

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

DAYANE BORTOLOTO DA SILVA

**APLICAÇÃO FOLIAR DE SILÍCIO E DOSES DE NITROGÊNIO VIA SOLO NA
CULTURA DO CAFÉ ARÁBICA EM FUNÇÃO DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA**

Ilha Solteira
2023

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

DAYANE BORTOLOTO DA SILVA

**APLICAÇÃO FOLIAR DE SILÍCIO E DOSES DE NITROGÊNIO VIA SOLO NA
CULTURA DO CAFÉ ARÁBICA EM FUNÇÃO DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA**

Tese apresentada à Faculdade de
Engenharia de Ilha Solteira – Unesp como
parte dos requisitos para obtenção do título
de Doutora em Agronomia. Especialidade:
Sistema de Produção.

Enes Furlani Junior
Orientador

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S586a Silva, Dayane Bortoloto.
Aplicação foliar de silício e doses de nitrogênio via solo na cultura do café arábica em função da disponibilidade hídrica / Dayane Bortoloto Silva. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2023
62 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Sistema de Produção, 2023

Orientador: Enes Furlani Junior

Inclui bibliografia

1. Adubação nitrogenada. 2. Silicato de cálcio. 3. Estresse hídrico. 4. Cafeeiro. 5. Trocas gasosas. 6. Crescimento.


Amanda Sertori dos Santos

Bibliotecária - CRB/8-9061
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao
Usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

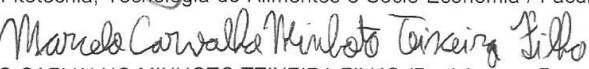
TÍTULO DA TESE: Aplicação foliar de silício e doses de nitrogênio via solo na cultura do café arábica em função da disponibilidade hídrica

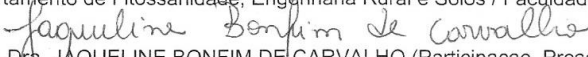
AUTORA: DAYANE BORTOLOTO DA SILVA

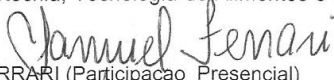
ORIENTADOR: ENES FURLANI JUNIOR

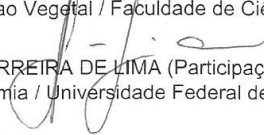
Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Agronomia, área:
Sistemas de Produção pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. ENES FURLANI JUNIOR (Participação Presencial)
Departamento de Fitotecnia, Tecnologia de Alimentos e Socio-Economia / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP


Prof. Dr. MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA FILHO (Participação Presencial)
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP


Profa. Dra. JAQUELINE BONFIM DE CARVALHO (Participação Presencial)
Departamento de Fitotecnia, Tecnologia de Alimentos e Socio-Economia / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP


Prof. Dr. SAMUEL FERRARI (Participação Presencial)
Departamento de Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas - UNESP


Prof. Dr. SEBASTIÃO FERREIRA DE LIMA (Participação Presencial)
Departamento de Agronomia / Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - UFMS

Ilha Solteira, 01 de setembro de 2023

Para minha mãe, irmãs e sobrinhas.

AGRADECIMENTOS

A minha mãe, por ser um exemplo de mulher, por todo o amor, educação, apoio, incentivo e oportunidades de estudos.

Ao meu namorado por ter estado presente na condução de todos os experimentos que conduzir durante esses anos, pela compreensão nos momentos difíceis, pela paciência, amor.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Enes Furlani Junior, pela orientação, atenção, amizade, paciência e pelo exemplo de dedicação durante todo esse tempo em que trabalhamos juntos.

Aos amigos que fiz durante a minha trajetória, mais principalmente ao Otavio, por ter sido muito mais que um amigo durante esses anos, por ter me apoiado, me incentivado e por me fazer questionar. Você é a melhor pessoa que conheci durante minha trajetória acadêmica.

A todos os professores e funcionários da universidade, em especial os do departamento de Fitotecnia, Tecnologia de Alimentos e Sócio Economia, que me ajudaram durante todos os períodos de estudo e pesquisa.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP, Campus de Ilha Solteira, por toda sua estrutura e oportunidades proporcionadas ao longo da carreira acadêmica.

RESUMO

A escassez hídrica impacta negativamente as plantas, afetando seu metabolismo e desenvolvimento, sendo a água essencial nas fases vegetativas e reprodutivas do cafeeiro, podendo ainda comprometer absorção de nutrientes. O nitrogênio (N) é um componente chave das proteínas, enzimas e aminoácidos, que são fundamentais para o crescimento e a formação dos tecidos vegetais. O silício (Si) é considerado um elemento benéfico, sendo responsável por fortalecer as plantas contra estresses bióticos ou abióticos. Desta forma, o objetivo deste trabalho é avaliar influência da adubação nitrogenada e aplicação foliar de Si em diferentes condições hídricas no desenvolvimento, trocas gasosas e nutrição do café arábica. O experimento foi realizado em casa de vegetação, com delineamento em blocos casualizados, com esquema fatorial $4 \times 4 \times 3$, com 3 blocos, constituídos por quatro doses de nitrogênio (0, 100, 200 e 400 kg ha⁻¹), quatro doses de silício (0, 400, 600 e 800 mg L⁻¹) e três condições hídricas (30, 50, e 100% da capacidade de campo (CC)). A disponibilidade de água afetou a altura das plantas e o diâmetro do caule. A aplicação de 600 mg L⁻¹ de Si foliar aumentou a altura aos 45 dias após os transplântio (DAT) e com 30% CC. Áreas foliares reduziram com baixa disponibilidade hídrica, e doses de N tiveram relação quadrática com maior área foliar. O menor nível de água favoreceu índices SPAD, enquanto doses de N levaram a aumento linear. Em condições de 50% CC, e aplicação de 400 mg L⁻¹ de Si proporcionou a menor Ci com a 227 kg ha⁻¹ de N. Observou-se que as plantas sob 30% CC e sem aplicação de Si apresentaram maior teor de fósforo (P) com 242 kg ha⁻¹ de N, enquanto as sob 100% CC e alta dose de Si (800 mg L⁻¹) mostraram aumento linear do teor de P com doses crescentes de N. A correlação entre Ci e transpiração e EUA e transpiração indica uma relação negativa e há uma forte correlação positiva entre EUA e K, a condutância estomática e transpiração e entre a fotossíntese líquida e o teor de P no cafeeiro.

Palavras-chave: adubação nitrogenada; silicato de cálcio; estresse hídrico; cafeeiro; trocas gasosas; nutrição; crescimento.

ABSTRACT

Water scarcity impacts the qualities of plants, affecting their metabolism and development, with water being essential in the vegetative and reproductive phases of the coffee plant, and may also compromise the absorption of nutrients. Nitrogen (N) is a key component of proteins, enzymes, and amino acids, which are fundamental for the growth and formation of plant tissues. Silicon (Si) is considered a beneficial element, strengthening plants against biotic or abiotic stresses. Therefore, the objective of this work is to evaluate the influence of nitrogen fertilization and foliar application of Si in different water conditions on the development, gas exchange, and nutrition of Arabica coffee. The experiment was carried out in a greenhouse, with a randomized block design, with a 4 x 4 x 3 factorial scheme, with 3 blocks, consisting of four doses of nitrogen (0, 100, 200, and 400 kg ha⁻¹), four doses of silicon (0, 400, 600 and 800 mg L⁻¹) and three water conditions (30, 50 and 100% of field capacity (FC)). Water availability affected plant height and stem diameter. The application of 600 mg L⁻¹ of foliar Si increased height at 45 days after transplanting (DAT) and at 30% FC. Leaf areas were reduced with low water availability, and N doses had a quadratic relationship with greater leaf area. The lower water level favored the SPAD indices, while the N doses led to a linear increase. Under conditions of 50% FC, and application of 400 mg L⁻¹ of Si provided the lowest Ci with 227 kg ha⁻¹ of N. It should be noted that plants under 30% FC and without application of Si showed higher content of phosphorus (P) with 242 kg ha⁻¹ of N, while under 100% CC and high dose of Si (800 mg L⁻¹) showed a linear increase in P content with increasing doses of N. The brightness between Ci and transpiration and US and transpiration indicates a negative relationship. There is a strong positive glow between US and K, stomatal conductance and transpiration, and between net photosynthesis and P content in the coffee tree.

Keywords: nitrogen fertilization; calcium silicate; hydric stress; coffee tree; gas exchange; nutrition; growth.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Local onde o experimento foi realizado.	21
Figura 2 – Medidor de umidade nas três condições hídricas (30, 50 e 100% CC).....	22
Figura 3 – Avaliação de (A) altura de plantas, (B) diâmetro do caule, (C) índice SPAD e (D) trocas gasosas em plantas de café arábica.....	23
Figura 4 – Médias da altura (A) e diâmetro do caule (B) de mudas de café arábica aos 45, 72, 105, 134, 168, 224, 255, 286 e 305 DAT (dias após o transplante), submetidas as diferentes condições hídricas (30%, 50% e 100% da capacidade de campo).....	27
Figura 5 – Efeito de doses de nitrogênio em plantas de café arábica submetidas a 30 e 50% da capacidade de campo (CC).....	30
Figura 6 – Área foliar (cm ²) de mudas de café arábica, aos 135 DAT (A) e 306 DAT (B), em diferentes condições hídricas (30, 50 e 100 % da capacidade de campo (CC))	32
Figura 7 – Efeito das doses de nitrogênio (kg ha ⁻¹), na área foliar (cm ²) de mudas de café arábica aos 135 dias após o transplante (DAT) (A) e aos 306 DAT (B).....	33
Figura 8 – Médias do índice SPAD de mudas de café arábica aos 45, 72, 105, 134, 168, 224, 255, 286 e 305 DAT (dias após o transplante), submetidas as diferentes condições hídricas (30%, 50% e 100% da capacidade de campo).....	35
Figura 9 – Efeito das condições hídricas (30, 50 e 100% da Capacidade de campo (CC)), no índice de cor verde de plantas de café arábica.....	35
Figura 10 – Efeito das doses de nitrogênio (kg ha ⁻¹) no índice SPAD de mudas de arábica aos 45, 72, 105, 134, 168, 224, 255, 286 e 305 DAT (dias após o transplante).....	36
Figura 11 – Resumo da análise de correlação para as variáveis concentração interna de CO ₂ (Ci), Transpiração (E), condutância estomática (gs), fotossíntese líquida (A), eficiência no uso da água (EUA), teor foliar de nitrogênio (N), fosforo (P), potássio (K) e silício (Si) para mudas de café arábica	53
Figura 12 – Rede de correlação para as variáveis concentração interna de CO ₂ (Ci), Transpiração (E), condutância estomática (gs), fotossíntese líquida (A), eficiência no uso da água (EUA), teor foliar de nitrogênio (N), fosforo (P), potássio (K) e silício (Si) para mudas de café arábica	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características químicas do solo utilizado no experimento, 0.0-0.20 m, proveniente da Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da UNESP, Selvíria, MS. 2020..	22
Tabela 2 – Análise de variância para altura de plantas de café arábica aos 45, 72, 105, 134, 168, 224, 255, 286 e 305 DAT (dias após o transplante), submetidas as diferentes condições hídricas (CH), a doses de nitrogênio no solo (N) e de silício foliar (Si)	25
Tabela 3 – Análise de variância para diâmetro do caule da planta de café arábica aos 45, 72, 105, 134, 168, 224, 255, 286 e 305 DAT (dias após o transplante), submetidas as diferentes condições hídricas (CH), a doses de nitrogênio no solo (N) e da aplicação foliar de silício (Si)	26
Tabela 4 – Desdobramento de Condições hídricas com doses de Silício para altura de plantas de café arábica aos 45 DAT (dias após o transplante)	28
Tabela 5 – Desdobramento de Condições hídricas com doses de silício para diâmetro do caule de plantas de café arábica aos 45 DAT (dias após o transplante)	28
Tabela 6 – Desdobramento de Condições hídricas com doses de nitrogênio para diâmetro do caule de plantas de café arábica aos 105 DAT (dias após o transplante)	29
Tabela 7 – Desdobramento de Condições hídricas com doses de nitrogênio para altura de plantas de café arábica aos 224 DAT (dias após o transplante)	29
Tabela 8 – Desdobramento de Condições hídricas com doses de nitrogênio para altura de plantas de café arábica aos 255 DAT (dias após o transplante)	31
Tabela 9 – Análise de variância da área foliar das mudas de café arábica aos 135 e 306 DAT (dias após o transplante), submetidas as diferentes condições hídricas (CH), doses de nitrogênio no solo (N) e aplicação foliar de silício (Si).....	31
Tabela 10 – Desdobramento das doses de silício com doses de nitrogênio para área foliar de café arábica aos 306 DAT (dias após o transplante)	33
Tabela 11 – Análise de variância para leituras SPAD em plantas de café arábica aos 45, 72, 105, 134, 168, 224, 255, 286 e 305 DAT (dias após o transplante), submetidas as diferentes condições hídricas (CH), doses de nitrogênio no solo (N) e aplicação foliar de silício (Si)....	34
Tabela 12 – Análise de variância para concentração interna de CO ₂ (Ci), transpiração (E), condutância estomática (gs) e fotossíntese (A), uso e eficiência da água (EUA) aos 310 DAT (dias após o transplante), submetidas as diferentes condições hídricas (CH), doses de nitrogênio no solo (N) e aplicação foliar de silício (Si).....	37
Tabela 13 – Desdobramento Condições hídricas X doses de nitrogênio (N) X doses de silício (Si) para concentração interna de CO ₂ (Ci) em plantas de café arábica	38
Tabela 14 – Desdobramento Condições hídricas X doses de nitrogênio (N) X doses de silício (Si) para Transpiração em plantas de café arábica	40
Tabela 15 – Desdobramento Condições hídricas X doses de nitrogênio (N) X doses de silício (Si) para condutância estomática (gs) em plantas de café arábica	42

