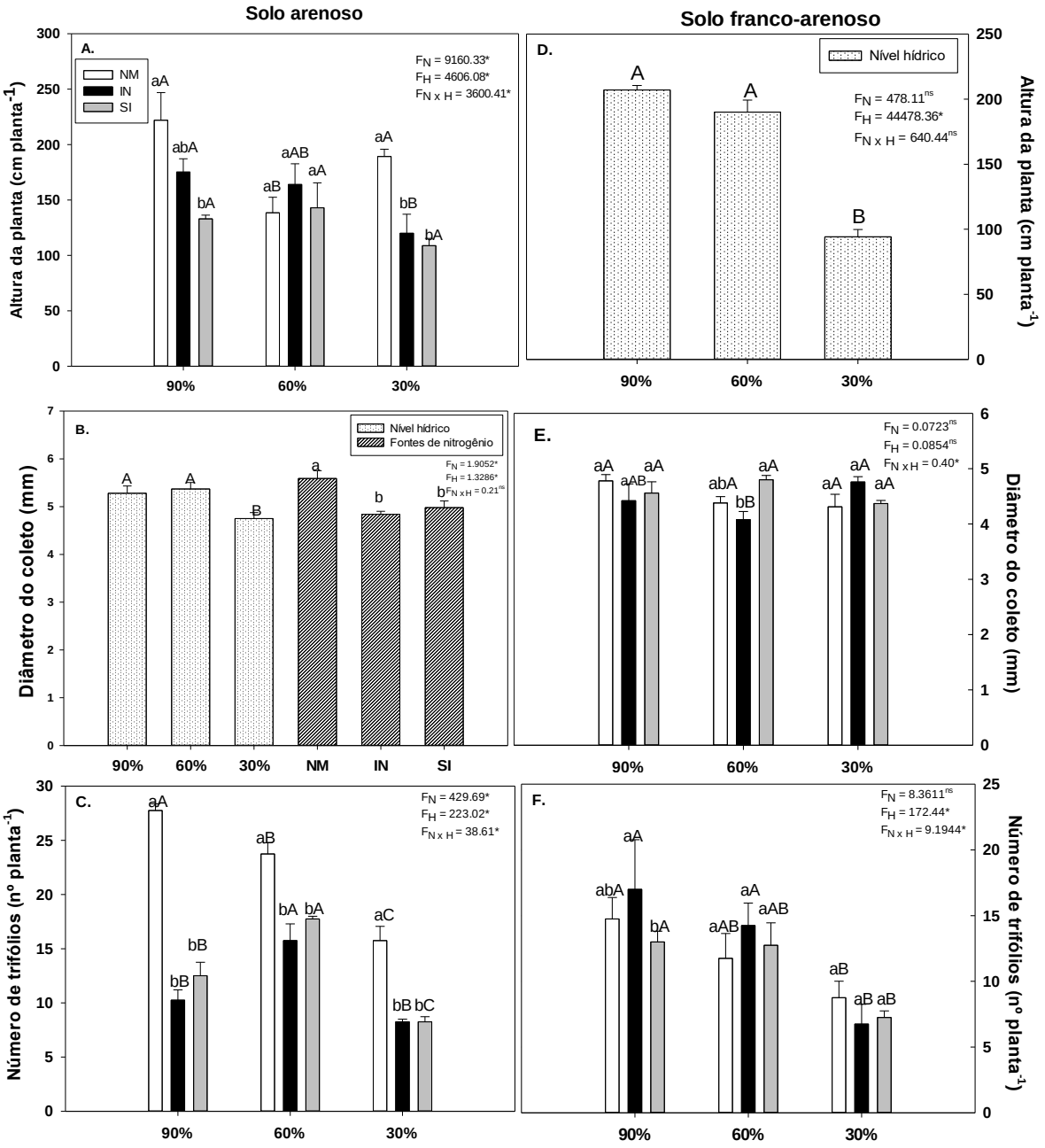


Figura 1 - Altura de planta (A, D), diâmetro do coleto (B, E) e número de trifólio (C, F) de plantas de feijão-fava inoculadas com *Bradyrhizobium viridifuturi* (IN), com aplicação de nitrogênio mineral (NM) e sem inoculação e sem N mineral (SI) sob níveis de déficit hídrico. Letras minúsculas comparam fontes de nitrogênio dentro do fator nível hídrico, enquanto letras maiúsculas comparam os níveis hídricos dentro de cada fonte de nitrogênio, as médias seguidas das mesmas letras minúsculas ou maiúsculas não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Valores de F da Anova: *= significativo a 5% de probabilidade; ns = não significativo.

Dentro dos níveis hídricos, houve efeito apenas no nível de 60%, onde a fonte SI apresentou média de DC superior a fonte IN. Quanto ao NTF, houve uma redução nas médias de aproximadamente 40, 45 e 60% no nível de 30% comparado ao nível de 90% para as fontes NM, SI e IN, respectivamente (Figura 1F). Apenas no nível de 90% houve efeito das fontes de N, onde a fonte IN aumentou o NTF em relação a fonte SI.

4.2 Nodulação

Para as variáveis de nodulação foi observado interação significativa entre as fontes de N e os níveis hídricos, em ambos os solos, exceto para NN no solo arenoso, onde foi observado apenas efeito isolado de ambos os fatores (Tabelas S1 e S2). No solo arenoso, a seca severa (30%) provocou uma redução significativa do NN em comparação aos níveis de 60 e 90%, os quais apresentaram médias semelhantes entre si (Figura 2A). Entre as fontes de N, o a fonte IN promoveu um NN significativamente superior (400 nódulos planta^{-1}) as fontes NM (15 nódulos planta^{-1}) e SI (10 nódulos planta^{-1}).

Para a MSN, houve uma redução significativa da média no nível de 30% em relação ao nível de 60%, o qual não diferiu do nível de 90%, para a fonte IN (Figura 2B). As demais fontes de N apresentaram médias semelhantes entre os níveis hídricos. Dentro dos três níveis hídricos, a fonte IN superou as demais fontes, exceto no nível de 30%, onde a MSN foi semelhante a fonte SI. Nesse nível hídrico, não houve nodulação na fonte NM.

No solo franco-arenoso, não houve nodulação em nenhum nível hídrico para fonte NM (Figura 2C e D). Nesse solo, houve redução significativa na média de NN e MSN para fonte IN, tanto no nível 30%, como no de 60%, em relação ao nível controle (90%), com médias de NN de aproximadamente 24, 35 e 110 nódulos planta-1, respectivamente (Figura 2C e D). A fonte SI apresentou nodulação muito baixa, independentemente do nível hídrico, com aproximadamente 1 nódulo planta-1. A fonte IN apresentou NN superior as demais fontes dentro de todos os níveis hídricos, mas para MSN só houve diferenças entre as fontes de N no nível de 90%, onde a fonte SI apresentou média superior.

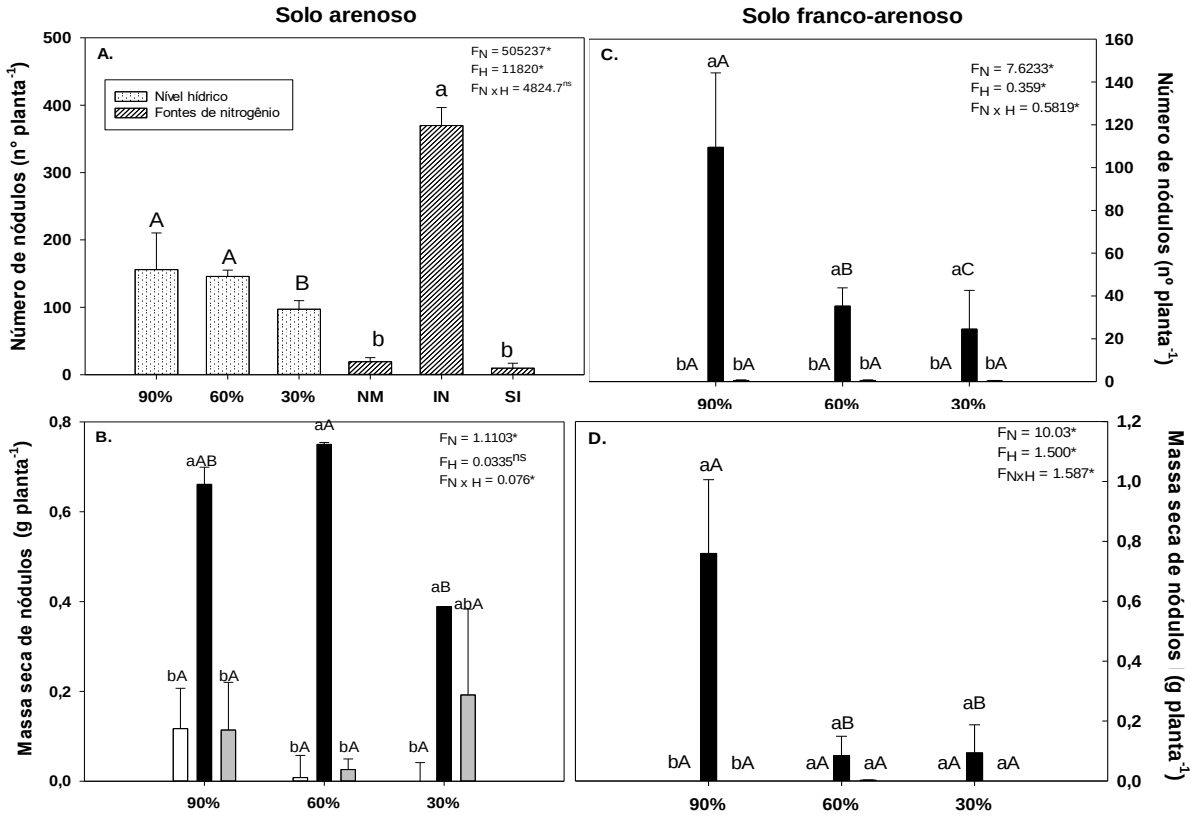


Figura 2 - Número de nódulos (A, C) e massa seca de nódulos (B, D) de plantas de feijão-fava inoculadas com *Bradyrhizobium viridifuturi* (IN), com aplicação de nitrogênio mineral (NM) e sem inoculação e sem N mineral (SI) sob níveis de déficit hídrico. Letras minúsculas comparam fontes de nitrogênio dentro do fator nível hídrico, enquanto letras maiúsculas comparam os níveis hídricos dentro de cada fonte de nitrogênio, as médias seguidas das mesmas letras minúsculas ou maiúsculas não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Valores de F da Anova: *= significativo a 5% de probabilidade; ns = não significativo.

4.3 Produção de biomassa

Houve interação significativa entre as fontes de N e os níveis hídricos para as variáveis de produção de biomassa e tolerância relativa ao estresse (TRE) em ambos os solos, exceto para MSR no solo franco-arenoso, onde foi observado apenas efeito isolado de ambos os fatores (Tabelas S1 e S2). No solo arenoso, foi observada uma redução significativa das médias de MSPA, MSR, MST e TER no nível de 30% em relação ao nível de 60%, e deste em relação ao nível de 90%, para fonte NM (Figura 3A, B, C e D).