Tabela 16 – Desdobramento Condições hídricas X doses de N X doses de Si para fotossíntese líquida (A) em plantas de café arábica	44
Tabela 17 – Desdobramento Condições hídricas X doses de nitrogênio (N) X doses de silício (Si) para eficiência e uso da água (EUA) em plantas de café arábica	45
Tabela 18 – Análise de variância teor de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K) e silício (Si) da parte aérea das mudas de café arábica submetidas as diferentes condições hídricas (CH), doses de nitrogênio no solo (N) e aplicação foliar de silício (Si).....	46
Tabela 19 – Desdobramento Condições hídricas X doses de nitrogênio (N) X doses de silício (Si) para teor de N na parte aérea de mudas de café arábica.....	47
Tabela 20 – Desdobramento Condições hídricas X doses de nitrogênio (N) X doses de silício (Si) para teor de fósforo (P) na parte aérea de mudas de café arábica	49
Tabela 21 – Desdobramento Condições hídricas X doses de nitrogênio (N) X doses de silício (Si) para teor de potássio (K) na parte aérea de mudas de café arábica	50
Tabela 22 – Desdobramento Condições hídricas X doses de nitrogênio (N) X doses de silício (Si) para teor de Si na parte aérea de mudas de café arábica	52

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	15
2.1	A cultura do café.....	15
2.2	Estresse hídrico e seus efeitos no cafeeiro	16
2.3	O Papel do Silício no Estresse Hídrico.....	17
2.4	Adubação nitrogenada no cultivo de café.....	18
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	21
3.1	Local do Experimento	21
3.2	Delineamento Experimental e tratamentos	21
3.3	Instalação e Condução do Experimento.....	22
3.4	Descrição das variáveis analisadas.....	23
3.5	Análise estatística	24
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
4.1	Altura de plantas e diâmetro do caule	25
4.2	Área Foliar	31
4.3	Índice SPAD	34
4.4	Trocas gasosas.....	36
4.5	Teor nutricional.....	46
4.6	Correlação.....	52
5	CONCLUSÃO.....	56
	REFERÊNCIAS.....	57

1 INTRODUÇÃO

O estresse hídrico é uma das principais limitações para o crescimento e desenvolvimento adequado das plantas, alterando seu metabolismo. O cafeeiro é uma cultura muito importante no Brasil e no mundo, sua produção é afetada por alterações ambientais, como chuvas irregulares, que são cada vez mais frequentes) e induzem déficit hídrico (CUNHA et al. 2019).

A disponibilidade insuficiente de água no solo pode afetar negativamente a absorção de nutrientes, a fotossíntese, o transporte de fotoassimilados e a transpiração das plantas. Isso resulta em redução do crescimento vegetativo, diminuição da área foliar, comprometimento da fixação de carbono e, conseqüentemente, redução da produtividade e qualidade dos grãos de café (BATISTA et al., 2010).

O nitrogênio (N) é um nutriente e exigido em grande quantidade pelas plantas, sendo fundamental para o metabolismo, crescimento e desenvolvimento vegetal. A adubação nitrogenada adequada proporciona uma maior taxa de crescimento, aumento da produção de biomassa, e maior fotossíntese o que pode contribuir para melhoria na produtividade (TAIZ et al., 2017)

De acordo com a recomendação, para cafeeiros em produção as doses de N baseiam-se no rendimento esperado e no teor do nutriente na folha. São recomendadas doses de até 450 kg ha⁻¹ de N por ano agrícola, fornecidas no período chuvoso, de setembro a março, compreendendo as fases de floração, frutificação e desenvolvimento vegetativo (RAIJ et al., 1996; RIBEIRO et al., 2017).

Quando o fertilizante nitrogenado é aplicado no solo, parte é absorvido pelo sistema radicular, parte vai para a folhas e caule (parte aérea), uma parte permanece no solo enquanto outra porção pode ficar imobilizada na serrapilheira ou pode se perder do sistema solo-planta. Alguns estudos mostram que raramente uma cultura consegue aproveitar mais de 60% do nitrogênio aplicado como fertilizante. (REICHARDT et al., 2009)

O silício (Si), é um elemento benéfico, e tem sido utilizado como estratégias de manejo para estresse, isso por que ele contribui no fortalecimento das plantas contra estresses bióticos e abióticos. Sua presença no tecido vegetal aumenta a resistência a doenças, insetos-pragas e estresses ambientais, incluindo a seca (KORNDÖRFER

et al., 2007; OLIVEIRA et al., 2012), e pode ainda afetar a absorção e utilização do N pelas plantas (PARECIDO et al., 2018).

Segundo Detmann et al. (2012) a presença de Si pode aumentar a eficiência de absorção de nitrogênio pelas raízes, resultando em maior disponibilidade desse nutriente para as plantas. Além disso, o Si tem sido associado a um aumento na atividade de enzimas relacionadas ao metabolismo do nitrogênio, o que pode melhorar a eficiência de utilização desse nutriente pelas plantas (SHI et al., 2014)

A interação entre o Si e a adubação nitrogenada pode promover benefícios adicionais para o cultivo de café. Estudos têm demonstrado que a aplicação conjunta de Si e N pode resultar em um aumento significativo na produção de biomassa, na taxa fotossintética e na absorção de nutrientes (DETMANN et al., 2012; PARECIDO et al., 2018).

Os mecanismos pelos quais o Si e a adubação nitrogenada interagem no cultivo de café ainda não estão completamente esclarecidos. A aplicação conjunta desses nutrientes pode promover um maior crescimento vegetativo, aumento da eficiência no uso da água, melhoria na absorção de nutrientes e maior qualidade dos grãos. (DETMANN et al., 2012; SHI et al., 2014; PARECIDO et al., 2018).

A falta de estudos relacionados a aplicação de Si, associada com adubação nitrogenada na cultura do café, justificando o presente trabalho, que teve como hipóteses que a aplicação foliar de silício combinada com adubação nitrogenada pode mitigar os efeitos do estresse hídrico em plantas de café, resultando em maior tolerância à seca e melhor desempenho fisiológico. Uma vez que acredita-se que o Si pode atuar em conjunto com do N, melhorando a capacidade de absorção e utilização de nutrientes, fortalecendo as defesas das plantas e aumentando sua resistência à seca. Além disso, espera-se que essa combinação promova um melhor desempenho fisiológico das plantas de café sob condições de déficit hídrico.

Desta forma, objetivou-se com o presente trabalho avaliar a influência da adubação nitrogenada e da aplicação foliar de Si em diferentes condições hídricas no desenvolvimento, trocas gasosas e nutrição da cultura do café arábica.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A cultura do café

O café é uma das bebidas não alcoólicas mais utilizadas e seu consumo está se espalhando globalmente. É o maior produto de exportação de cerca de 60 países tropicais e subtropicais, sendo a segunda mercadoria mais importante negociada nos mercados mundiais (HAILE; KANG, 2019). A Etiópia é a origem do café arábica e, como tal, tem uma longa tradição de torrar e beber esta bebida profundamente cultural. O Brasil é o principal produtor e exportador de café arábica, seguido pela Indonésia, Etiópia, Filipinas, México, Vietnã e 40 outros países (OLIVEIRA et al., 2012; HAILE; KANG, 2019).

O Brasil é o maior produtor mundial, com produção estimada em 54.742,9 mil sacas beneficiadas em 2023, um aumento de 7,5% ao ano anterior. A área destinada para plantação de café está estimada em 1,87 milhões de hectares, sendo que a produtividade média é de aproximadamente 29 sacas beneficiadas ha⁻¹. Os estados brasileiros que se destacam na produção dessa espécie são Minas Gerais, Espírito Santo, São Paulo, e Bahia. (CONAB, 2023).

O café (*Coffea arabica* L.) pertence à família Rubiaceae, e o gênero *Coffea* é cultivado principalmente em regiões subtropicais e tropicais e consiste de 90 a 124 espécies (DAVIS, 2011; HAILE; KANG, 2019). A planta de café é caracterizada por suas folhas brilhantes, flores brancas e frutos vermelhos ou cerejas, dentro dos quais estão os grãos de café (OLIVEIRA et al., 2012). *Coffea canephora* Pierre e *Coffea arabica* L. são as duas únicas espécies economicamente importantes e amplamente cultivadas em todo o mundo.

O cafeeiro arábica é uma planta tropical de altitude, adaptada ao clima úmido com temperaturas amenas. As condições favoráveis para o cultivo são em regiões com temperatura média entre 18 e 22°C e com índice pluviométrico anual entre 1.200 mm e 1.800 mm, e distribuição regular de chuvas. Quanto à deficiência hídrica anual, o cafeeiro suporta bem o limite máximo de 150 mm, principalmente se esta coincide com o período de dormência da planta, porém, não se estendendo até a fase de floração e início da frutificação (THOMAZIELLO et al., 2000).

2.2 Estresse hídrico e seus efeitos no cafeeiro

A espécie *Coffea arabica* L. encontra no Brasil grandes áreas adequadas para seu cultivo, no entanto, com a expansão de áreas devido a importância econômica da cultura, a cafeicultura tem chegado em locais com limitações hídricas, má distribuição das chuvas ao longo do ano, além de temperaturas mais elevadas, que, coincidindo com períodos de frutificação, limitam a produtividade dos cafezais (SILVA; MAZZAFERA, 2008)

O café é uma cultura agrícola suscetível a diversos estresses abióticos, sendo o estresse hídrico um dos mais significativos e desafiadores para o cultivo (CASTRO; PEREIRA; PAIVA, 2009). Segundo DAMATTA e RAMALHO (2006), períodos de seca prolongada, a produtividade pode ser reduzida em até 80%, caso não seja adotada a irrigação.

Nos vegetais em geral a água constitui cerca de 80 a 95% da massa de tecidos vegetais em crescimento (TAIZ et al., 2017). A água participa dos processos fisiológicos das plantas, entre eles das reações de fotossíntese e respiração; dos transportes de materiais e nutrientes através do xilema e floema; absorção de gases e materiais através do filme que estabelece raiz/solo; garante a turgidez de tecidos e órgãos; responde pelo controle da condutância estomática (PEIXOTO, 2011).

O solo é o grande armazenador e fornecedor de água às plantas, assim, a quantidade absorvida pelo sistema radicular dependerá da quantidade no solo disponível para planta. A água disponível no solo compreende ao conteúdo entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente. (TAIZ et al., 2017, PAIVA; OLIVEIRA, 2006) À medida que o solo reduz esse conteúdo, torna-se mais difícil a absorção pelas plantas, devido ao aumento da força de retenção da água no solo.

O estresse hídrico ocorre quando as plantas são expostas a condições de escassez de água, resultando em efeitos adversos em seu crescimento, desenvolvimento e produção. Quando as plantas de café são expostas ao estresse hídrico, elas desencadeiam uma série de respostas fisiológicas para mitigar os efeitos negativos. Entre essas respostas, estão o fechamento dos estômatos para reduzir a perda de água por transpiração, a modulação do equilíbrio hormonal, como o aumento na produção de ácido abscísico (ABA), e a ativação de mecanismos de ajuste osmótico, como a acumulação de solutos compatíveis e a síntese de proteínas de resposta ao estresse (ARAUJO et al., 2011).