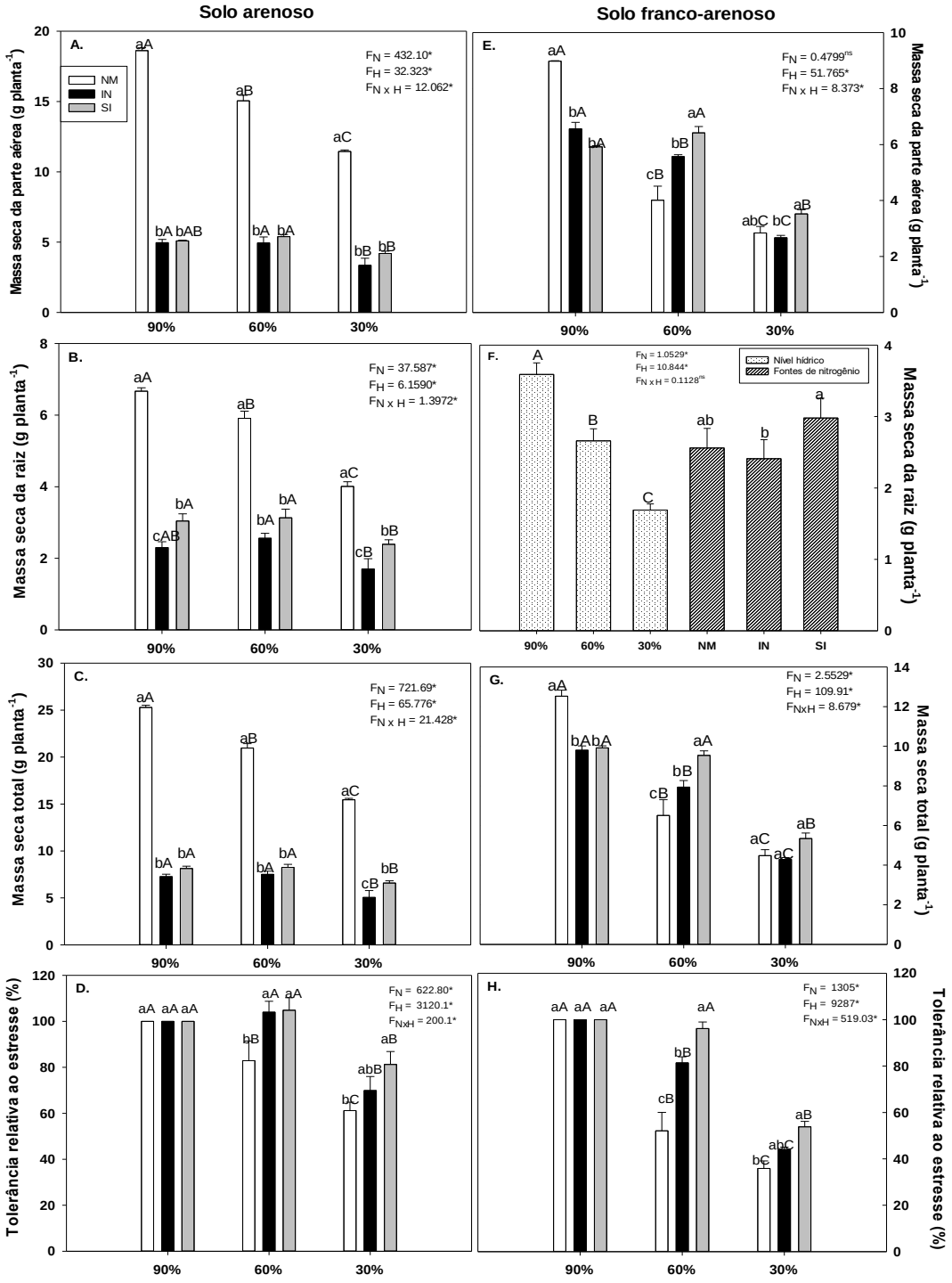


Figura 3 - Massa seca da parte aérea (A, E), massa seca da raiz (B, F), massa seca total (C, G) e tolerância relativa ao estresse (D, H) de plantas de feijão-fava inoculadas com *Bradyrhizobium viridifuturi* (IN), com aplicação de nitrogênio mineral (NM) e sem inoculação e sem N mineral (SI) sob níveis de déficit hídrico. Letras minúsculas comparam fontes de nitrogênio dentro do fator nível hídrico, enquanto letras maiúsculas comparam os níveis hídricos dentro de cada fonte de nitrogênio, as médias seguidas das mesmas letras minúsculas ou maiúsculas não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Valores de F da Anova: *= significativo a 5% de probabilidade; ^{ns} = não significativo.

Já para as demais fontes de N, houve redução significativa das médias de MSPA, MST e TRE apenas no nível de 30% em relação aos níveis de 60 e 90%. Dentro de todos os níveis hídricos, a fonte NM promoveu médias de MSPA, MSR e MST superiores as demais fontes de N, enquanto a fonte SI superou a fonte IN na MSR, nos níveis de 30 e 90%, e na MST, no nível de 30%. Além disso, plantas sob a fonte SI apresentaram TRE superior a plantas sob a fonte NM, nos níveis de 30 e 60%. A fonte IN também superou a fonte NM para o TER nesses dois níveis hídricos.

Para o solo franco arenoso, houve uma redução significativa da MSR no nível de 30% em relação ao nível de 60%, e deste em relação ao nível de 90%, independente da fonte de N (Figura 3F). A fonte SI apresentou média de MSR superior a fonte IN e semelhante a fonte NM. Nesse solo, para MSPA, MST e TER, também foi observada redução significativa das médias nos níveis de 30 e 60% em relação ao nível de 90% para as fontes NM e IN (Figura 3E, G e H). Já para a fonte SI, as médias de MSPA, MST e TER reduziram significativas apenas no nível de 30%. Dentro do nível de 90%, a fonte NM superou as demais fontes de N para MSPA e MST, enquanto no nível de 60%, a fonte SI apresentou médias de MSPA, MST e TRE superiores as demais fontes de N, e a fonte IN também superou a fonte NM para essas variáveis. Dento do nível de 30%, a fonte SI apresentou médias de MSPA e TRE superior a fonte IN e de TRE superior a fonte NM.

4.4 Acúmulo de nitrogênio

Para o ANPA houve interação significativa entre as fontes de N e níveis hídricos (Tabela S1 e S2). Em ambos os solos houve uma redução significativa das médias de ANPA no nível de 30 e 60% em comparação ao nível de 90% para fonte NM (Figura 4A e B). No solo franco-arenoso, houve ainda uma redução no ANPA no nível de 30% comparado ao nível de 60% para a fonte NM (Figura 4B). Para as fontes IN e SI, no solo arenoso, as médias de ANPA foram semelhantes entre os níveis hídrico, enquanto no solo franco-arenoso, as médias foram semelhantes entre si nos níveis de 60 e 90% e superiores à média obtida no nível de 30%, exceto para fonte SI no nível de 90%. Dentro de todos os níveis hídricos, a fonte NM apresentou médias superiores as demais fontes de N, as quais não diferiram entre si, em ambos os solos.

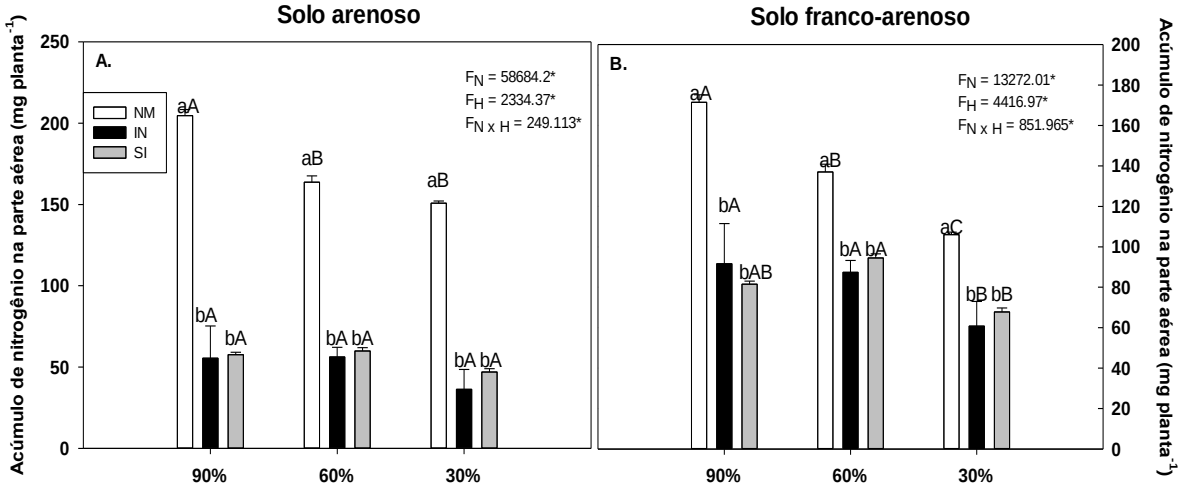


Figura 4 - Acúmulo de nitrogênio na parte aérea (A e B) de plantas de feijão-fava inoculadas com *Bradyrhizobium viridifuturi* (IN), com aplicação de nitrogênio mineral (NM) e sem inoculação e sem N mineral (SI) sob níveis de déficit hídrico. Letras minúsculas comparam fontes de nitrogênio dentro do fator nível hídrico, enquanto letras maiúsculas comparam os níveis hídricos dentro de cada fonte de nitrogênio, as médias seguidas das mesmas letras minúsculas ou maiúsculas não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Valores de F da Anova: *= significativo a 5% de probabilidade; ^{ns} = não significativo.

4.5 Parâmetros fisiológicos

Em relação as trocas gasosas e demais parâmetros fisiológicos, foi observada interação significativa entre as fontes de N e níveis hídricos, em ambos os solos, exceto para eficiência momentânea do uso da água no solo arenoso, para qual houve apenas efeito das fontes de N (Tabelas S3 e S4). No solo arenoso, houve redução significativa das médias de fotossíntese líquida (*A*) e transpiração (*E*) no nível de 60% em relação ao nível de 90%, o qual não diferiu do nível de 30% para fonte NM (Figura 5A e B). Já para a condutância estomática (*gs*), foi observada redução das médias nos níveis de 30 e 60% em relação ao nível de 90% para essa mesma fonte de N (Figura 5C). Para fonte IN, houve uma resposta diferente, com aumento significativo de *A* e *E* no nível de 30% em relação ao nível de 90% e aumento de *gs* no nível de 60% em relação ao nível de 90%. Para a fonte SI, houve redução de *A* e *E* no nível de 30% em relação ao nível de 90%, e aumento da *gs* no nível de 30% em relação ao de 90%.