2.3 O Papel do Silício no Estresse Hídrico

O silício é o segundo elemento mais abundante da crosta terrestre e, apesar de, não ser considerado um elemento essencial às plantas, devido ao fato de não atender aos critérios diretos e indiretos de essencialidade, vem apresentando resultados promissores ao favorecer o crescimento e produção das plantas, principalmente em condições de estresse (KORNDÖRFEER, 2007; LIMA FILHO, 2010; GUNTZER et al., 2012).

O elemento é classificado como benéfico ou útil para algumas espécies vegetais, não sendo considerado necessário para que a planta finalize o ciclo vegetal. Desempenha um papel importante no aumento da resistência e na proteção contra estresses abióticos (KORNDÖRFEER, 2007; LIMA FILHO, 2010). Quando disponível no solo, o silício é absorvido pelas raízes e transportado para os tecidos da planta, onde pode exercer diversos efeitos positivos. Entre os benefícios do silício para as plantas estão a melhoria da resistência ao estresse hídrico, aumento da tolerância a altas temperaturas, maior resistência a doenças e pragas, além do fortalecimento estrutural das células (LIMA FILHO, 2010)

O Si desempenha um papel importante na regulação do balanço hídrico das plantas durante períodos de estresse hídrico. Estudos realizados em diferentes espécies vegetais, incluindo plantas de interesse agrônomo, como arroz, trigo, milho e soja, têm demonstrado os efeitos benéficos do silício na tolerância ao estresse hídrico (MAUAD, 2006; HATTORI et al., 2005; GONG et al., 2005).

Hattori et al., (2005) observaram que as plantas de sorgo de sob estresse hídrico com Si apresentaram maior taxa fotossíntese, comparadas as plantas sem Si sob condições de seca. Bezerra (2015), relatou os benefícios potenciais do Si no favorecimento do desenvolvimento morfológico da cana-de-açúcar, conferindo maior número de folhas totais e comprimento de plantas na fase de máximo desenvolvimento, sob estresse hídrico.

Os mecanismos pelos quais o Si exerce seus efeitos positivos na tolerância ao estresse hídrico são diversos e complexos. Uma das principais formas pelas quais o silício atua é por meio do fortalecimento da estrutura celular das plantas. O silício depositado nas células das folhas e caules forma uma camada rígida, conhecida

como opala, que aumenta a resistência mecânica das plantas, reduzindo a perda de água e a taxa de transpiração (KORNDÖRFER, 2007; TAIZ et al., 2017).

Além disso, o Si também está envolvido na regulação da abertura estomática. Segundo Corrêa (2019) a aplicação de Si pode promover o fechamento estomático adequado, reduzindo a perda de água por transpiração excessiva. Estômatos são estruturas presentes nas folhas que controlam a troca gasosa entre as plantas e o ambiente. Sob condições de estresse hídrico, as plantas tendem a fechar seus estômatos para reduzir a perda de água por transpiração. O Si tem demonstrado regular a abertura estomática, aumentando a eficiência no uso da água pelas plantas sob condições de estresse.

Outro mecanismo importante pelo qual o silício melhora a tolerância ao estresse hídrico é a sua capacidade de estimular a produção de substâncias antioxidantes nas plantas. O estresse hídrico induz a formação de espécies reativas de oxigênio, que podem causar danos às células vegetais. O Si tem sido associado ao aumento da atividade de enzimas antioxidantes, como superóxido dismutase, catalase e peroxidase, que ajudam a proteger as plantas contra os danos oxidativos causados pelo estresse hídrico (MENEGALE, 2012).

Em condições estressantes observa-se que o Si atua no aumento da biossíntese de clorofila e manutenção da fotossíntese (ADREES et al., 2015), isso devido ao aumento na atividade de enzimas relacionadas ao metabolismo do nitrogênio (SHI et al., 2014). Além disso, plantas que recebem aplicações de Si durante seu desenvolvimento, apresentam melhor absorção de micronutrientes como Zn, Fe e Mn e macronutrientes Ca, Mg, P e K, mesmo em condições de déficit, permitindo dessa forma, a manutenção do crescimento vegetal (ADREES et al., 2015; KELLER et al., 2015). Feng et al., (2010), observaram que o suprimento de Si diminuiu os efeitos limitantes do estresse no metabolismo de nitrogênio das plantas, aumentando o crescimento e biomassa das plantas.

2.4 Adubação nitrogenada no cultivo de café

A adubação nitrogenada desempenha um papel fundamental nas plantas, sendo uma prática amplamente utilizada para promover o crescimento, desenvolvimento e produtividade das plantas.

O nitrogênio (N) é um dos nutrientes essenciais e desempenha um papel crítico na fisiologia das plantas. Ele está envolvido na produção de clorofila, que é essencial para a fotossíntese e a produção de energia. Além disso, o nitrogênio é um componente chave das proteínas, enzimas e aminoácidos, que são fundamentais para o crescimento e a formação dos tecidos vegetais (TAIZ et al., 2017; SUN et al., 2020).

A adubação nitrogenada proporciona uma série de benefícios no cultivo de café. Em primeiro lugar, a aplicação de nitrogênio em quantidades adequadas promove um crescimento vegetativo vigoroso, resultando em plantas mais altas, com maior número de ramos e folhas (CLEMENTE et al., 2013; SAKIYAMA et al., 2015). Isso contribui para uma maior área foliar, aumentando assim a capacidade de absorção de luz e, conseqüentemente, a taxa fotossintética.

A taxa fotossintética mais elevada, decorrente da adubação nitrogenada, resulta em maior produção de carboidratos, que são essenciais para a formação dos frutos de café. O nitrogênio também está envolvido na síntese de compostos relacionados à qualidade dos grãos, como açúcares, aminoácidos e compostos voláteis que conferem aroma e sabor característicos ao café (CLEMENTE et al., 2013; SUN et al., 2020).

Além dos benefícios diretos sobre o crescimento e a produção, a adubação nitrogenada também desempenha um papel fundamental na sustentabilidade do cultivo de café. A fertilização com nitrogênio pode melhorar a eficiência no uso da água pelas plantas, resultando em menor consumo de água e reduzindo os riscos de estresse hídrico (SANTOS & CARLESSO, 1998).

No entanto, é importante destacar que a adubação nitrogenada requer um manejo cuidadoso para evitar possíveis problemas. O uso excessivo de nitrogênio pode levar a efeitos negativos, como o crescimento excessivo de ramos vegetativos em detrimento da produção de frutos e a redução na qualidade dos grãos (GALLO et al., 1999). Além disso, o nitrogênio pode ser facilmente lixiviado. Segundo Sangoi et al. (2003), o principal processo de perda de N do solo é a lixiviação, principalmente na forma de nitrato. Desta maneira, recomenda-se o parcelamento das aplicações das adubações nitrogenadas, com intuito de reduzir as perdas do N, assegurando maior disponibilidade às plantas, quando estas atingem estádios máximos de absorção (MATIELLO et al., 2010).

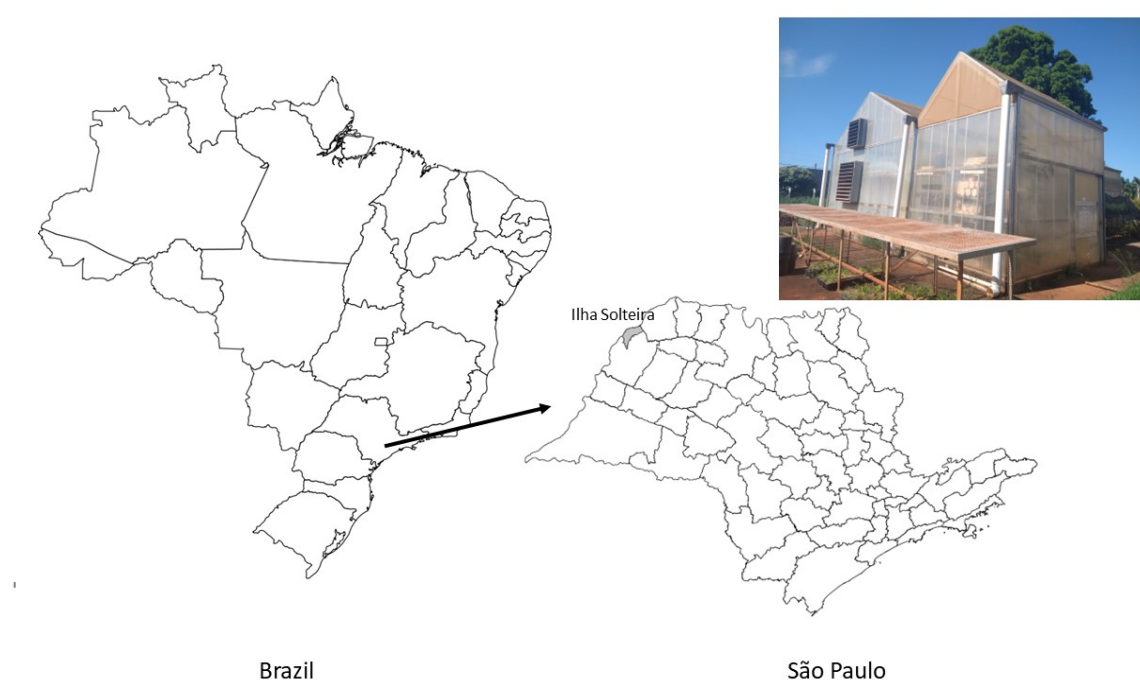
Portanto, é essencial adotar estratégias de manejo adequadas para a adubação nitrogenada no cultivo de café, segundo Matiello et al., (2010), para cafeeiros jovens, no pós-plantio e nos dois primeiros anos de campo, recomenda-se adubações nitrogenadas em cobertura, sob a copa das plantas jovens e com o solo úmido, sendo recomendado parcelar entre três a quatro vezes a adubação com N, aplicando-se de 30-60 g por planta ou metro de linha em cada parcela.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local do Experimento

O experimento foi realizado em casa de vegetação tipo Pad e Fan, com controle de temperatura, na UNESP de Ilha Solteira - SP, localizada a 20°43'09" S e 51°33'79" O e altitude de 335 metros (Figura 1), no período do dia 05 de janeiro 2021 à 20 de janeiro de 2022.

Figura 1 – Local onde o experimento foi realizado.



Fonte: Própria autora

3.2 Delineamento Experimental e tratamentos

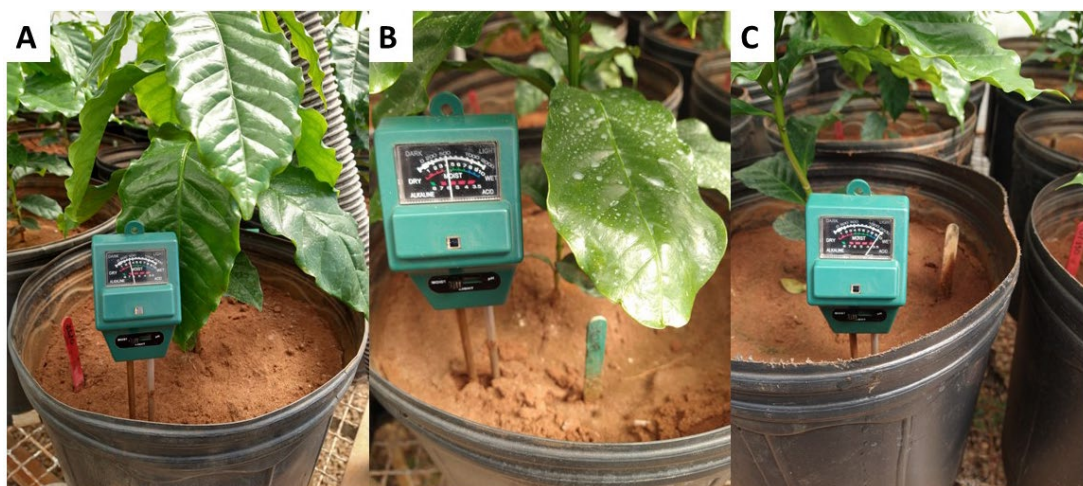
O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, em esquema fatorial 4 x 4 x 3, com 3 blocos, constituídos por quatro doses de nitrogênio (0, 100, 200 e 400 kg ha⁻¹), quatro doses de silício (0, 400, 600 e 800 mg L⁻¹) e três condições hídricas (30, 50, e 100% da capacidade de campo (CC)).

Para adubação nitrogenada foi utilizado ureia, que contém 45% de N, enquanto que a fonte utilizada para aplicação do Si foi o silicato de cálcio (85% de SiO₂ e 15% de CaO).

Para determinação da CC do substrato, os vasos foram sobrepostos em bancada e posteriormente saturados com água e cobertos com sacos de polietileno,

para evitar a evaporação e deixados em repouso, por um período não inferior a 20 horas, até a estabilização mais aproximada à CC. Todos os dias era verificada necessidade hídrica dos vasos, as leituras eram realizadas com auxílio de um medidor de umidade do solo, que varia de 0 (dry) a 10 (wet) (Figura 2), determinado o manejo da irrigação para cada vaso.

Figura 2 – Medidor de umidade nas três condições hídricas (30, 50 e 100% CC)



Fonte: Própria autora

3.3 Instalação e Condução do Experimento

Os vasos de polietileno foram preenchidos igualmente com 15 kg de substrato, sendo esse à base de solo (Latossolo Vermelho distrófico), da camada de 0 a 0,20 m. Com base na análise química (Tabela 1) do solo não houve a necessidade de aplicar calcário, e para adubação de base foi utilizado o equivalente a 400 kg de 8-28-16.

Tabela 1 – Características químicas do solo utilizado no experimento, 0.0-0.20 m, proveniente da Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da UNESP, Selvíria, MS. 2020

P resina	M.O	pH	K	Ca	Mg	H+Al	Al	CTC	V
mg/dm ³	g/dm ³	(CaCl ₂)				mmolc/dm ³			(%)
4	18	5,1	1,1	11	9	16	0	37,1	57

Fonte: Própria autora

A cultivar de café utilizada foi a IPR 100, que apresenta adaptação ao calor/seca e a solos menos férteis. As mudas foram adquiridas junto à cooperativa Camda em Adamantina, SP e estavam com 5 a 6 pares de folhas.

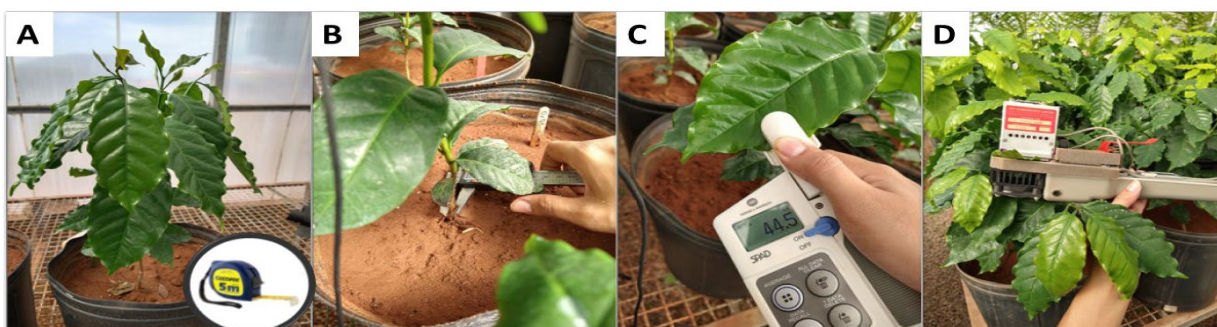
O transplante das mudas ocorreu em 05/01/2021, deixando uma muda por vaso. Com 30 dias após o transplante (DAT) iniciou-se a diferenciação da condição hídrica do solo. A adubação nitrogenada foi realizada uma única vez, de forma manual aos 35 DAT, distribuindo-se uniformemente as doses do fertilizante nos vasos. O Si foi aplicado com um borrifador spray, via foliar nas plantas aos 35 DAT e parcelado igualmente em 4 aplicações que foram realizadas a cada 60 dias. Para o balanceamento de Cálcio (Ca) foi utilizado o óxido de cálcio com intuito de que a concentração deste nutriente fosse igual nas plantas e proporcionasse a mesma condição nutricional para as plantas.

Além dos tratamentos, foi aplicada no solo a solução nutritiva Hoagland e Arnon (1950), sem o nitrogênio, em todos os vasos para complementar a necessidade nutricional das plantas. Para o manejo fitossanitário foram utilizados os seguintes produtos: deltametrina, para o controle da praga *Leucoptera coffeella*, e Piraclostrobina + Epixiconazol e Piraclostrobina para o controle da doença *Phoma* spp.

3.4 Descrição das variáveis analisadas

Uma vez por mês a partir dos 45 DAT, foram realizadas medições da altura das plantas com uso de régua milimétrica, do diâmetro do caule principal, que foi determinado com auxílio de paquímetro digital a 5 cm do solo, e eram realizados ainda as leituras do índice de clorofila foliar com clorofilômetro portátil SPAD-502 (Soil Plant Analysis Development), desenvolvido pela Minolta. As leituras foram realizadas em todas as plantas utilizando como referência a última folha completamente exposta do ramo ortotrópico, entre as 9:00 h e 11:00 h (Figura 3).

Figura 3 – Avaliação de (A) altura de plantas, (B) diâmetro do caule, (C) índice SPAD e (D) trocas gasosas em plantas de café arábica



Fonte: Própria autora

A área foliar foi estimada por meio da equação $AF = 0.667 \times C \times L$ (BARROS et al. 1973), em que AF é a área foliar, em cm^2 ; C é o maior comprimento da folha, em cm; L é a maior largura da folha, em cm. A avaliação foi realizada aos 135 e 305 DAT, e as medidas foram realizadas no segundo par de folhas do ramo plagiotrópico.

As medições das trocas gasosas (Infra Red Gas Analyser – IRGA) foram realizadas utilizando-se o equipamento LC-Pro da ADC - Bioscientific Ltd. (Figura 3 D), sendo as condições inicialmente impostas para realização das medidas de $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de radiação fotossinteticamente ativa. A avaliação foi realizada no terceiro par de folhas do ramo plagiotrópico da região mediana da planta, entre as 9:00 h e 12:00 h, obtendo-se os valores de fotossíntese líquida (A), transpiração (E), condutância estomática (gs) e concentração interna de CO_2 (C_i). A eficiência no uso da água (EUA) foi calculada pela razão A/E.

A análise nutricional do cafeeiro foi realizada, em janeiro de 2022, por meio de coleta de folhas, ramos e caule, no sentido de verificar o efeito dos tratamentos estudados na concentração de nutrientes. Após a coleta, o material vegetal foi submetido à secagem em estufa com circulação e renovação de ar, moído e encaminhado ao laboratório para análise foliar, onde seguiram as metodologias relatadas pela Embrapa, (1999) e Malavolta et al. (1997) para a determinação do nitrogênio, fósforo e potássio. Para determinação dos teores de Si foi seguido a metodologia da Embrapa (1999).

3.5 Análise estatística

Todas as análises foram realizadas pelo software R versão 4.0.2. (R Development Core Team, 2019). Para as análises de variância foi utilizado o pacote ExpDes.pt (FERREIRA et al., 2021), para os gráficos de regressão, o pacote ggplot2 (WICKHAM, 2016) e para agrupamento dos gráficos o pacote ggpubr (KASSAMBARA, 2020). Para a análise de correlação e a imagem de rede de correlação foi utilizado os pacotes ggally (SCHLOERKE et al. 2021) e qgraph (EPSKAMP et al., 2012).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Altura de plantas e diâmetro do caule

As diferentes condições hídricas apresentaram diferenças significativas a partir da segunda avaliação, aos 72 DAT para altura das plantas e diâmetro do caule, enquanto que as doses de N o efeito foi aos 286 e 305 DAT para diâmetro do caule, as doses de Si não apresentaram efeito significativo, em nenhuma época de avaliação (Tabela 2 e 3).

Tabela 2 – Análise de variância para altura de plantas de café arábica aos 45, 72, 105, 134, 168, 224, 255, 286 e 305 DAT (dias após o transplante), submetidas as diferentes condições hídricas (CH), a doses de nitrogênio no solo (N) e de silício foliar (Si)

FV	GL	Quadrado Médio								
		45 DAT	72 DAT	105 DAT	134 DAT	168 DAT	224 DAT	255 DAT	286 DAT	305 DAT
Bloco	2	80,13**	384,49**	354,01**	270,36**	250,09**	213,14**	167,22**	73,45*	81,50*
CH	2	3,92	99,63**	422,22**	633,12**	709,73**	777,91**	975,27**	113,29**	916,19**
N	3	1,06	20,8	20,24	29,75	34,39	38,59	41,07	29,98	33,21
Si	3	3,21	1,63	27,14	41,10	28,39	28,43	25,7	39,12	39,33
CH*N	6	16,64	30,39	45,54	55,48	49,01	49,66*	54,92*	40,20	50,43
CH*Si	6	29,34*	22,80	25,07	33,6	33,87	32,63	33,11	40,60	48,79
N*Si	9	2,68	4,51	15,49	21,05	22,72	19,41	14,55	25,08	26,84
CH*N*Si	18	13,68	21,67	29,32	33,32	27,60	24,10	20,56	27,28	24,29
CV(%)		11,99	10,84	11,25	11,66	10,60	9,88	9,18	8,49	8,65

**, * significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F

Fonte: Própria autora

As condições hídricas desempenham um papel crucial no desenvolvimento e altura das plantas de café (Figura 4). A água é essencial para a fotossíntese, transporte de nutrientes e crescimento das plantas (TAIZ et al., 2017). A disponibilidade adequada de água é essencial para o crescimento saudável das plantas e quando há falta de água, as plantas podem enfrentar estresse hídrico, resultando em um crescimento mais lento e menor altura.

Tabela 3 – Análise de variância para diâmetro do caule da planta de café arábica aos 45, 72, 105, 134, 168, 224, 255, 286 e 305 DAT (dias após o transplante), submetidas as diferentes condições hídricas (CH), a doses de nitrogênio no solo (N) e da aplicação foliar de silício (Si)

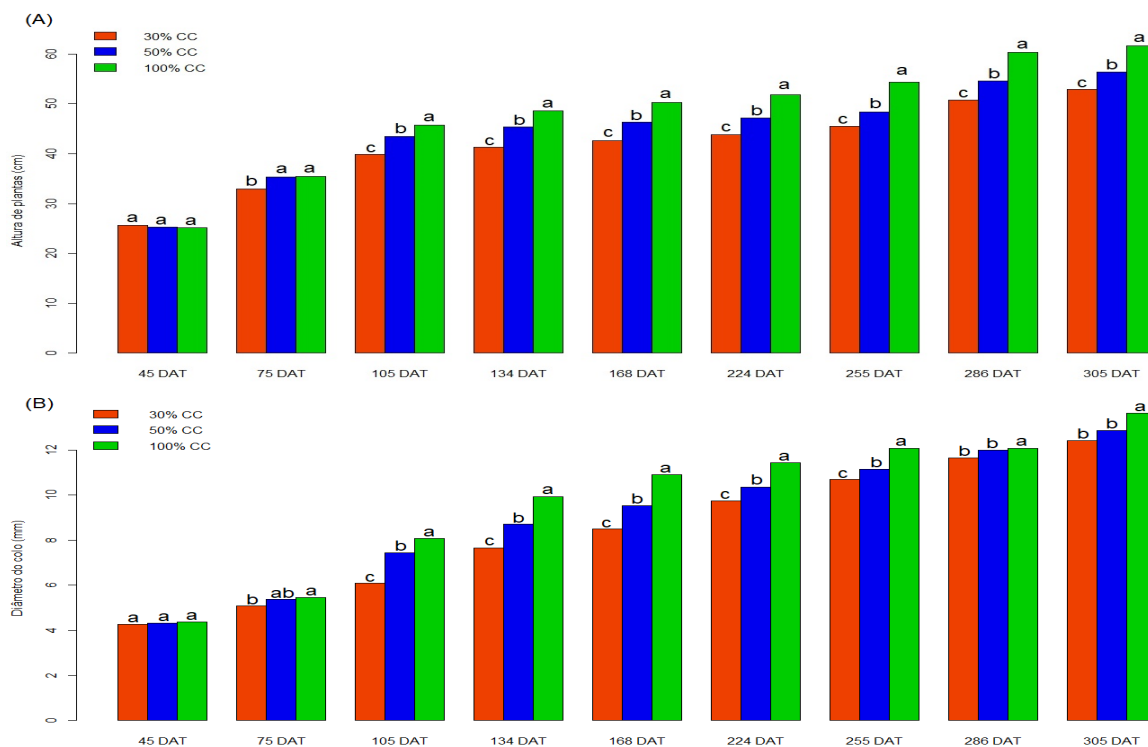
FV	GL	Quadrado Médio								
		45 DAT	72 DAT	105 DAT	134 DAT	168 DAT	224 DAT	255 DAT	286 DAT	305 DAT
Bloco	2	6,59**	11,10**	34,99**	32,70**	9,86**	4,95**	3,04*	2,62	2,53
CH	2	0,12	1,91*	19,75**	62,40**	68,72**	34,99**	23,49**	14,45**	17,87**
N	3	0,66	0,49	0,84	0,25	1,52	1,01	1,82	5,44**	5,31**
Si	3	0,70	0,71	0,23	0,95	1,96	0,71	0,95	0,51	1,42
CH*N	6	0,39	0,67	1,32*	0,58	0,52	0,96	1,70	1,76	1,83
CH*Si	6	0,64*	0,79	0,38	0,40	0,84	0,42	0,56	0,99	1,00
N*Si	9	0,18	0,24	0,63	0,26	0,75	0,33	0,46	0,95	0,84
CH*N*Si	18	0,30	0,28	0,34	0,71	0,62	0,46	0,85	1,11	1,21
CV(%)		12,06	12,39	10,26	10,26	11,18	8,42	8,14	9,18	8,76

**, * significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F

Fonte: Própria autora

As doses de nitrogênio (N) não apresentaram efeito significativo para altura de plantas, para o diâmetro do colo o efeito foi observado apenas aos 286 e 305 DAT ($p > 0,01$). As doses de silício (Si) não apresentaram efeito significativo para altura e diâmetro do colo das mudas de café, em nenhuma época de avaliação. Houve interação entre CH x N aos 224 e 255 DAT para altura de plantas e aos 105 DAT para o diâmetro do caule ($p > 0,05$) e da CH x Si apenas na primeira avaliação, aos 45 DAT ($p > 0,05$), para as duas variáveis.

Figura 4 – Médias da altura (A) e diâmetro do caule (B) de mudas de café arábica aos 45, 72, 105, 134, 168, 224, 255, 286 e 305 DAT (dias após o transplante), submetidas as diferentes condições hídricas (30%, 50% e 100% da capacidade de campo)



Fonte: Própria autora

Em uma condição inicial de estresse hídrico (45 DAT), a dose de 600 mg L⁻¹ de Si foliar contribuiu para incremento na altura das plantas, onde as plantas com 30% CC apresentaram alturas maiores que as com 100% CC, diferença de 19,67% (Tabela 4), para o diâmetro do caule apenas foi observado diferenças com a dose de 400 mg L⁻¹ de Si, onde o maior nível de água no solo, 100% CC, propiciou maior incremento no diâmetro do caulinar (Tabela 5).

Com 50% CC é possível observar um efeito polinomial quadrático no diâmetro do caule, para as doses de Si, onde a dose de 375 mg L⁻¹ proporcional a menor espessura de diâmetro. De acordo com Hattori et al. (2005), embora o Si seja elemento abundante na natureza, sua disponibilidade para plantas em solução do solo é geralmente baixa, portanto, sua captação é reduzida, especialmente para dicotiledôneas, contudo no presente trabalho a que aplicação de Si foliar em condições de estresse hídrico mostrou respostas no crescimento em altura nas

mudas de café, esse resultado mostra a necessidade de mais estudos com aplicação de Si, principalmente em plantas que são consideradas não acumuladores de silício.

Tabela 4 – Desdobramento de Condições hídricas com doses de Silício para altura de plantas de café arábica aos 45 DAT (dias após o transplante)

Doses de Si (mg L ⁻¹)	Condições hídricas		
	30%	50%	100%
0	24,54 a	25,58 a	25,91 a
400	25,41 a	24,08 a	26,25 a
600	27,62 a	24,79 ab	23,08 b
800	25,29 a	26,79 a	25,41 a
p>F (linear)	-	-	-
p>F (quadrática)	-	-	-

Médias seguidas da mesma letra na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Própria autora

Tabela 5 – Desdobramento de Condições hídricas com doses de silício para diâmetro do caule de plantas de café arábica aos 45 DAT (dias após o transplante)

Doses de Si (mg L ⁻¹)	Condições hídricas		
	30%	50%	100%
0	4,19 a	4,24 a	4,35 a
400	4,02 b	4,14 ab	4,60 a
600	4,49 a	4,17 a	4,08 a
800	4,40 a	4,71 a	4,49 a
p>F (linear)	-	0,072	-
p>F (quadrática)	-	0,020(1)	-

Médias seguidas da mesma letra na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a nível de 5% de probabilidade. (1) $y = 0,000002x^2 - 0,0015x + 4,2541$ ($R^2 = 0,922$).

Fonte: Própria autora

No tratamento que não recebeu N observou-se maior diâmetro do caule das mudas de café sem estresse hídrico (100% CC) que teve incremento de 32,3% no diâmetro comparado ao maior estresse hídrico (30%). Com 100% CC há uma diminuição no diâmetro do caule com as doses crescentes de N (Tabela 6), pois em um ambiente com boa disponibilidade hídrica e de N, a planta tende a crescer mais em altura e menos no diâmetro.

Tabela 6 – Desdobramento de Condições hídricas com doses de nitrogênio para diâmetro do caule de plantas de café arábica aos 105 DAT (dias após o transplante)

Doses de N (kg ha ⁻¹)	Condições hídricas		
	30%	50%	100%
0	6,57 c	7,68 b	8,69 a
100	7,18 b	7,31 ab	7,97 a
200	6,85 b	7,22 ab	7,84 a
400	6,60 b	7,60 a	7,84 a
p>F (linear)	-	-	0,018(1)
p>F (quadrática)	-	-	0,052

Médias seguidas da mesma letra na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a nível de 5% de probabilidade. (1) $y=-0,0017x+8,403$ ($R^2=0,571$)

Fonte: Própria autora

Sem a aplicação de N, a altura das plantas apresenta diferenças entre os três níveis de água no solo, tendo um ganho de 24,1% na capacidade de 100% comparado a 30%. Com a dose equivalente a 400 kg ha⁻¹ não houve diferenças entre 50 e 100% da CC, aos 224 DAT (Tabela 7), que foram os que proporcionaram maior incremento na altura das plantas. Com 30% CC, as doses de N apresentaram um efeito polinomial quadrático, com altura máxima das plantas de café com a dose de 230 kg ha⁻¹ de N.

Tabela 7 – Desdobramento de Condições hídricas com doses de nitrogênio para altura de plantas de café arábica aos 224 DAT (dias após o transplante)

Doses de N (kg ha ⁻¹)	Condições hídricas		
	30%	50%	100%
0	41,16 c	46,33 b	51,08 a
100	46,87 b	46,12 b	51,45 a
200	45,20 b	46,58 ab	51,08 a
400	42,20 b	49,62 a	53,87 a
p>F (linear)	0,818	-	-
p>F (quadrática)	0,004(1)	-	-

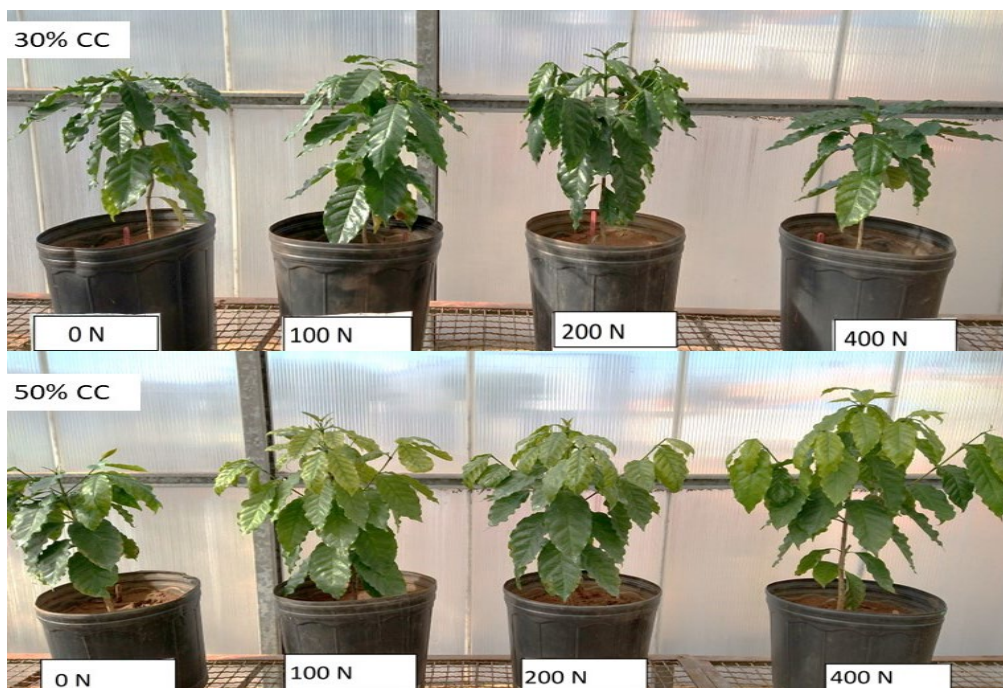
Médias seguidas da mesma letra na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a nível de 5% de probabilidade. (1) $y=-0,0001x^2+0,0460x+41,7792$ ($R^2=0,780$)

Fonte: Própria autora

Aos 255 DAT, o incremento na altura de plantas é observado com a dose de 221 kg ha⁻¹ de N para 30% CC, enquanto que com 50% CC, as doses de N proporcionou aumento na altura das plantas (Figura 5). O fornecimento adequado de N se traduz em efeitos marcantes no desenvolvimento das plantas de café, uma vez que o N contribui para melhoria da eficiência fotossintética, proporcionando aumento

nos teores de clorofila e com isso promovendo maior crescimento das plantas em altura (CLEMENTE et al. 2013).

Figura 5 – Efeito de doses de nitrogênio em plantas de café arábica submetidas a 30 e 50% da capacidade de campo (CC)



Fonte: Própria autora

Com e sem o uso de N, as plantas apresentaram maiores alturas com 100% CC. As plantas que não receberam adubação nitrogenada e a maiores doses, 400 kg ha⁻¹ de N, apresentaram diferenças para as três condições hídricas, onde a menor altura foi com 30% da CC (Tabela 8).

Com a falta da adubação nitrogenada a diferença na altura das plantas está relacionada com disponibilidade hídrica nos vasos. A dose recomendada para o café de 150 kg ha⁻¹ (RAIJ et al., 1997), ou seja, em condições adequadas de N, as plantas respondem bem no crescimento vegetativo, e com o aumento de água disponível no solo esse crescimento pode ser mais acentuado, por isso em condições de 100% CC se tem as maiores alturas de plantas. Agora o excesso de água pode interferir no desenvolvimento das plantas, isso porque em condições de alta disponibilidade de água e excesso de nitrogênio, as plantas de café podem apresentar um crescimento vegetativo acelerado, resultando em uma maior altura da planta (GALLO et al., 1999).

Tabela 8 – Desdobramento de Condições hídricas com doses de nitrogênio para altura de plantas de café arábica aos 255 DAT (dias após o transplante)

Doses de N (kg ha ⁻¹)	Condições hídricas		
	30%	50%	100%
0	42,91 c	47,91 b	53,62 a
100	48,62 b	47,29 b	53,37 a
200	46,70 b	47,83 b	53,54 a
400	43,85 c	50,87 b	56,87 a
p>F (linear)	0,754	0,042(2)	-
p>F (quadrática)	0,004(1)	0,376	-

Médias seguidas da mesma letra na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a nível de 5% de probabilidade. (1) $y=-0,0001x^2+0,0442x+43,567$ ($R^2=0,748$); (2) $y=0,0091x+46,758$ ($R^2=0,843$).

Fonte: Própria autora

4.2 Área Foliar

As condições hídricas e as doses de N apresentaram efeito significativo para área foliar, nas duas épocas de avaliação, 135 e 306 DAT. Para as doses de Si o efeito foi apenas aos 306 DAT ($p>0,01$), assim como a interação entre as doses de Si x N (Tabela 9).