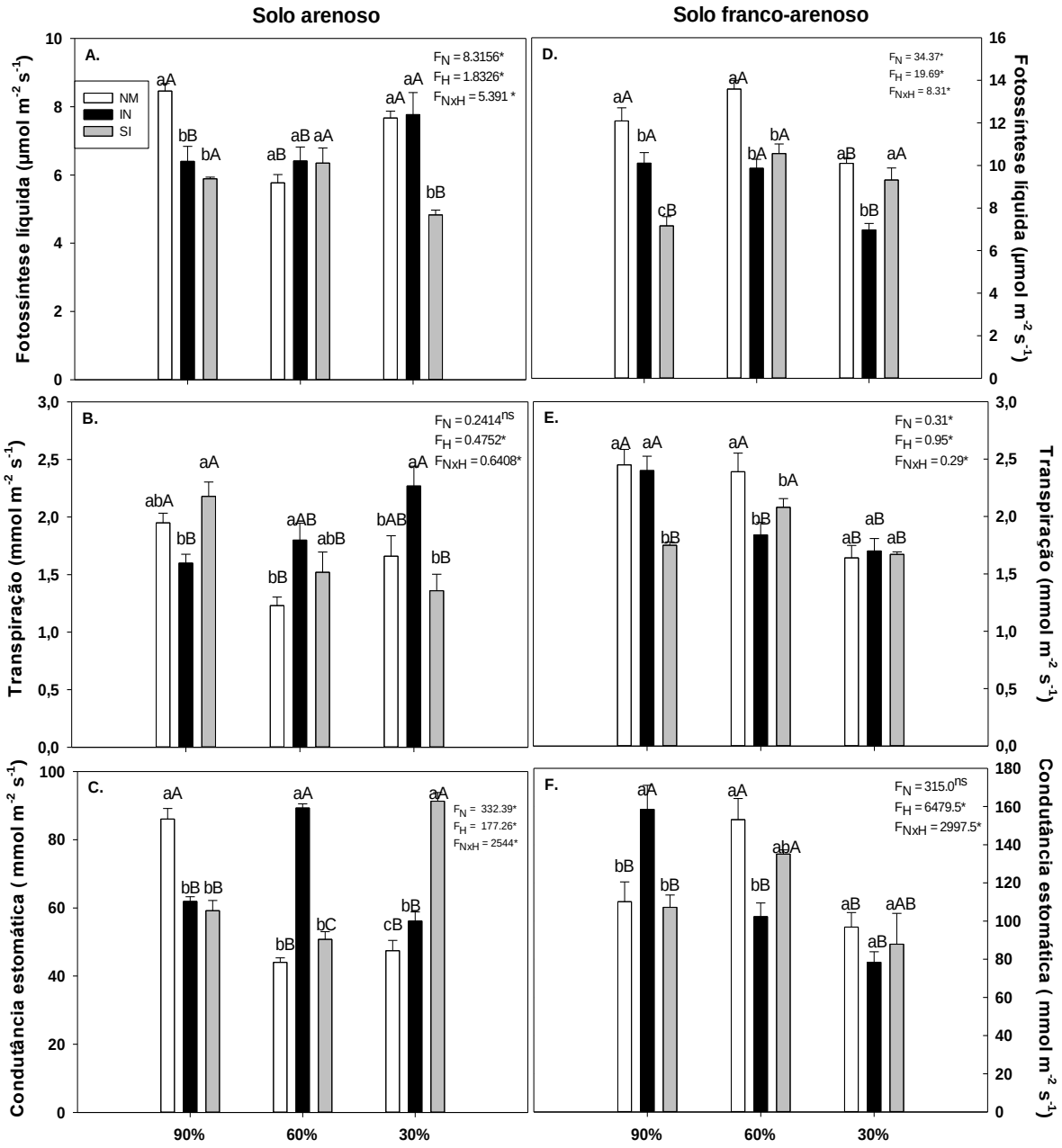


Figura 5 - Fotossíntese líquida (A, D), transpiração (B, E) e condutância estomática (C, F) de plantas de feijão-fava inoculadas com *Bradyrhizobium viridifuturi* (IN), com aplicação de nitrogênio mineral (NM) e sem inoculação e sem N mineral (SI) sob níveis de déficit hídrico. Letras minúsculas comparam fontes de nitrogênio dentro do fator nível hídrico, enquanto letras maiúsculas comparam os níveis hídricos dentro de cada fonte de nitrogênio, as médias seguidas das mesmas letras minúsculas ou maiúsculas não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Valores de F da Anova: *= significativo a 5% de probabilidade; ns = não significativo.

Ainda no solo arenoso, dentro do nível de 30%, as médias de *A* foram significativamente superior nas fontes IN e NM em relação a fonte SI, com valores de

7,26; 7,18 e 4,83 µmol m^{-2} s^{-1}, respectivamente (Figura 5A), a fonte IN apresentou média de *E* superior as demais fontes de N (Figura 5B), enquanto para *gs*, a fonte SI superou as demais fontes de N (Figura 5C). Já dentro do nível de 60%, as médias de *A* foram iguais entre as fontes de N e a fonte IN apresentou médias de *E* e *gs* superiores a fonte NM. Dentro do nível de 90%, a fonte NM aumentou as médias de *A* e *gs* em relação as demais fontes de N, e a fonte SI aumentou a média de *E* em relação a fonte IN.

No solo franco-arenoso, foram observadas respostas diferenciadas em relação ao solo arenoso. Nesse solo, foi observada uma redução significativa das médias de *A* e *E* no nível de 30% em relação ao nível de 90% para as fontes IN e NM (Figura 5D e E). Houve redução também para *gs*, tanto nível de 30%, como de 60%, em relação ao nível de 90%, para a fonte IN (Figura 5F). Já para fonte SI, as médias de *A* amentaram significativamente nos níveis de 30 e 60% em relação ao nível de 90%, e as médias de *E* e *gs* foram semelhantes nos níveis de 30 e 90%. Dentro do nível de 30%, as fontes SI e NM obtiveram médias de *A* iguais entre si e superiores a fonte IN, enquanto para *E* e *gs* não houve diferenças significativas entre as fontes de N. No nível de 60%, a fonte NM apresentou médias de *A*, *E* e *gs* superior das demais fontes de N, enquanto nível de 90%, as fontes NM e IN aumentaram as médias de *A* e *E* em relação a fonte SI, e para *gs*, a fonte IN apresentou média superior as demais fontes de N.

No solo arenoso, para concentração interna de CO_2, foi observada uma redução significativa da média no nível de 60% em relação aos níveis de 30 e 90% para fonte NM, enquanto para fonte IN houve aumento da média no nível se 60% em relação ao nível de 30% e para fonte SI as médias foram semelhantes entre os três níveis hídricos (Figura 6A). Dentro dos níveis hídricos, houve diferenças significativas entre as fontes de N somente no nível de 60%, onde as fontes IN e SI apresentaram médias superiores a fonte NM. Já na eficiência de carboxilação da rubisco, houve uma redução significativa das médias no nível de 30% em relação ao nível de 60%, para fonte SI, e em relação aos níveis de 60 e 90%, para fonte NM, enquanto o contrário foi observado para a fonte IN (Figura 6B). Dentro dos três níveis hídricos, a fonte NM apresentou médias superiores a fonte SI. Dentro dos níveis de 30 e 90%, a fonte IN também superou o a fonte SI na eficiência de carboxilação da rubisco.

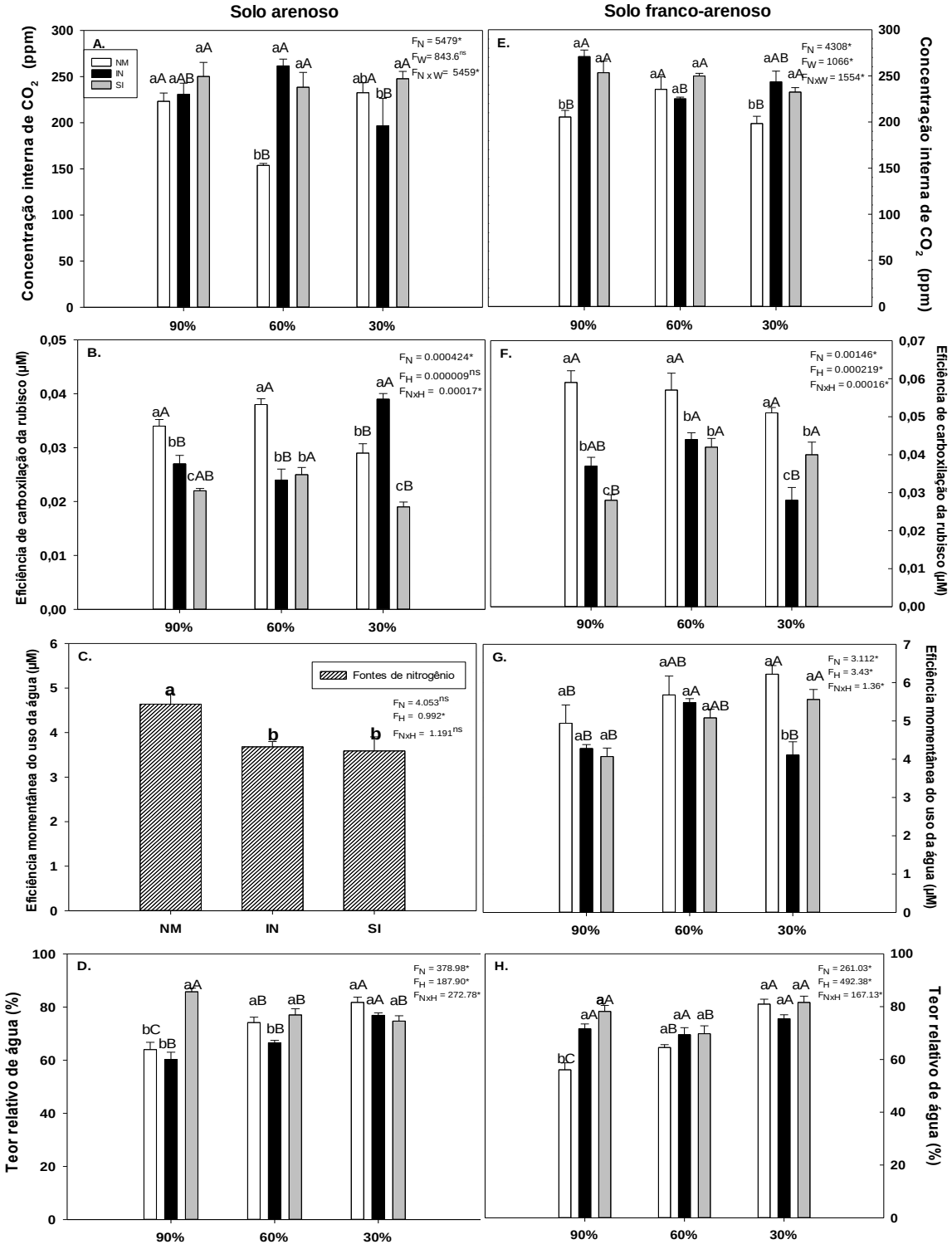


Figura 6 - Concentração interna de CO_2 (A, E), eficiência de carboxilação da rubisco (B, E) e eficiência momentânea do uso da água (C, F) e teor relativo de água (D, G) de plantas de feijão-fava inoculadas com *Bradyrhizobium viridifuturi* (IN), com aplicação de nitrogênio mineral (NM) e sem inoculação e sem N mineral (SI) sob níveis de déficit hídrico. Letras minúsculas comparam fontes de nitrogênio dentro do fator nível hídrico, enquanto letras maiúsculas comparam os níveis hídricos dentro de cada fonte de nitrogênio, as médias

seguidas das mesmas letras minúsculas ou maiúsculas não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Valores de F da Anova: *= significativo a 5% de probabilidade; ^{ns} = não significativo.