Tabela 9 – Análise de variância da área foliar das mudas de café arábica aos 135 e 306 DAT (dias após o transplante), submetidas as diferentes condições hídricas (CH), doses de nitrogênio no solo (N) e aplicação foliar de silício (Si)

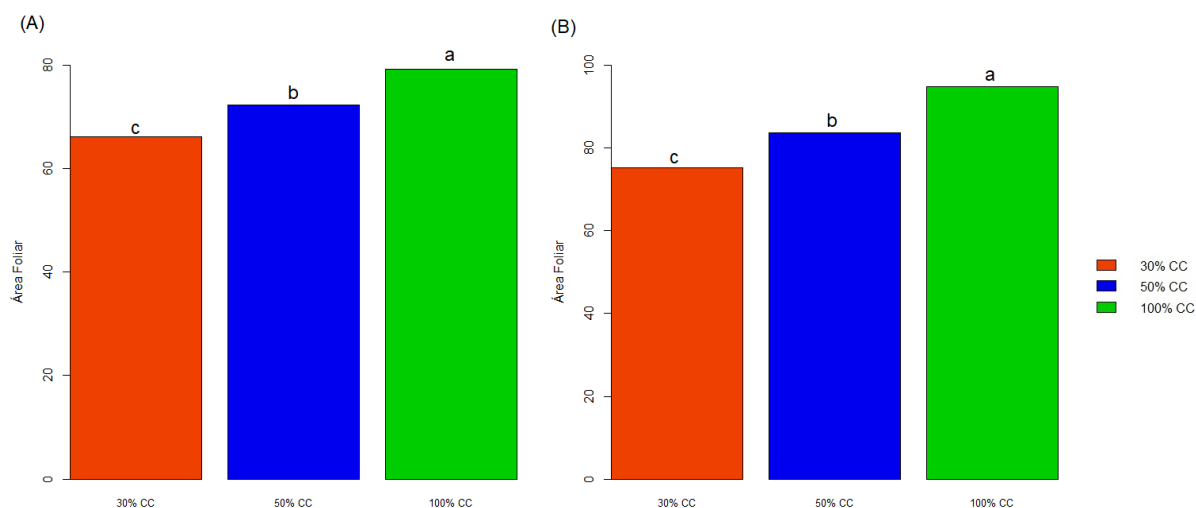
FV	GL	Quadrado médio	
		135 DAT	306 DAT
Bloco	2	2457,96**	1300,69**
CH	2	2051,594**	4698,97**
N	3	346,07*	382,38**
DSi	3	144,13	327,27**
CH*N	6	159,15	82,14
CH*Si	6	60,81	64,91
N*Si	9	150,3	343,63**
CH*N*Si	18	84,77	110,83
CV (%)		13,78	10,17

**, * significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F

Fonte: Própria autora

A área foliar foi significativamente reduzido à medida que se diminuía a disponibilidade hídrica no solo. A menor disponibilidade hídrica, 30% CC, foi a que proporcionou a menor área foliar (Figura 6), com diferença de 19,75 e 26,24%, para 135 e 306 DAT, respectivamente, quando comparadas a 100% CC, que foram as que apresentaram maior área foliar.

Figura 6 – Área foliar (cm²) de mudas de café arábica, aos 135 DAT (A) e 306 DAT (B), em diferentes condições hídricas (30, 50 e 100 % da capacidade de campo (CC))

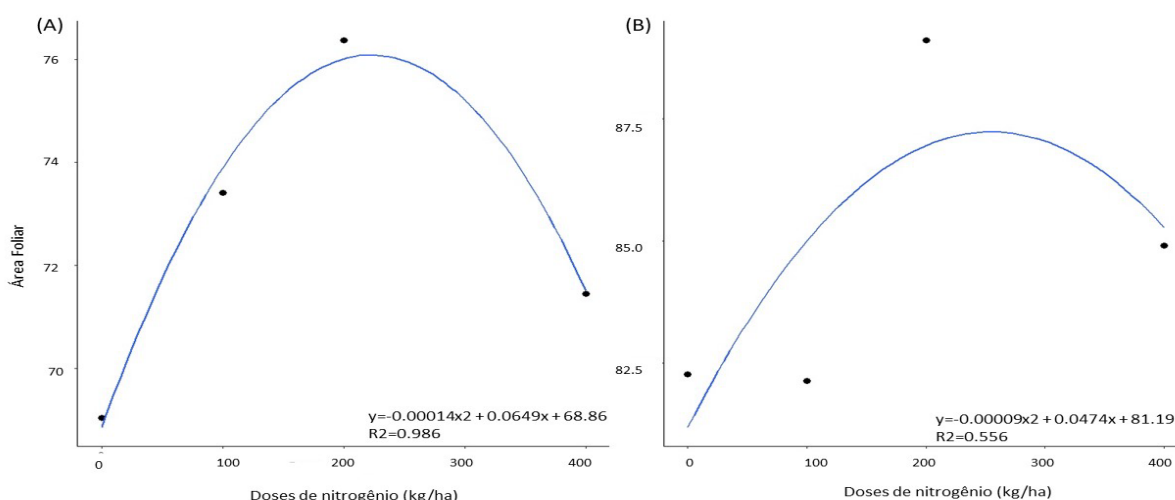


Fonte: Própria autora

Entre as primeiras respostas ao déficit hídrico está a redução no crescimento foliar (TAIZ et al., 2017), o que diminui a intensidade do processo fotossintético, interferindo diretamente na produtividade das plantas. Plantas de café conduzidas com restrição hídrica tiveram menores valores de área foliar em relação às conduzidas sem restrição (RIBEIRO et al., 2017; PELOSO et al., 2017). Como resultado da redução na área foliar, a planta transpira em menor proporção, de modo a evitar a perda de água em excesso, o que confere à planta um mecanismo de defesa frente ao estresse hídrico (BLUM, 2011).

Para as doses de N houve um ajuste polinomial quadrático, onde a maior área foliar foram obtidas com as doses equivalente de 231 e 263 kg ha⁻¹, aos 135 e 306 DAT, respectivamente (Figura 7). A área foliar é uma característica fortemente influenciada pela disponibilidade de N, por estar relacionada com o processo fotossintético, a síntese de proteínas, ácidos nucleicos e constituintes da membrana celular (MALAVOLTA et al., 1997; RIBEIRO et al., 2017).

Figura 7 – Efeito das doses de nitrogênio (kg ha^{-1}), na área foliar (cm^2) de mudas de café arábica aos 135 dias após o transplante (DAT) (A) e aos 306 DAT (B).



Fonte: Própria autora

Sem aplicação de Si a maior área foliar foi obtida com a dose de 233 kg ha^{-1} de N. O maior teor de nitrogênio foliar proporciona maior crescimento e desenvolvimento da planta, contribuindo para um maior índice de área foliar em função da fotossíntese (SILVA et al., 2007). O efeito do nitrogênio na área foliar pode ser potencializado com adição de silício, uma vez que com a dose de 600 mg L^{-1} de Si, a maior área foliar foi com a dose de 185 kg ha^{-1} (Tabela 10).

Tabela 10 – Desdobramento das doses de silício com doses de nitrogênio para área foliar de café arábica aos 306 DAT (dias após o transplante)

Doses de N (kg ha^{-1})	Doses de Si (mg L^{-1})				p>F (linear)	p>F (quadrática)
	0	400	600	800		
0	73,09	86,46	75,95	93,56	-	-
100	80,90	83,78	82,05	81,80	0,079	0,012(3)
200	96,33	82,26	88,89	88,91	-	-
400	81,47	89,07	79,52	89,60	-	-
p>F (linear)	0,691	-	0,987	-		
p>F (quadrática)	0,002(1)	-	0,021(2)	-		

(1) $y = -0,0004x^2 + 0,1865x + 71,22$ ($R^2 = 0,848$); (2) $y = -0,0003x^2 + 0,1113x + 75,26$ ($R^2 = 0,935$);
 (3) $y = 0,000006x^2 - 0,0052x + 80,915$ ($R^2 = 0,976$).

Fonte: Própria autora

A dose equivalente a 100 kg ha^{-1} de N apresentou ajuste quadrático para as doses de Si, só que neste caso a dose de 433 mg L^{-1} de Si proporcionou a menor área foliar. O Si pode influenciar positivamente a absorção, a utilização e a eficiência

do N pelas plantas. Essa interação pode levar a um aumento na área foliar, fortalecimento da estrutura das folhas e redução na perda de nitrogênio, contribuindo para um crescimento saudável e uma melhor resposta das plantas ao nitrogênio disponível (CHEN et al., 2011; GONG et al., 2005; SILVA, 2013) só que há necessidade de mais estudos para chegar a uma dose adequada.

4.3 Índice SPAD

As condições hídricas apresentaram efeito significativo para o índice SPAD a partir de 105 DAT ($p>0,01$), enquanto que para as doses de N houve efeito linear positivo a partir da segunda época de avaliação, aos 72 DAT até os 286 DAT. Para as doses de Si e para a interação entre os fatores estudados não houve efeito significativo para as leituras SPAD (Tabela 11).

Tabela 11 – Análise de variância para leituras SPAD em plantas de café arábica aos 45, 72, 105, 134, 168, 224, 255, 286 e 305 DAT (dias após o transplante), submetidas as diferentes condições hídricas (CH), doses de nitrogênio no solo (N) e aplicação foliar de silício (Si)

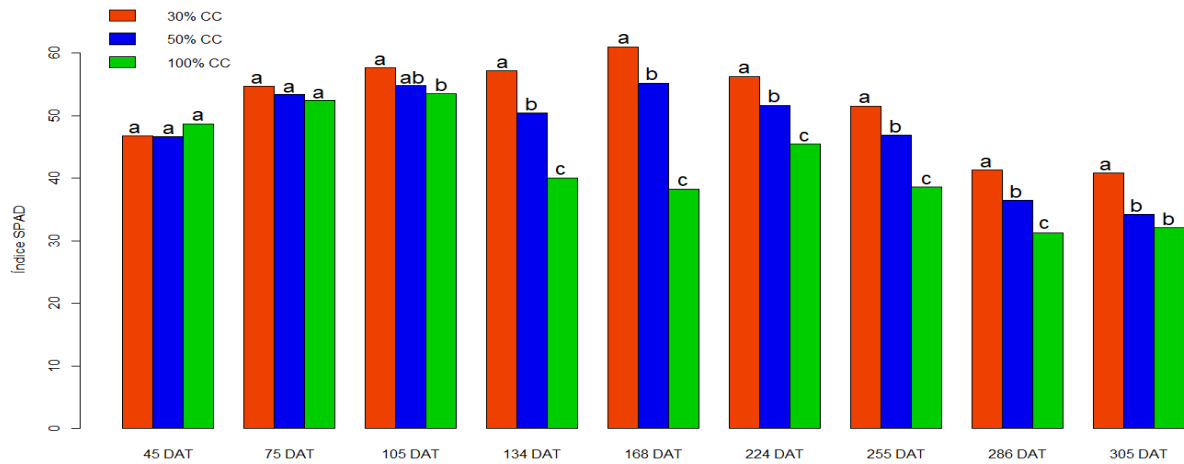
FV	Quadrado Médio								
	45 DAT	72 DAT	105 DAT	134 DAT	168 DAT	224 DAT	255 DAT	286 DAT	305 DAT
Bloco	696,27**	57,38	359,70**	926,74**	1032,37**	856,54**	207,64	40,27	157,47
CH	53,61	57,84	208,66*	3619,11**	6680,10**	1406,12**	2021,45**	1218,83**	989,31**
N	23,28	59,93*	266,02**	664,11**	649,27**	593,03**	262,93*	151,73*	122,76
Si	11,45	14,96	44,46	28,36	92,17	25,67	29,68	25,30	61,29
CH*N	20,60	9,78	73,57	37,23	23,44	17,68	26,01	55,35	36,12
CH*Si	11,74	16,16	48,91	72,15	34,67	63,05	15,05	85,38	60,88
N*Si	20,93	18,63	13,10	120,27	18,62	62,03	60,89	35,82	87,53
CH*N*Si	15,90	34,14	55,02	55,51	97,41	45,44	25,94	78,59	67,09
CV(%)	8,73	8,73	14,01	16,14	20,47	16,36	18,16	18,55	20,26

**, * significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Fonte: Própria autora

O menor nível de água presente no solo foi o que contribuiu para os maiores índices SPAD (Figura 8), a diferença aos 134 DAT era de 43.10%, entre as plantas que estavam com 30% CC para as com 100% CC.