Na eficiência momentânea de uso da água, no solo arenoso, houve um aumento significativo na média da fonte NM em relação as demais, as quais não diferiram entre si (Figura 6C). Para o teor relativo de água (TRA), houve um aumento significativo das médias nível de 30% em comparação aos níveis de 60 e 90% para as fontes NM e IN, enquanto na fonte SI, a média obtida no nível de 90% foi superior as médias dos níveis de 30 e 60% (Figura 6D). Dentro do nível de 30% não houve diferenças significativas entre as fontes de N, nos níveis de 60 e 90%, a fonte SI apresentou médias de TRA superiores a fonte IN, e também superior a fonte NM no nível de 90%.

No solo franco-arenoso, as taxas de concentração interna de CO_2 apresentaram uma suave variação para fonte IN, com uma redução na média no nível 60% em relação aos demais níveis, enquanto a fonte NM apresentou maior média no nível de 60% e a fonte SI apresentou médias semelhantes entre os níveis (Figura 6E). Dentro dos níveis de 30 e 90%, as médias da fonte NM foram inferiores as demais fontes, as quais apresentaram médias semelhantes entre si dentro de todos os níveis hídrico.

Na eficiência da carboxilação da rubisco, foi observada redução significativa das médias obtidas no nível de 30% em relação aos níveis de 60 e 90%, para a fonte NM, e em relação ao nível de 60%, para fonte IN, enquanto SI, a redução na média foi no nível de 90% em relação aos níveis de 30 e 60% (Figura 6F). Dentro dos níveis hídricos, a fonte NM apresentou médias superiores as demais fontes em todos os níveis hídricos, a fonte SI foi superior a fonte IN no nível de 30%, e o inverso ocorreu no nível 90%.

Para a eficiência momentânea do uso da água no solo franco-arenoso, houve um aumento significativo das médias no nível de 30% em relação ao nível de 90% para as fontes NM e SI, enquanto a fonte IN apresentou média superior no nível de 60% em relação aos níveis de 30 e 90% (Figura 6G). Dentro dos níveis hídricos, houve diferenças significativas apenas no nível de 30%, onde as fontes NM e SI apresentaram médias superiores a fonte IN. Quanto ao TRA, foi observado um aumento significativo da média no nível de 30% em relação aos níveis de 60 e 90%, para fonte NM, e em relação ao nível de 60% para fonte SI, enquanto a fonte IN não

diferiu entre os níveis hídricos (Figura 6H). Dentro dos níveis hídricos, houve diferenças significativas apenas no nível de 90%, onde a fonte NM apresentou média inferior aos demais fontes.

4.6 Pigmentos fotossintéticos

Em ambos os solos, foi encontrado interação significativa entre os fatores para todos os pigmentos fotossintéticos (clorofila *a*, *b*, *total* e carotenoides) avaliados (Tabela S3 e S4). No solo arenoso, foi observado aumento significativo nos teores de todos os pigmentos fotossintéticos no nível de 30% em relação ao nível de 90%, para a fonte NM, e uma redução significativa dos teores de clorofila *b* e *total* e carotenoides no nível de 30% em relação ao nível de 60% para fonte SI (Figura 7A, B, C e D). Para a fonte IN, não houve diferenças entre os níveis de 30 e 90% e ocorreu uma redução significativa das médias de clorofila *b* e carotenoides no nível de 60% em relação ao nível de 30%. Para todos os pigmentos fotossintéticos, dentro do nível de 30%, a fonte NM apresentou médias superiores as demais fontes, enquanto no nível 60%, as fontes NM e SI apresentaram médias superiores a fonte IN. Já no nível de 90%, a fonte IN aumentou o teor de clorofila *b* em relação a fonte SI, e não houveram diferenças entre as fontes de N para clorofila *a* e *total* e carotenoides.

No solo franco-arenoso, foram observados aumentos significativos nos teores de todos os pigmentos fotossintéticos nos níveis de 30 e 60% em relação ao nível de 90%, para fonte NM, e no nível de 30% em relação aos níveis de 60 e 90%, para fonte IN (Figura 7E, F, G e H). Já para fonte SI, ao contrário da resposta no solo arenoso, houve um amento significativo dos teores de clorofila *a* e *total* no nível de 30% em relação aos níveis de 60 e 90%, e aumento também do teor de carotenoides no nível de 30% em relação ao nível de 60%. Dentro dos três níveis hídricos, as médias de todos os pigmentos fotossintéticos foram significativamente maiores na fonte NM em relação as fontes IN e SI, as quais não diferiram entre si.

4.7 Análise de componentes principais

Para o solo arenoso, os dois primeiros PCs do gráfico biplot explicaram 58,63% da variância total, com 38,73% e 19,9% explicados por PCA1 e PCA2, respectivamente (Figura 8A). Verificou-se que os parâmetros MSPA, ANPA e *A* se agruparam com a fonte NM no nível controle (NM90) e clorofila *a* agrupou-se com a fonte NM nos níveis de seca severa e moderada (NM30 e NM60). Já para NN, MSN, TRE, E e *gs* se agruparam com a fonte de IN no nível de 90 e 60 % (IN60 e IN90), e o TRA agrupou-se com a fonte SI no nível de seca moderada (SI60).

Para o solo franco-arenoso, os dois primeiros PCs do gráfico biplot explicaram 68,07% da variância total, com 40,34% e 27,73% explicados por PCA1 e PCA2, respectivamente (Figura 8B). Observou-se que o ANPA se agrupou com a fonte NM no nível controle (NM90) e o TRA agrupou-se com as fontes IN e SI no nível de seca severa (IN30 e SI30). Para MSN, NN e Ci houve um agrupamento com a fonte IN no nível controle (IN90), enquanto *A* agrupou-se com a fonte SI no nível de moderada (SI60).

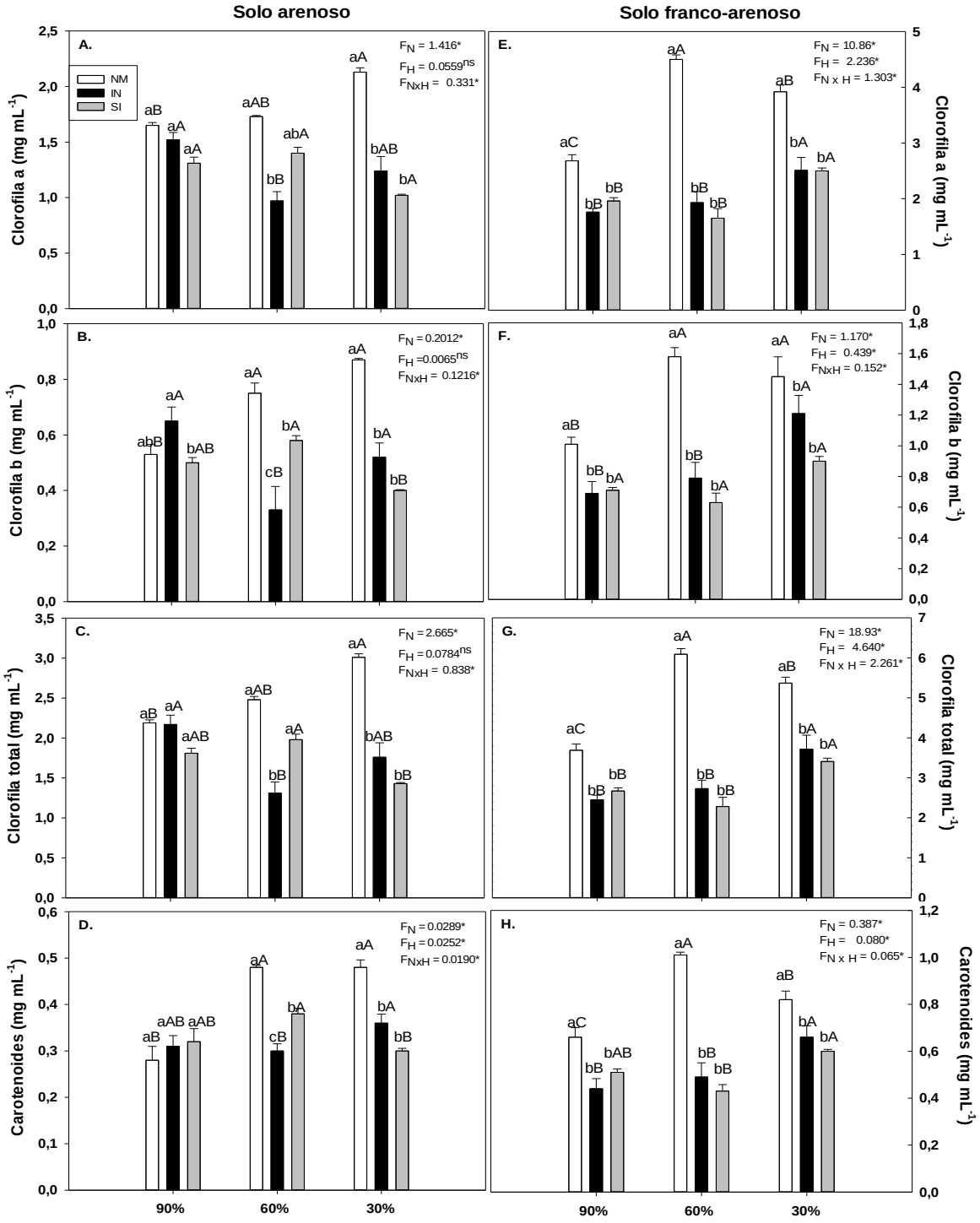


Figura 7 - Teores de clorofila a (A, E), clorofila b (B, F), clorofila total (C, G) e carotenoides (D, H) de plantas de feijão-fava inoculadas com *Bradyrhizobium viridifuturi* (IN), com aplicação de nitrogênio mineral (NM) e sem inoculação e sem N mineral (SI) sob níveis de déficit hídrico. Letras minúsculas comparam fontes de nitrogênio dentro do fator nível hídrico, enquanto letras maiúsculas comparam os níveis hídricos dentro de cada fonte de nitrogênio, as médias seguidas das mesmas letras minúsculas ou maiúsculas não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Valores de F da Anova: *= significativo a 5% de probabilidade; ns = não significativo.

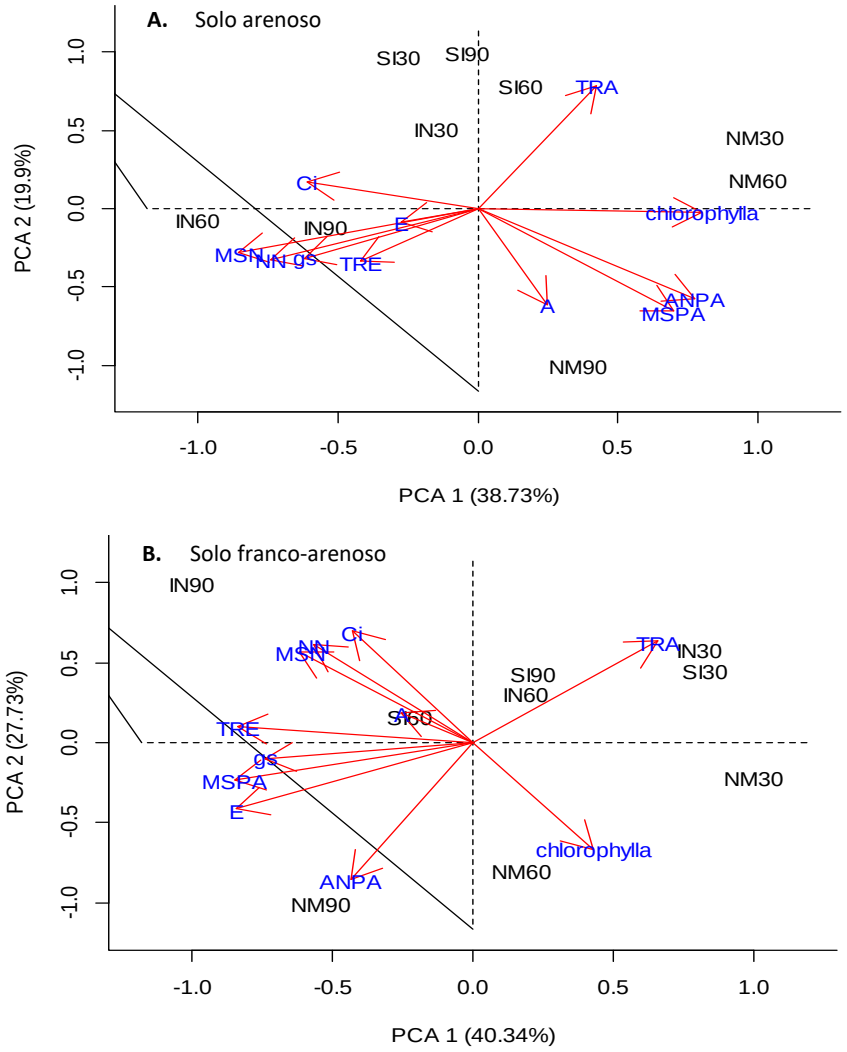


Figura 8 - Análise de componentes principais para variáveis número de nódulos (NN), massa seca de nódulos (MSN), massa seca da parte aérea (MSPA), acúmulo de nitrogênio da parte aérea (ANPA), clorofila *a* (Clof.A), fotossíntese líquida (A), transpiração (E), condutância estomática (*gs*), concentração interna de CO_2 (Ci), teor relativo de água (TRA) e tolerância relativa ao estresse (TRE) obtidas em plantas de feijão-fava inoculadas com *Bradyrhizobium viridifuturi* (IN), com aplicação de nitrogênio mineral (NM) e sem inoculação e sem N mineral (SI) sob níveis hídricos de 90, 60 e 30%, em solo arenoso (A) e solo franco-arenoso (B).

5 DISCUSSÃO

A seca é um importante fator abiótico que limita o crescimento e o rendimento das culturas. No nosso estudo, a escassez hídrica, especialmente a seca severa (30%), afetou negativamente parâmetros morfométricos, nodulação, produção de biomassa, acúmulo de nitrogênio e alguns aspectos fisiológicos de plantas de feijão-fava, em ambos os solos, conforme hipotetizado. Plantas sob deficiência hídrica podem sofrer uma ampla gama de alterações morfofisiológicas, bioquímicas e moleculares, resultando no menor desenvolvimento e rendimento das culturas, como já relado em espécies leguminosas em estudos anteriores (MOURADI et al., 2017; KHATUN et al., 2021; FURLAN et al., 2022; MARTÍNEZ-NIETO et al., 2022; DOLLETE et al., 2024).

O estresse induzido pela seca pode reduzir também as comunidades nativas de rizóbios, bem como os rizóbios introduzidos pela inoculação (THILAKARATHNA; RAIZADA, 2017; SINDHU et al., 2020). Além disso, a seca prejudica a interação rizóbios-leguminosas, inibindo a ação das moléculas sinalizadoras logo no início da simbiose, o que dificulta o processo de infecção dos rizóbios nas raízes, ocasionando uma baixa nodulação e, consequentemente reduzindo, a fixação biológica de nitrogênio (FBN) (MIRANSARI et al., 2013).

A ocorrência de nódulos nas plantas sem N mineral e sem inoculação, em ambos os solos, em todos os níveis hídricos, indica a ocorrência de rizóbios nativos em simbiose com feijão-fava, conforme relatado anteriormente em solos do estado do Piauí (CHIBEBA et al., 2020; RODRIGUES et al., 2021). Já a nodulação nas plantas com N mineral no solo arenoso, indica que a concentração de N utilizada não foi suficiente para inibir a nodulação. Por outro lado, no solo franco-arenoso, o efeito inibidor do N mineral foi claramente expressado, não ocorrendo nodulação nas plantas. Observa-se que o teor de matéria orgânica (MO) é maior no solo franco-arenoso (1,83%) em relação ao arenoso (1,35%) (Tabela 1), podendo ter ocorrido maior decomposição da MO e disponibilidade de N no solo franco-arenoso, inibindo completamente a nodulação.

Como mostra a figura 2, a estirpe UFLA03-84 aumentou a nodulação das plantas em relação as fontes sem inoculação, em ambos os solos, mas essa nodulação não foi eficaz, ou seja, não refletiu na maior FBN e, consequentemente, na

maior produção de biomassa e ANPA, contrariando resultados de estudo anterior com inoculação dessa estirpe em feijão-fava (COSTA et al., 2017). Uma nodulação eficaz, depende da capacidade dos rizóbios de tolerar, proliferar e sobreviver sob condições adversas (SINDHU et al., 2020; ALVAREZ-ARAGÓN et al., 2023). A nodulação ineficaz da UFLA03-84 pode estar relacionada a algum fator edafoclimático e/ou ao curto período de condução das plantas (35 dias), o qual pode não ter sido suficiente para estirpe expressar o seu potencial na FBN. Já o fato do maior ANPA ter ocorrido na fonte com N mineral, em ambos os solos, pode ser explicado pela rápida liberação do N após a aplicação, proporcionando maior absorção em um curto intervalo de tempo.

No solo franco-arenoso, o tratamento sem inoculação obteve maior produção de biomassa e tolerância relativa ao estresse (TRE) em relação as demais fontes de N, no nível de seca moderada (60%) (Figura 3), sugerindo que, provavelmente, existe nesse solo uma comunidade microbiana que parece tornar as plantas mais tolerantes a escassez hídrica. Considerando a baixa nodulação (Figura 1C e D), acredita-se que, além dos rizóbios, outras comunidades microbianas nativas favoreceram o crescimento das plantas. Por outro lado, a inoculação afetou negativamente a produção de biomassa e TRE nesse solo, sugerindo que a estirpe UFLA03-84 pode ter prejudicado as comunidades microbianas nativas, em condições de seca. No solo arnoso, foi observado também redução da biomassa da raiz e total em plantas inoculadas, no nível de seca severa.

Diferentes solos possuem comunidades microbianas distintas, as quais podem influenciar de maneira diferenciada o desenvolvimento e nutrição vegetal (LOPES et al., 2021; PHILIPPOT et al., 2023) e estas são influenciadas por diferentes fatores (LOPES et al., 2021). Novas investigações são necessárias para avaliar as comunidades microbianas, além de outros fatores, que possam interferir no desenvolvimento do feijão-fava nesses solos.

Conforme hipótese estabelecida, o N mineral melhorou o desempenho das plantas, aumentando o crescimento, produção de biomassa, acúmulo de nitrogênio e alguns aspectos fisiológicos em plantas cultivadas sob escassez hídrica no solo arenoso. Porém no solo franco-arenoso, não houve melhoria proporcionada pelo N mineral em relação aos parâmetros morfométricos e produção de biomassa sob escassez hídrica (30 e 60%). Além disso, de modo geral, plantas cultivadas no solo franco-arenoso, apresentaram reduções mais drásticas em vários parâmetros quando

comparado ao solo arenoso, em resposta a severa. Esses resultados mostram claramente que os tipos de solos influenciam as respostas das plantas a adubação nitrogenada e ao déficit hídrico, como observado na PCA (Figura 8).

Ao contrário da hipótese de que plantas sob deficiência hídrica teriam desempenho melhor no solo franco-arenoso, devido sua maior capacidade de retenção de água, observamos que, de modo geral, a biomassa de raízes das plantas com N mineral foi maior no solo arenoso em relação ao solo franco-arenoso, o que refletiu na maior produção de biomassa na parte aérea também no solo arenoso (Figura 3). Esses resultados sugerem que a textura dos solos, além de outros fatores, pode ter interferido no desenvolvimento das raízes, refletindo na produção de biomassa vegetal.

A textura do solo pode influenciar a porosidade, estrutura, permeabilidade, capacidade de retenção e disponibilidade de água e nutrientes (SILVER et al., 2000; HELLIWELL et al., 2019; PATEL et al., 2021), podendo refletir no desenvolvimento vegetal (KHALIL et al., 2020; SOONG et al., 2020). Khalil et al. (2020) comprovaram o papel da textura do solo na arquitetura radicular e produção de biomassa do trigo cultivado em dois tipos de solos (franco-arenoso e franco-argiloso) sob déficit hídrico. Segundo os autores, a arquitetura radicular foi menos desenvolvida e produção de biomassa radicular menor no solo franco-argiloso, provavelmente, devido a formação de fissuras nesse solo, promovendo maior evaporação e aumento da resistência do solo a penetração das raízes, associada à secagem do solo.

De modo geral, as maiores respostas à adubação nitrogenada das plantas cultivadas no solo arenoso em relação ao solo franco-arenoso podem estar relacionadas ao menor teor de MO no solo arenoso (Tabela 1). Além disso, no solo arenoso, pode ter ocorrido maior absorção de N, proporcionado por uma maior massa radicular. Na figura 4 é possível verificar que as plantas com N mineral apresentaram, de modo geral, maior ANPA no solo arenoso comparado solo franco-arenoso sob seca moderada e severa. Por outro lado, as plantas sob inoculação e do tratamento sem inoculação promoveram maior ANPA no solo franco-arenoso em relação ao solo arenoso, sugerindo que no solo franco-arenoso houve maior disponibilidade N para as plantas. Como a nodulação nesse solo foi muito baixa, no controle sem inoculação, em todos os níveis hídricos, acredita-se que além do N fornecido pela FBN, houve uma certa contribuição da liberação de N pela decomposição da MO.

Plantas sob déficit hídrico geralmente apresentam menor condutância estomática (*gs*) para limitar a transpiração (*E*) e conservar água. Em função disso, ocorre uma redução da fixação de CO_2 e atividade fotossintética (*A*), resultando em menor produção de assimilados para o desenvolvimento das plantas (Martínez-Nieto et al., 2022). No nosso estudo, a redução da *gs*, *E* e *A* em reposta a seca severa foi observada no solo franco-arenoso para a fonte IN e para a fonte NM, no caso de *E* e *A* (Figura 5), o que refletiu diretamente na menor produção de biomassa (Figura 3), confirmando nossa hipótese. Por outro lado, no solo arenoso, houve respostas contraditórias, com aumento da *A*, *E* e eficiência de carboxilação da rubisco, e redução da *gs* em resposta seca severa, para as fontes NM e IN (Figuras 5 e 6), confirmando que o tipo de solo influencia as respostas fisiológicas das plantas ao déficit hídrico. Porém, vale destacar que as respostas de *A* e *gs* não são fixas e pode ocorrer uma redução em *gs* antes que ocorra redução na *A*, resultando em aumento na eficiência momentânea de uso da água (CAINE et al., 2019; KHALIL et al., 2020), como observado para fonte NM solo arenoso sob seca severa. Nossos resultados mostraram que, no solo arenoso, o N mineral e a inoculação foram as fontes mais eficientes na manutenção das taxas fotossintéticas sob seca severa, embora isso tenha refletido no aumento de biomassa apenas das plantas com N mineral.