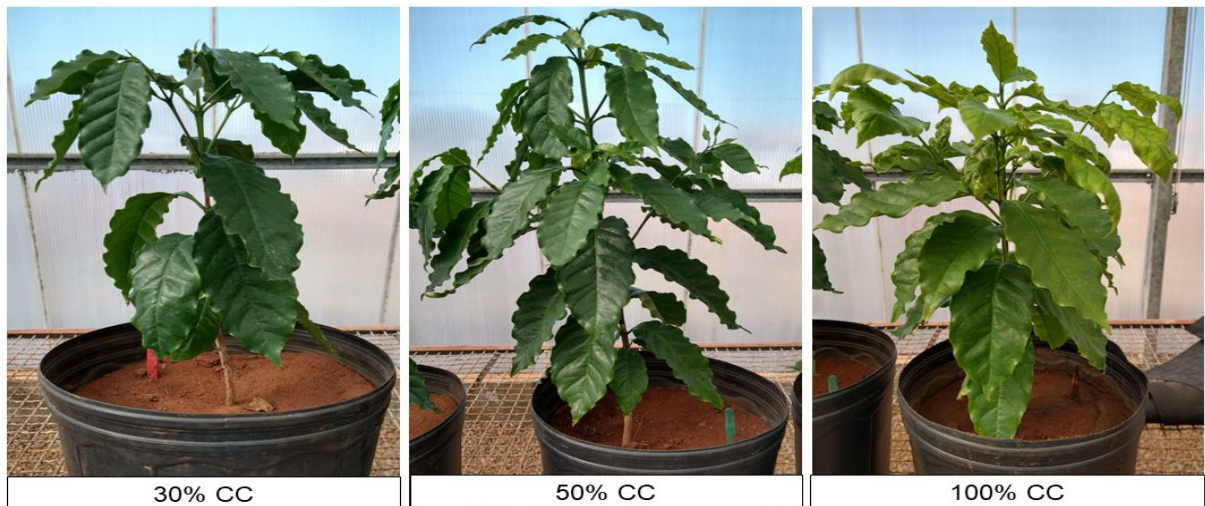
Figura 8 – Médias do índice SPAD de mudas de café arábica aos 45, 72, 105, 134, 168, 224, 255, 286 e 305 DAT (dias após o transplante), submetidas as diferentes condições hídricas (30%, 50% e 100% da capacidade de campo)



Fonte: Própria autora

As plantas que estavam com 100% CC apresentaram maiores altura e maior índice de área foliar, desta forma pode ter ocorrido um efeito de diluição na planta, assim como as plantas que estavam sob déficit hídrica apresentaram redução em seu crescimento, pode ter ocorrido foi a maior concentração de clorofila nas folhas e assim resultando nos maiores índices de SPAD (Figura 9). Segundo diversos autores (SILVEIRA et al., 2003, MAIA JUNIOR et al., 2017) os valores obtidos pelo equipamento são proporcionais ao teor de clorofila total presente na folha.

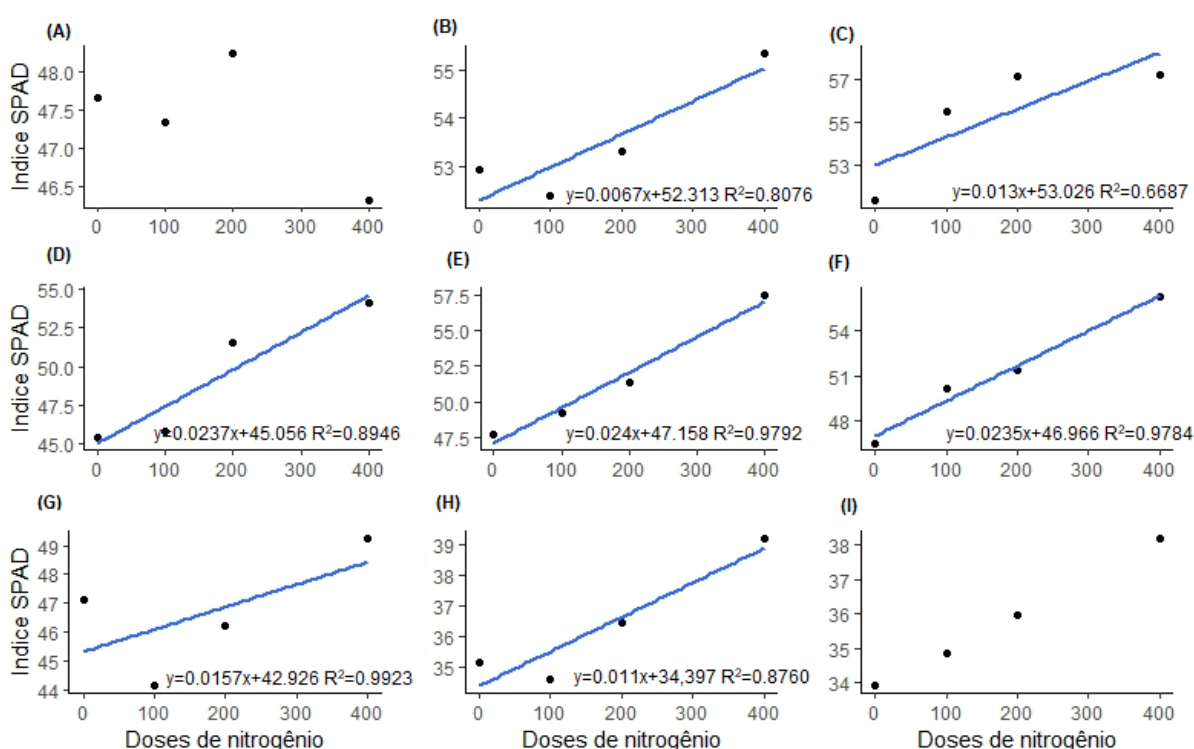
Figura 9 – Efeito das condições hídricas (30, 50 e 100% da Capacidade de campo (CC)), no índice de cor verde de plantas de café arábica.



Fonte: Própria autora

As doses de N contribuíram para um ajuste linear crescente no índice SPAD (Figura 10), o maior índice indica maior quantidade de clorofilas totais e um maior teor de N no limbo foliar. O N é um nutriente que participa da síntese e da estrutura das moléculas de clorofila, de modo que o aumento do suprimento de N às plantas, proporciona incremento no teor de clorofila e intensidade de cor verde nas folhas da planta (FONTES ARÚJO, 2007).

Figura 10 – Efeito das doses de nitrogênio (kg ha^{-1}) no índice SPAD de mudas de arábica aos 45, 72, 105, 134, 168, 224, 255, 286 e 305 DAT (dias após o transplante).



Fonte: Própria autora

4.4 Trocas gasosas

As diferentes condições hídricas no solo (CH) e as doses de nitrogênio (N) apresentaram efeito significativo ($p > 0,01$) para transpiração (E), concentração interna de CO_2 (C_i), condutância estomática (gs) e fotossíntese (A). As doses de silício (Si) foram significativas apenas para E, gs e A ($p > 0,05$). Houve ainda efeito significativa entre os fatores: condições hídricas x doses de N, para E, gs, A e na eficiência no uso da água (EUA) ($p > 0,05$), condições hídricas x doses de Si, para gs,

A, EUA ($p>0,05$), doses de N x doses de Si, E, A e EUA ($p>0,05$) e interação tripla para todas as variáveis (Tabela 12)

Tabela 12 – Análise de variância para concentração interna de CO_2 (Ci), transpiração (E), condutância estomática (gs) e fotossíntese (A), uso e eficiência da água (EUA) aos 310 DAT (dias após o transplante), submetidas as diferentes condições hídricas (CH), doses de nitrogênio no solo (N) e aplicação foliar de silício (Si)

FV	GL	Quadrado médio				
		Ci	E	gs	A	EUA
Bloco	2	2002.27	0.066	0.0002	0.359	3.461
CH	2	14468.31*	0.836**	0.002**	89.960**	53.886**
N	3	4214.24*	0.210**	0.001**	3.952**	2.308
Si	3	1370.63	0.142**	0.001**	2.222**	2.971
CH*N	6	2509.41	0.128**	0.0005**	1.359*	5.122**
CH*Si	6	3213.71	0.0262	0.0004*	1.269*	3.239*
Si*N	9	2266.96	0.061**	0.0001	2.632**	3.232*
CH*N*Si	18	3698.96**	0.110**	0.0004**	1.712**	3.390**
CV (%)		17.77	20.4	36.3	15.92	21.86

**, * significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Fonte: Própria autora

A Ci é considerada variável fisiológica influenciada por fatores ambientais, como disponibilidade hídrica. Um incremento nesta variável pode indicar uma tentativa da planta de escapar do estresse gerado pela competição pelos recursos do ambiente (MATTOS et al., 2013).

Quando as plantas estão sob estresse hídrico, ocorrem fechamento parcial dos estômatos, pequenas aberturas na superfície das folhas, por onde o CO_2 entra na planta e a água é liberada na forma de vapor. Esse fechamento parcial dos estômatos é uma estratégia da planta para conservar água, mas também reduz a disponibilidade de CO_2 para a planta (FAROOQ et al., 2009). Como resultado, a Ci pode aumentar nas folhas das plantas sob estresse hídrico, como é possível observar neste trabalho, onde a Ci é maior nas plantas que foram submetidas a 30% CC (Tabela 13).

Tabela 13 – Desdobramento Condições hídricas X doses de nitrogênio (N) X doses de silício (Si) para concentração interna de CO₂ (Ci) em plantas de café arábica

30% CC						
Doses de N (kg ha ⁻¹)	Doses de Si (mg L ⁻¹)				p>F (linear)	p>F (quadrático)
	0	400	600	800		
0	238,00 a	185,33 b	274,00 a	258,66 a	-	-
100	226,00 a	256,66 a	225,00 ab	211,66 a	-	-
200	245,66 a	254,66 a	241,33 a	258,33 a	-	-
400	205,66 a	235,00 a	200,00 a	252,33 a	-	-
p>F(linear)	-	-	-	-		
p>F (quadrático)	-	-	-	-		
50% CC						
Doses de N (kg ha ⁻¹)	Doses de Si (mg L ⁻¹)				p>F (linear)	p>F (quadrático)
	0	400	600	800		
0	236,66 a	265,66 a	245,00 ab	220,66 a	-	-
100	183,66 a	197,00 a	165,33 b	258,00 a	-	-
200	207,00 a	177,33 b	234,66 a	195,33 a	-	-
400	210,33 a	232,00 a	210,66 a	122,00 b	0,017	0,005(3)
p>F(linear)	-	0,481	-	0,001(2)		
p>F (quadrático)	-	0,004(1)	-	0,113		
100% CC						
Doses de N (kg ha ⁻¹)	Doses de Si (mg L ⁻¹)				p>F (linear)	p>F (quadrático)
	0	400	600	800		
0	236,66 a	179,66 b	177,33 b	201,66 a	-	-
100	197,33 a	207,00 a	257,33 a	205,00 a	-	-
200	259,66 a	172,00 b	191,66 a	206,00 a	0,064	0,032(4)
400	248,66 a	176,66 a	172,66 a	148,00 b	0,001(5)	0,525
p>F(linear)	-	-	-	-		
p>F (quadrático)	-	-	-	-		

Médias seguidas da mesma letra nas condições hídricas, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a nível de 5% de probabilidade. (1) $y=0,0018x^2-0,8184x+264,22$ ($R^2=0.994$); (2) $y=-0,2929x+250,26$ ($R^2=0.759$); (3) $y=-0,0005x^2+0,2563x+209,08$ ($R^2 = 0.976$); (4) $y=0,0003x^2-0,3322x+258,36$ ($R^2 = 0.956$); (5) $y=-0,1229x+241,82$ ($R^2 = 0.938$).

Fonte: Própria autora

As plantas que foram submetidas a 50% CC, apresentaram efeito quadrático para as doses de 400 mg L⁻¹ de Si, onde a dose equivalente a 227 kg ha⁻¹ de N proporcionou a menor concentração interna de CO₂. Para a dose de 800 mg L⁻¹ de Si o efeito foi linear, onde é possível observar que a Ci diminuiu com o aumento nas doses de N. Com a maior dose de N, 400 kg ha⁻¹, há efeito polinomial quadrático para as doses de Si, onde a maior Ci é com a dose de 256 mg L⁻¹, isso com 50% CC, com o aumento na disponibilidade hídrica (100% CC) é possível observar que a maior dose da adubação nitrogenada, o efeito foi linear, neste caso a Ci diminuiu com o aumento das doses de Si, e com a dose de 200 kg ha⁻¹ de N e efeito é

quadrático, com o ponto de máxima C_i , equivalente a dose de 554 mg L^{-1} de Si (Tabela 13).