A redução no conteúdo de pigmentos fotossintéticos tem sido relatada leguminosas sob déficit hídrico (MAFAKHERI et al., 2010; KUSVURAN; DASGAN, 2017; MARTÍNEZ-NIETO et al., 2022). No nosso estudo, foi observado o contrário, principalmente nas plantas com N mineral. Destaca-se que as plantas com N mineral e submetidas a seca severa apresentaram baixa produção de biomassa, em ambos os solos (Figura 3). Assim, possivelmente, ocorreu um efeito de concentração de N nas plantas com baixa produção de biomassa, refletindo diretamente no conteúdo de pigmentos fotossintéticos (Figura 7). Em ambos os solos, foi evidente o maior conteúdo de pigmentos fotossintéticos nas plantas com N mineral em relação as demais fontes de N, em condições de escassez hídrica, o que refletiu diretamente no aumento da fotossíntese no solo arenoso sob seca severa, e no solo franco-arenoso sob seca moderada.

Em ambos os solos houve pouca variação em relação ao teor relativo de água (TRA), com um pequeno aumento dos valores no nível de seca severa para fonte N mineral. Esses resultados mostram que o déficit hídrico possivelmente não causou danos nas células, pois não afetou o conteúdo de água nas folhas, indicando que

acesso de feijão-fava usado no presente estudo é resistente ao déficit hídrico. Quando as plantas passam por déficit hídrico logo no início do seu ciclo, essas conseguem adaptar-se de maneira mais fácil, pois desenvolvem respostas morfofisiológicos, desencadeando mecanismos de resistência como o ajustamento osmótico, mantendo assim a turgescência e o abastecimento de água para as folhas (DESOKY et al., 2021).

6 CONCLUSÃO

Esse estudo evidenciou que a escassez hídrica afeta negativamente a nodulação, crescimento, nutrição nitrogenada e aspectos fisiológicos de plantas de feijão-fava em solo arenoso e franco-arenoso do semiárido piauiense. A inoculação com *Bradyrhizobium viridifuturi* é eficiente em aumentar a nodulação das plantas nos dois solos e a adubação nitrogenada mineral é eficiente no aumento da produção de biomassa, no solo arenoso, e no aumento do acúmulo de nitrogênio e conteúdo de pigmentos fotossintéticos nas plantas em ambos os solos sob diferentes condições de umidade. As comunidades nativas de rizóbios do solo franco-arenoso são eficientes na promoção do crescimento das plantas sob déficit hídrico. O uso do nitrogênio mineral é mais indicado que a inoculação com *B. viridifuturi* para melhoraria da tolerância do feijão-fava ao déficit hídrico, especialmente no solo arenoso.

REFERÊNCIAS

ÁLVAREZ-ARAGÓN, R.; PALACIOS, J. M.; RAMÍREZ-PARRA, E. Rhizobial symbiosis promotes drought tolerance in *Vicia sativa* and *Pisum sativum*. **Environmental and Experimental Botany**, v. 208, p. 105268, 2023.

ANJUM, S. A.; ASHRAF, U.; TANVEER, M.; KHAN, I.; HUSSAIN, S.; SHAHZAD, B.; ZOHAIB, A.; ABBAS, F.; SALEEM, M. F.; ALI, I.; WANG, L. C. Drought induced changes in growth, osmolyte accumulation and antioxidant metabolism of three maize hybrids. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 69, 2017a.

ANJUM, S. A.; ASHRAF, U.; ZOHAIB, A.; TANVEER, M.; NAEEM, M.; ALI, I.; TABASSUM, I.; NAZIR, U. Growth and developmental responses of crop plants under drought stress: a review. **Zemdirbyste-Agriculture**, v. 104, n. 3, 2017b.

ANJUM, S. A.; TANVEER, M.; ASHRAF, U.; HUSSAIN, S.; SHAHZAD, B.; KHAN, I.; WANG, L. Effect of progressive drought stress on growth, leaf gas exchange, and antioxidant production in two maize cultivars. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, p. 17132-17141, 2016.

ANJUM, S. A.; WANG, L. C.; FAROOQ, M.; HUSSAIN, M.; XUE, L. L., e ZOU, C. M. Brassinolide application improves the drought tolerance in maize through modulation of enzymatic antioxidants and leaf gas exchange. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 197, n. 3, p. 177-185, 2011.

ARAÚJO, A. S. F.; LOPES, A. C. A.; GOMES, R. L. F.; BESERRA JÚNIOR, J. E. A.; ANTUNES, J. E. L.; LYRA, M. C. C. P., FIGUEIREDO, M. V. B. Diversity of native rhizobia nodulating *Phaseolus lunatus* in Brazil. Leg. **Legume Research**, v. 38, n. 5, p. 653-657, 2015.

ASSUNÇÃO-FILHO J. R.; COSTA M. F.; PINHEIRO J. B.; CARVALHO L. C. B.; GOMES R. L. F.; LOPES A. C. Selection of superior genotypes of lima bean landraces by multivariate approach. **Revista Caatinga**, v. 35, n. 1, p. 87-95, 2022.

BEYRA, A.; ARTILES, G. R. Revisión taxonômica de los gêneros *Phaseolus* y *Vigna* (Leguminosae-Papilionoideae) em Cuba. **Anales Del Jardín Botânico de Madrid**, v. 61, p. 135-154, 2004.

BHATNAGAR-MATHUR, P.; DEVI, M. J.; REDDY, D. S.; LAVANYA, M.; VADEZ, V.; SERRAJ, R.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K; SHARMA, K. K. Stress-inducible expression of At DREB1A in transgenic peanut (*Arachis hypogaea* L.) increases transpiration efficiency under water-limiting conditions. **Plant Cell Reports**, v. 26, p. 2071-2082, 2007.

BITOCCHI, E.; RAU, D.; BELLUCCI, E.; RODRIGUEZ, M.; MURGIA, M. L.; GIOIA, T.; SANTO, D.; NANNI, L.; ATTENE, G.; PAPA, R. Beans (*Phaseolus* ssp.) as a model for understanding crop evolution. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 722, 2017.

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2011. **Instrução normativa nº 13, de 24 de março de 2011**. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br>. Acesso em 13 de janeiro de 2024.

CAINE, R. S.; YIN, X.; SLOAN, J.; HARRISON, E. L.; MOHAMMED, U.; FULTON, T.; BISWAL, A. K.; DIONORA, J.; CHATER, C. C.; COE, R. A.; BANDYOPADHYAY, A.; MURCHIE, E. H.; SWARUP, R.; QUICK, W. P.; GRAY, J. E. Rice with reduced stomatal density conserves water and has improved drought tolerance under future climate conditions. **The New Phytologist**, v. 221, n. 1, p. 371-384, 2019.

CARDOSO, A. A.; ANDRAUS, M. P.; BORBA, T. C. O.; MARTIN-DIDONET, C. C. G. e FERREIRA, E. P. B. Characterization of rhizobia isolates obtained from nodules of wild genotypes of common bean. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 48, n. 1, p. 43-50, 2017.

CATSKY, J. Determination of water deficit in disks cut out from leaf blades. **Biologia Plantarum**, v. 2, n. 1, p. 76-78, 1960.

CHACÓN, S. M.; MARTÍNEZ, C. J. Testing domestication scenarios of lima bean (*Phaseolus lunatus* L.) in Mesoamerica: insights from genome-wide genetic markers. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 1551, 2017.

CHEL-GUERRERO, L.; DOMÍNGUEZ-MAGAÑA, M.; MARTÍNEZ-AYALA, A.; DÁVILA-ORTIZ, G.; BETANCUR-ANCONA, D. Lima bean (*Phaseolus lunatus*) protein hydrolysates with ACE-I inhibitory activity. **Food Nutrition Sciences**, v.3, p.511-521. 2012.

CHIBEBA, A. M.; PEREIRA, C. S.; ANTUNES, J. E. L.; RIBEIRO, R. A.; LOPES, Â. C. DE A.; GOMES, R. L. F.; HUNGRIA, M.; ARAUJO, A. S. F. Polyphasic characterization of nitrogen-fixing and co-resident bacteria in nodules of *Phaseolus lunatus* inoculated with soils from Piauí State, Northeast Brazil. **Symbiosis**, v. 80, n. 6, p. 279-292, 2020.

COSTA NETO, V. P.; MENDES, J. B. S.; ARAÚJO, A. S. F.; ALCÂNTARA NETO, F.; BONIFACIO, A.; RODRIGUES, A. C. Symbiotic performance, nitrogen flux and growth of lima bean (*Phaseolus lunatus* L.) varieties inoculated with different indigenous strains of rhizobia. **Symbiosis**, v. 73, n. 2, p. 117–124, 2017.

COSTA, E. M.; RIBEIRO, P. R. A.; LIMA, W., FARIAS, T. P.; MOREIRA, F. M. S. Lima bean nodulates efficiently with *Bradyrhizobium* strains isolated from diverse legume species. **Symbiosis**, v. 73, n. 2, p. 125-133, 2017.

DABESSA, A.; ABEBE, Z.; BEKELE, S. Limitations and strategies to enhance biological nitrogen fixation in sub-humid tropics of Western Ethiopia. **Journal of Agricultural Biotechnology and Sustainable Development**, v. 10, n. 7, p. 122-131, 2018.

DESOKY, E. S. M.; SELEM, E.; ABO EL-MAATI, M. F.; HASSN, A. A. S. A.; BELAL, H. E. E.; RADY, M. M.; AL-HARBI, M. S.; ALI, E. F. Foliar supplementation of clove fruit extract and salicylic acid maintains the performance and antioxidant defense

system of *Solanum tuberosum* L. under deficient irrigation regimes. **Horticulturae**, v. 7, n. 11, p. 435, 2021.

DOLLETE, D.; LUMACTUD, R. A.; CARLYLE, C. N.; SZCZYGLOWSKI, K.; HILL, B., e THILAKARATHNA, M. S. Effect of drought stress on symbiotic nitrogen fixation, soil nitrogen availability and soil microbial diversity in forage legumes. **Plant and Soil**, v. 495, p. 445- 467, 2024.

FANG, Y.; XIONG, L. General mechanisms of drought response and their application in drought resistance improvement in plants. **Cellular and Molecular Life Sciences**, v. 72, p. 673-689, 2015.

FERREIRA, D. F. SISVAR: a computer analysis system to fixed effects split plot type 259 designs. **Revista Brasileira de Biometria**, v, 37, n. 4, p 529-535, 2019.

FOFANA, B.; VEKEMANS, X.; DU JARDIN, P.; BAUDOIN, J. P. Genetic diversity in Lima bean (*Phaseolus lunatus* L.) as revealed by RAPD markers. **Euphytica**, v.95, p.157-165, 1997.

FRED, E. B.; WAKSMAN, S. A. **Laboratory manual of general microbiology**. New York: McGraw-Hill Book, 1928. 145 p.

FURLAN, A. L.; GONZALEZ, E. M.; CHOUDHURY, R. S.; SIGNORELLI, S. Editorial: drought stress in legumes. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 1026157, 2022.

GEURTS, R.; LILLO, A.; BISSELING, T. Exploiting an ancient signalling machinery to enjoy a nitrogen fixing symbiosis. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 15, n. 4, p. 438-443, 2012.

GOYAL, R. K.; MATTOO, A. K.; SCHMIDT, M. A. Rhizobial-host interactions and symbiotic nitrogen fixation in legume crops toward agriculture sustainability. **Frontiers in Microbiology**, v. 12, p. 669404, 2021.

GUEDES, G. N.; SOUZA, A. S.; LIMA, A. S.; ALVES, L. S. Eficiência agronômica de inoculantes em feijão-caupi no município de Pombal-PB. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 5, n. 4, p. 82-89, 2010.

HANNA, S. H. S.; OSBORNE-LEE, I. W.; CESARETTI, G. P.; MISSO, R.; KHALIL, M. T. Ecological agro-ecosystem sustainable development in relationship to other sectors in the economic system, and human ecological footprint and imprint. **Agriculture and Agricultural Science Procedia**, v. 8, p. 17-30, 2016.

HELLIWELL J. R.; STURROCK, C. J.; MILLER, A. J.; WHALLEY, W. R.; MOONEY, S. J. The role of plant species and soil condition in the structural development of the rhizosphere. **Plant, Cell and Environment**, v. 42, n. 6, p.1974-1986, 2019.

HERRIDGE, D. F.; PEOPLES, M. B.; BODDEY, R. M. Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems. **Plant Soil**, v. 3, n. 11, p. 1-18, 2008.

ILYAS, M.; NISAR, M.; KHAN, N.; HAZRAT, A.; KHAN, A. H.; HAYAT, K.; FAHAD, S.; KHAN, A.; ULLAH, A. Drought tolerance strategies in plants: a mechanistic approach. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 40, p. 926-944, 2021.

JACINTO JUNIOR, S. G.; LUCENA, E. M. P. Alterações morfofisiológicas e metabólitos secundários produzidos por feijoeiros submetidos ao estresse hídrico: uma revisão integrativa. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 14, p. e445111436506, 2022.

JACINTO JUNIOR, S. G.; MORAES, J. G. L.; SILVA, F. D. B. D.; SILVA, B. D. N.; SOUSA, G. G. D.; OLIVEIRA, L. L. B. D.; MESQUITA, R. O. Respostas fisiológicas de genótipos de fava (*Phaseolus lunatus* L.) submetidas ao estresse hídrico cultivadas no Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.34, p.413-422, 2019.

KHALIL, A. M.; MURCHIE, E. H.; MOONEY, S. J. Quantifying the influence of water deficit on root and shoot growth in wheat using X-ray computed tomography. **AoB Plants**, v. 12, n. 5. p. plaa036, 2020.

KHASANOVA, A.; JAMES, J. J.; DRENOVSKY, R. E. Impacts of drought on plant water relations and nitrogen nutrition in dryland perennial grasses. **Plant and Soil**, v. 372, p. 541-552, 2013.

KHATUN, M.; SARKAR, S.; ERA, F. M.; ISLAM, A. K. M. M.; ANWAR, M. P.; FAHAD, S.; DATTA, R.; ISLAM, A. K. M. A. Drought stress in grain legumes: effects, tolerance mechanisms and management. **Agronomy,** v. 11, n. 12, p. 2374, 2021.

KUSVURAN, S.; DASGAN, H.Y. Effects of drought stress on physiological and biochemical changes in *Phaseolus vulgaris* L. **Legume Research**, v. 40, n. 1, 55-62, 2017.

LEMOS, R. C., SANTOS, R. D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 3 ed. Campinas: SBCS. 1996. 83 p.

LIU, F.; ZHOU, Y.; ZHANG, S.; LIU, N. Inorganic nitrogen enhances the drought tolerance of evergreen broad-leaved tree species in the short-term, but may aggravate their water shortage in the mid-term. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 875293, 2022.

LOPES, Â. C. A.; GOMES, R. L. F.; ARAÚJO, A. S. F. ***Phaseolus lunatus*: diversity, growth and production**. New York: Nova Science. 2015. 177 p.

LOPES, L. S.; MENDES, L. W.; ANTUNES, J. E. L.; OLIVEIRA, L. M. S.; MELO, V. M. M.; PEREIRA, A. P. A.; COSTA, A. F.; OLIVEIRA, J. P.; MARTÍNEZ, C. R.; FIGUEIREDO, M. V. B.; ARAUJO, A. S. F. Distinct bacterial community structure and composition along different cowpea producing ecoregions in Northeastern Brazil. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 831, 2021.

MAFAKHERI, A.; SIOSEMARDEH, A. F.; BAHRAMNEJAD, B.; STRUIK, P. C.; SOHRABI, Y. Effect of drought stress on yield, proline and chlorophyll contents in three chickpea cultivars. **Australian Journal of Crop Science**, v. 4, n. 8, p. 580-585, 2010.

MAQUET, A.; VEKEMANS, X. Z.; BAUDOIN, J. P. Phylogenetic study on wild allies of lima bean, *Phaseolus lunatus* L. (Fabaceae), and implications on its origin. **Plant Systematics and Evolution**, v. 218, p. 43-54, 1999.

MARTÍNEZ-NIETO, M. I.; ESTRELLES, E.; PRIETO-MOSSI, J.; ROSELLÓ, J.; SORIANO, P. Resilience capacity assessment of the traditional lima bean (*Phaseolus lunatus* L.) landraces facing climate change. **Agronomy**, v.10, n. 6, p. 758, 2020.

MARTÍNEZ-NIETO, M. I.; GONZÁLEZ-ORENGA, S.; SORIANO, P.; PRIETO-MOSSI, J.; LARREA, E.; DOMÉNECH-CARBÓ, A.; TOFEI, A. M.; VICENTE, O.; MAYORAL, O. Are traditional lima bean (*Phaseolus lunatus* l.) landraces valuable to cope with climate change? Effects of drought on growth and biochemical stress markers. **Agronomy**, v. 12, n. 7, p. 1715, 2022.

MENDES, J. B. S.; COSTA. N. V. P.; SOUSA, C. D. A.; CARVALHO FILHO, M. R.; RODRIGUES, A. C.; BONIFACIO, A. Trichoderma and bradyrhizobia act synergistically and enhance the growth rate, biomass and photosynthetic pigments of cowpea (*Vigna unguiculata*) grown in controlled conditions. **Symbiosis**, v. 80, n. 4, p. 133-143, 2020.

MIRANSARI, M.; RIAHI, H.; EFTEKHAR, F.; MINAIE, A.; SMITH, D. L. Improving soybean (*Glycine max* L.) N_2 fixation under stress. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 32, p. 909-921, 2013.

MOREIRA F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2 ed. Lavras: UFLA, p. 729, 2006.

MOTTA-ALDANA, J. R.; SERRANO-SERRANO, M. L.; HERNÁNDEZ-TORRES, J.; CASTILLO-VILLAMIZAR, G.; DEBOUCK, D. G. Multiple origins of lima bean landraces in the Americas: evidence from chloroplast and nuclear DNA polymorphisms. **Crop Science**, v. 50, n. 5, p. 1773-1787, 2010.

MOURADI, M.; FARISSI, M.; BOUIZGAREN, A.; QADDOURY, A.; GHOULAM, C. *Medicago sativa*-rhizobia symbiosis under water deficit: physiological, antioxidant and nutritional responses in nodules and leaves. **Journal of Plant Nutrition**, v. 41, n. 3, p. 384-395, 2017.

OLIVEIRA, A. E. S.; SIMEÃO, M.; MOUSINHO, F. E. P.; GOMES, R. L. F. Desenvolvimento do feijão-fava (*Phaseolus lunatus* L.) sob déficit hídrico cultivado em ambiente protegido. **Holos**, v. 1, p. 143-151, 2014.

PATEL, K. F.; FANSLER, S. J.; CAMPBELL, T. P.; BOND-LAMBERTY, B.; SMITH, A. P.; ROYCHOWDHURY, T.; MCCUE, L. A.; VARGA, T.; BAILEY. V. L. Soil texture

and environmental conditions influence the biogeochemical responses of soils drought and flooding. **Communications Earth & Environment**, v. 2, p. 127, 2021.

PEGADO, C. M. A.; BARBOSA, L. J. N.; MENDES, J. E. M. F.; SOUTO, P. C.; SOUTO, J. S. Decomposição superficial e subsuperficial de folhas de fava (*Phaseolus lunatus* L.) na região do brejo da Paraíba, Brasil. **Revista Caatinga**, v.21, n.1, p. 218-223, 2008.

PEREIRA-FILHO, T. B.; MARINI, F. S.; FREITAS, M. S. e PEREIRA, E. M. Macro- and micronutrient content in native varieties of *Phaseolus lunatus* L. fertilized with rock dust. **Australian Journal of Crop Science**, v. 16, n. 11, p. 1217-1223, 2022.

PHILIPPOT, L.; CHENU, C.; KAPPLER, A.; RILLIG, M. C.; FIERER, N. The interplay between microbial communities and soil properties. **Nature Reviews Microbiology**, 2023.

RAYMOND, J.; SIEFERT, J. L.; STAPLES, C. R.; BLANKENSHIP, R. E. The natural history of nitrogen fixation. **Molecular Biology and Evolution**, v. 21, n. 3, p. 541-554, 2004.

ROCHA, L. B.; COSTA, E. M.; RIBEIRO, A. C. M. S.; SANTOS, J. F.; MIRANDA, R. S.; SANTOS, A. S.; PAULA-MARINHO, S. P.; FONSECA, B. S. F.; MOREIRA, F. M. D. S. Brazilian semiarid *Bradyrhizobium* strains increase nitrogen accumulation and modulate physiological parameters to enable superior grain production in soybean genotypes. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 23, n. 2, p. 1-6, 2023.

RODRIGUES, T. L.; COSTA, E. M.; RIBEIRO, P. R. A, CARVALHO, F.; RUFINI, M.; SILVA, A. O.; TEIXEIRA, A. F. S.; PEREIRA, T. A.; SALES, F. R.; MOREIRA, F. M. S. Diversity and biotechnological potential of rhizobia isolated from lima bean nodules collected at a semiarid region. **Soil Science Society of America Journal**, v. 85, n. 5, p. 1663-1678, 2021.

RUFINI, M.; FERREIRA, P. A. A.; SOARES, B. L.; OLIVEIRA, D. P.; ANDRADE, M. J. B.; MOREIRA, F. M. S. Simbiose de bactérias fixadoras de nitrogênio com feijoeiro comum em diferentes valores de pH. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, p. 81-88, 2011.

SANTOS, J. O.; ANTUNES, J. E. L.; ARAÚJO, A. S. F.; LYRA, M. C. C. P.; GOMES, R. L. F.; LOPES, A. C. A.; FIGUEIREDO, M. V. B. Genetic diversity among native isolates of rhizobia from *Phaseolus lunatus*. **Annals of Microbiology**, v. 61, p. 437-444, 2011.

SANTOS, M.; BARROS, M. K.; BARROS, H.; BAROSI, K. X.; e CHICÓ, L. Sementes crioulas: Sustentabilidade no semiárido paraibano. **Agrarian Academy**, v. 4, n. 7, p. 403-418, 2017.

SARRUGE, J. R.; HAAG, H. P. **Análises químicas em plantas**. Piracicaba: USP. 1979. 27 p.

SERRANO-SERRANO, M. L.; ANDUEZA-NOH, R. H.; MARTÍNEZ-CASTILLO, J.; DEBOUCK, D. G.; CHACÓN S, M. I. Evolution and domestication of lima bean in Mexico: Evidence from ribosomal DNA. **Crop Science**, v. 52, n. 4, p. 1698-1712, 2012.

SHETEIWY, M. S.; ALI, D. F. I.; XIONG, Y. C.; BRESTIC, M.; SKALICKY, M.; HAMOUD, Y. A.; ULHASSAN, Z.; SHAGHALEH, H.; ABDELGAWAD, H.; FAROOQ, M.; SHARMA, A.; EL-SAWAH, A. M. Physiological and biochemical responses of soybean plants inoculated with Arbuscular mycorrhizal fungi and *Bradyrhizobium* under drought stress. **BMC Plant Biology**, v. 21, n. 1, p. 1-21, 2021.

SILVA, J. D. L; OLIVEIRA, E. G.; SOARES, L. A. C.; FERREIRA-GOMES, R. L.; COSTA, A. F.; BARROS, R. F. M.; ALMEIDA, R. C.; SILVA, V. B.; COSTA, M. F.; LOPES, Â. C. A. Traditional varieties of lima beans (*Phaseolus Lunatus* L.) in northeastern Brazilian farms: conservation and sustainability. **Genetic Resources and Crop Evolution**, v. 70, p. 2021-2032, 2023.

SILVA, M. H.; SILVA, M. A. A.; DUARTE, E. R.; BONETTI, R. A. T.; PALUDETTO, A. E.; MIYASHIRO, C. F. A relação do nitrogênio com o desenvolvimento das plantas e suas formas de disponibilidade. **Revista Científica Multidisciplinar**, v. 5, n. 1, p. e514762, 2024.

SILVER, W. L.; NEFF, J.; MCGRODDY, M.; VELDKAMP, E.; KELLER, M.; COSME, R. Effects of soil texture on below ground carbon and nutrient storage in lowland Amazonian Forest ecosystem. **Ecosystems**, v. 3, n. 2, p. 193-209, 2000.

SINDHU, S.; DAHIYA, A.; GERA, R.; SINDHU, S. S. Mitigation of abiotic stress in legume-nodulating rhizobia for sustainable crop production. **Agricultural Research**, v. 9, p. 444-459, 2020.

SOONG, J. L.; JANSSENS, I. A.; GRAU, O.; MARGALEF, O.; STAHL, C.; VAN LANGENHOVE, L.; URBINA, I.; CHAVE, J.; DOURDAIN, A.; FERRY, B.; FREYCON, V.; HERAULT, B.; SARDANS, J.; PEÑUELAS, J.; VERBRUGGEN, E. Soil properties explain tree growth and mortality, but not biomass, across phosphorus-depleted tropical forests. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 2302, 2020.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. Brasília: Embrapa Cerrados, 2004. 416 p.

TEIXEIRA, C. M.; CARVALHO, G. J.; SILVA, C. A.; ANDRADE, M. J. B.; PEREIRA, J. M. Liberação de macronutrientes das palhadas de milheto, solteiro e consorciado com feijão-de-porco sob cultivo de feijão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, p.497-505, 2010.

THILAKARATHNA, M. S.; RAIZADA, M. N. A meta-analysis of the effectiveness of diverse rhizobia inoculants on soybean traits under field conditions. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 105, p. 177-196, 2017.

TODAKA, D.; ZHAO, Y.; YOSHIDA, T.; KUDO, M.; KIDOKORO, S.; MIZOI, J.; KODAIRA, K. -S.; TAKEBAYASHI, Y.; KOJIMA, M.; SAKAKIBARA, H.; TOYOOKA,

K.; SATO, M.; FERNIE, A. R.; SHINOZAKI, K.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K. Temporal and spatial changes in gene expression, metabolite accumulation and phytohormone content in rice seedlings grown under drought stress conditions. **The Plant Journal**, v. 90, n. 1, p. 61-78, 2017.

VIEIRA, C. Leguminosas de grãos: importância econômica na agricultura e na alimentação humana**. Informe Agropecuário**, v. 16, n. 174, p. 5-11, 1992.

VINCENT, J. M. **A manual for the practical study of root nodule bacteria**. Oxford: Blackwell Scientific.1970. 164 p.

WELLBURN, A. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. **Journal of Plant Physiology**, v. 144, n. 3, p. 307-313, 1994.

ZANDALINAS, S. I.; BALFAGÓN, D.; ARBONA, V.; GÓMEZ-CADENAS, A. Modulation of antioxidant defense system is associated with combined drought and heat stress tolerance in citrus. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 953, 2017.

ANEXOS

Tabela S1 - Resumo da análise de variância para as variáveis altura da planta (ALT), diâmetro do coleto (DC), número de trifólio (NTF), número de nódulos (NN), massa seca de nódulos (MSN), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR), massa seca total (MST), tolerância relativa ao estresse (TER) e acúmulo de nitrogênio da parte aérea (ANPA), obtidos em plantas de feijão-fava em função das fontes de nitrogênio e níveis de déficit hídrico do solo arenoso.

FV	GL	ALT	DC	NTF	NN	MSN	MSPA	MSR	MST	TRE	ANPA
Bloco	3	2538.25*	0.053^{ns}	1.1111^{ns}	3792.4^{ns}	0.0457^{ns}	0.1487^{ns}	0.2036^{ns}	0.2251^{ns}	45.384^{ns}	491.893^{ns}
Fontes de nitrogênio (FN)	2	9160.33*	1.9052*	429.69*	505327*	1.1103*	432.10*	37.587*	721.69*	622.80*	58684.2*
Nível Hídrico (H)	2	4606.08*	1.3286*	223.02*	11820*	0.0335^{ns}	32.323*	6.1590*	65.776*	3120.1*	2334.37*
FN x H	4	3600.41*	0.2144^{ns}	38.611*	4824.7^{ns}	0.0763*	12.062*	1.3972*	21.428*	200.16*	249.113*
Resíduo	24										
Total	35										
CV (%)		18.11	6.62	12.97	34.96	63.42	7.38	10.17	6.59	8.31	17.08

*= significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; ^{ns} =não significativo.

Tabela S2 - Resumo da análise de variância para as variáveis altura da planta (ALT), diâmetro do coleto (DC), número de trifólio (NTF), número de nódulos (NN), massa seca de nódulos (MSN), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR), massa seca total (MST), tolerância relativa ao estresse (TER) e acúmulo de nitrogênio da parte aérea (ANPA), obtidos em plantas de feijão-fava em função das fontes de nitrogênio e níveis de déficit hídrico do solo franco-arenoso.

FV	GL	ALT	DC	NTF	NN	MSN	MSPA	MSR	MST	TRE	ANPA
Bloco	3	696.22^{ns}	0.0643^{ns}	4.990^{ns}	0.0268^{ns}	0.1705^{ns}	0.0566^{ns}	0.2171^{ns}	0.4846^{ns}	55.499^{ns}	17.3504^{ns}
Fontes de nitrogênio (FN)	2	478.11^{ns}	0.0723^{ns}	8.3611^{ns}	7.6233*	10.0333*	0.4799^{ns}	1.0529*	2.5529*	1305.06*	13272.01*
Nível Hídrico (H)	2	44478.36*	0.0854^{ns}	172.44*	0.5819*	1.5008*	51.765*	10.844*	109.91*	9287.82*	4416.97*
FN x H	4	640.44^{ns}	0.4050*	9.1944*	0.5819*	1.5878*	8.3735*	0.1128^{ns}	8.6797*	519.063*	851.965*
Resíduo	24										
Total	35										
CV (%)		13.26	7.64	15.30	46.22	92.67	9.03	17.27	9.04	10.26	12.00

*= significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; ^{ns} =não significativo.

Tabela S3 - Resumo da análise de variância para as variáveis clorofila a (Clof.a), clorofila b (Clof.b), clorofila total (Clof.t), carotenoides (Carot), fotossíntese líquida (*A*), transpiração (*E*), condutância estomática ($g_{s,}$), concentração interna de CO_2 (Ci), eficiência de carboxilação da rubisco (R), eficiência momentânea do uso da água (EA) e teor relativo de água (TRA), obtidos em plantas de feijão-fava em função das fontes de nitrogênio e níveis de déficit hídrico do solo arenoso.

FV	GL	Clof.a	Clof.b	Clof.t	Carot.	*A*	*E*	*gs*	Ci	Rub	EA	TRA
Bloco	3	0.0477^{ns}	0.0062^{ns}	0.0559^{ns}	0.0020^{ns}	0.1794^{ns}	0.0189^{ns}	73.134*	1666.94^{ns}	0.000007^{ns}	0.0872^{ns}	5.9748^{ns}
Fontes de nitrogênio (FN)	2	1.4161*	0.2012*	0.6651*	0.0289*	8.3156*	0.2414^{ns}	332.39*	5479.56*	0.000424*	4.053*	378.98*
Nível Hídrico (H)	2	0.0559^{ns}	0.0065^{ns}	0.0784^{ns}	0.0252*	1.8326*	0.4752*	177.26*	843.60^{ns}	0.000009^{ns}	0.9924^{ns}	187.90*
FN x H	4	0.3317*	0.1216*	0.8385*	0.0190*	5.3915 *	0.6408*	2544*	5459.91*	0.000176*	1.1910^{ns}	272.68*
Resíduo	24											
Total	35											
CV (%)		18.23	14.65	14.79	10.32	9.01	16.47	6.29	11.77	9.45	19.94	5.60

*= significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; ^{ns} =não significativo.

Tabela S4 - Resumo da análise de variância para as variáveis clorofila a (Clof.a), clorofila b (Clof.b), clorofila total (Clof.t), carotenoides (Carot), fotossíntese líquida (*A*), transpiração (*E*), condutância estomática ($g_{s,}$), concentração interna de CO_2 (Ci), eficiência de carboxilação da rubisco (R), eficiência momentânea do uso da água (EA), teor relativo de água (TRA) e tolerância relativa ao estresse (TRE), obtidos em plantas de feijão-fava em função das fontes de nitrogênio e níveis de déficit hídrico do solo franco-arenoso.

FV	GL	Clof.a	Clof.b	Clof.t	Carot	*A*	*E*	*gs*	Ci	Rub	EA	TRA
Bloco	3	0.0361^{ns}	0.0174^{ns}	0.0199^{ns}	0.0061^{ns}	1.1041^{ns}	0.1643*	433.52^{ns}	562.17^{ns}	0.00062^{ns}	0.9816*	72.828*
Fontes de nitrogênio (FN)	2	10.865*	1.1700*	18.939*	0.3873*	34.372*	0.3181*	315.03^{ns}	4308.7*	0.001469*	3.1127*	261.03*
Nível Hídrico (H)	2	2.236*	0.4390*	4.640*	0.0800*	19.699*	0.9530*	6479.5*	1066.7*	0.00021*	3.4326*	492.38*
FN x H	4	1.3032*	0.1521*	2.2619*	0.0655*	8.3124*	0.2999*	2997.5*	1554.0*	0.00016*	1.3684*	167.13*
Resíduo	24											
Total	35											
CV (%)		10.72	16.39	10.83	11.74	8.32	8.79	16.66	6.96	12.03	10.70	6.26

*= significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; ^{ns} =não significativo.