A menor transpiração foliar (E) ocorreu com 30% da CC (Tabela 14), Souza et al., (2020) verificaram que as taxas de transpiração foram significativamente reduzidas sob estresse hídrico, isso porque em condições de ótima disponibilidade hídrica, as plantas normalmente apresentam uma alta taxa transpiratória, por ficarem com os estômatos abertos por mais tempo, de modo que à medida que a água do solo se torna escassa, a planta começa a reduzir sua transpiração, fechando os estômatos, para compensar a perda de água

No estudo realizado por DaMatta et al. (2002), avaliando trocas gasosas, a alta ou baixa disponibilidade de N não afetou a transpiração no tratamento de alta disponibilidade de água. Na menor disponibilidade de água houve menor E dos tratamentos com N, indicando que independentemente da disponibilidade de N, a resposta da transpiração se altera devido a disponibilidade hídrica.

Com 50% CC as doses de 400 e 600 mg L^{-1} de Si promoveram menor E das mudas de café nas doses de 70 e 255 kg ha^{-1} de N, com 800 mg L^{-1} de Si a transpiração das plantas aumentou com as doses de N. Com as plantas submetidas a 100% CC, o efeito observado para a dose de 800 mg L^{-1} de Si também foi linear, só que neste caso a transpiração das plantas diminuiu com as doses de N (Tabela 14). Sem adubação nitrogenada e com a dose equivalente a 100 kg ha^{-1} de N há um efeito semelhante, aonde o menor ponto de transpiração foram com as doses de 275 e 225 mg L^{-1} de Si, respectivamente, isso para as plantas sem restrição hídrica (100% CC).

É possível observar que a maior dose de Si em conjunto com as doses de N foi responsável pela menor transpiração das plantas. A diminuição da E, mesmo em condição de boa disponibilidade hídrica, com a maior dose de Si e as doses de N, pode ter ocorrido devido à formação de uma dupla camada de sílica-cutícula nas folhas (MA; YAMAJI, 2006). A cutícula de sílica pode reduzir a transpiração por dois mecanismos principais. Primeiro, ela cria uma barreira física que dificulta a perda de água pela evaporação através das células epidérmicas, segundo a camada de sílica aumenta a resistência à difusão do vapor de água, reduzindo a taxa de transpiração.

Além disso, o Si também pode influenciar a abertura e o fechamento dos estômatos, incluindo a saída de vapor de água (RAMOS et al., 2013). Em algumas

espécies vegetais, o silício pode promover o fechamento dos estômatos, limitando a perda excessiva de água por transpiração.

Tabela 14 – Desdobramento Condições hídricas X doses de nitrogênio (N) X doses de silício (Si) para Transpiração em plantas de café arábica

Doses de N (kg ha ⁻¹)	30% CC				p>F (linear)	p>F (quadrático)
	0	400	600	800		
0	0,52 b	0,75 a	0,46 c	0,66 b	-	-
100	0,47 a	0,64 a	0,56 a	0,80 b	-	-
200	0,67 a	0,67 a	0,69 a	0,79 a	-	-
400	0,74 a	0,62 b	0,72 a	0,80 b	-	-
p>F (linear)	-	-	-	-		
p>F (quadrático)	-	-	-	-		

Doses de N (kg ha ⁻¹)	50% CC				p>F (linear)	p>F (quadrático)
	0	400	600	800		
0	0,75 ab	0,74 a	1,43 a	0,73 b	-	-
100	0,78 a	0,66 a	0,61a	0,81 b	-	-
200	0,73 a	0,84 a	0,90 a	0,84 a	-	-
400	1,06 a	1,31 a	0,78 a	1,44 a	-	-
p>F (linear)	-	0,001	0,001	0,001(3)		
p>F (quadrático)	-	0,042(1)	0,001(2)	0,051		

Doses de N (kg ha ⁻¹)	100% CC				p>F (linear)	p>F (quadrático)
	0	400	600	800		
0	0,90 a	0,73 a	0,88 b	1,14 a	0,106	0,011(5)
100	0,77 a	0,79 a	0,71 a	1,16 a	0,031	0,019(6)
200	0,80 a	0,83 a	0,80 a	0,93 a	-	-
400	1,01 a	0,86 b	0,87 a	0,74 b	-	-
p>F (linear)	-	-	-	0,001(4)		
p>F (quadrático)	-	-	-	0,788		

Médias seguidas da mesma letra nas condições hídricas, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a nível de 5% de probabilidade. (1) $y=0,000005x^2-0,0007x+0,7217$ ($R^2=0,984$); (2) $y=0,00001x^2-0,0051x+1,3201$ ($R^2 = 0,607$); (3) $y=0,0018x+0,642$ ($R^2 = 0,874$); (4) $y=-0,0011x+1,186$ ($R^2 = 0,910$); (5) $y=0,000002x^2-0,0011x+0,8987$ ($R^2=0,99$); (6) $y=0,000002x^2-0,0009x+0,7861$ ($R^2 = 0,773$).

Fonte: Própria autora

A redução da gs reflete em menor transpiração e, conseqüentemente, menor perda de água pelas plantas, conferindo ao vegetal uma maior resistência aos estresses abióticos (FERREIRA, 2008). A presença de silício pode levar a um fechamento parcial dos estômatos, reduzindo a abertura e, portanto, diminuindo a taxa de transpiração (GAO et al., 2006). Esse efeito do silício na condutância estomática pode ajudar a reduzir a perda de água por transpiração, sendo benéfico em situações de estresse hídrico.

As plantas com 50% CC foram as que proporcionaram maiores valores de g_s , principalmente com as maiores doses de N (200 e 400 kg ha⁻¹) em conjunto com a maior dose de Si (Tabela 15). A condutância estomática em plantas de café está relacionada à abertura e ao fechamento dos estômatos, que regulam a troca gasosa, incluindo a transpiração e a absorção de CO₂ (MATTOS et al., 2013). Os maiores valores de g_s , com as maiores doses de N e Si podem estar relacionado ao fato de que doses excessivas de nitrogênio podem levar a uma abertura excessiva dos estômatos, resultando em uma maior perda de água por transpiração, como pode ser observado na tabela 14, onde as maiores doses de N e Si com 50% CC proporcionaram as maiores E das mudas de café.

A dose de 400 mg L⁻¹ apresentou efeito polinomial quadrático com o aumento das doses de N, onde a dose equivalente a 100 Kg ha⁻¹ de N foi a responsável pela menor g_s , isso quando as plantas estavam submetidas a 50% CC. Com 100% CC foi observado efeito linear para a dose de 800 mg L⁻¹ de Si, onde a condutância estomática diminuiu com o aumento das doses de N. Com a dose de 200 kg ha⁻¹ N, a condutância estomática apresentou menor ponto com a dose de 350 mg L⁻¹ Si, quando as plantas foram submetidas a 50% CC. As plantas em que não passaram por restrição hídrica (100% CC) e que não receberam adubação nitrogenada, também apresentaram efeito quadrático para as doses de Si, onde a dose 250 mg L⁻¹ foi a responsável pela menor condutância estomática (Tabela 15).

Segunda DaMatta et al. (2002) o N não se relaciona com a g_s , independentemente dos tratamentos de disponibilidade hídrica, indicando que adequados níveis de N podem aumentar, diminuir ou não causar efeito sobre g_s , e que essas respostas parecem depender da espécie vegetal.

O cafeeiro é tradicionalmente considerado como uma planta que apresenta valores de taxa fotossintética líquida (A) baixos geralmente entre 4 a 10 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$, que podem variar conforme o tamanho do recipiente em que é cultivado (DAMATTA, 2003).

Tabela 15 – Desdobramento Condições hídricas X doses de nitrogênio (N) X doses de silício (Si) para condutância estomática (gs) em plantas de café arábica

30% CC						
Doses de N (kg ha ⁻¹)	Doses de Si (mg L ⁻¹)				p>F (linear)	p>F (cuadrático)
	0	400	600	800		
0	0,023 a	0,026 a	0,020 b	0,026 b	-	-
100	0,010 a	0,036 a	0,026 a	0,026 a	-	-
200	0,026 a	0,023 a	0,023 a	0,033 b	-	-
400	0,023 a	0,020 b	0,026 a	0,043 b	-	-
p>F(linear)	-	-	-	-		
p>F (cuadrático)	-	-	-	-		
50% CC						
Doses de N (kg ha ⁻¹)	Doses de Si (mg L ⁻¹)				p>F (linear)	p>F (cuadrático)
	0	400	600	800		
0	0,030 a	0,033 a	0,046 a	0,053 a	-	-
100	0,026 a	0,023 a	0,023 a	0,030 a	-	-
200	0,033 a	0,030 a	0,033 a	0,063 a	0,009	0,006(3)
400	0,030 a	0,066 a	0,033 a	0,073 a	-	-
p>F(linear)	-	0,001	-	-		
p>F (cuadrático)	-	0,007(1)	-	-		
100% CC						
Doses de N (kg ha ⁻¹)	Doses de Si (mg L ⁻¹)				p>F (linear)	p>F (cuadrático)
	0	400	600	800		
0	0,043 a	0,030 a	0,030 ab	0,066 a	0,091	0,001(4)
100	0,026 a	0,023 a	0,026 a	0,023 a	-	-
200	0,026 a	0,026 a	0,030 a	0,026 b	-	-
400	0,040 a	0,036 b	0,030 a	0,016 c	-	-
p>F(linear)	-	-	-	0,000(2)		
p>F (cuadrático)	-	-	-	0,005		

Médias seguidas da mesma letra nas condições hídricas, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a nível de 5% de probabilidade. (1) $y = -0,0000005x^2 - 0,0001x + 0,0322$ ($R^2 = 0,993$); (2) $y = -0,0001x + 0,0508$ ($R^2 = 0,6097$); (3) $y = 0,0000001x^2 - 0,00007x + 0,0337$ ($R^2 = 0,935$); (4) $y = 0,0000002x^2 - 0,0001x + 0,0439$ ($R^2 = 0,905$).

Fonte: Própria autora

A menor taxa fotossintética foi com 30% CC, independente da dose de N e Si (Tabela 16). Souza et al. (2020) estudando cinco cultivares de café arábica verificaram que sob estresse hídrico todas as cultivares tiveram os valores de A reduzidos, uma vez que a água é um componente crucial para a fotossíntese, tanto como reagente quanto como meio de transporte.

Como estratégia das plantas para reduzir a perda de água, em condições de baixa disponibilidade hídrica, reduzem a abertura dos estômatos, o que leva a uma diminuição na absorção de CO₂ e, conseqüentemente, na taxa fotossintética. Além

disso, o estresse hídrico também pode levar a danos nas membranas celulares e no sistema de transporte de elétrons da fotossíntese, afetando negativamente a eficiência do processo (TAIZ et al., 2017). Portanto, a disponibilidade adequada de água é fundamental para uma fotossíntese eficiente em plantas de café arábica.

Com 30% CC e sem aplicação e com a dose de 600 mg L⁻¹ Si, a fotossíntese aumentou linearmente com o aumento das doses de N. Com 50% CC o efeito foi quadrático para as doses de 600 e 800 mg L⁻¹ Si, onde a dose equivalente a 199 e 145 kg ha⁻¹, respectivamente, contribuíram para a menor taxa fotossintética e com 100% CC, a dose de 400 mg L⁻¹ Si, aumentou linearmente com a adubação nitrogenada. A dose de 200 kg ha⁻¹ N apresentou a máxima fotossíntese líquida com a dose de 381 mg L⁻¹ Si, quando as plantas foram submetidas a 50% CC. Sem a restrição hídrica (100% CC) a dose de 200kg ha⁻¹ de N e sem adubação nitrogenada o efeito foi linear, onde a taxa da fotossíntese aumentou linearmente com as doses de Si, e com a maior dose de N (400 hg ha⁻¹), o ponto de máxima fotossíntese foi observada com a dose de 444 mg L⁻¹ Si (Tabela 16).

Essa interação entre N e Si pode estar relacionada com uma maior captação de nitrato, nas plantas com aplicação de Si, pois foi verificado que aplicação de Si altera a nutrição de mudas de cafeeiro (BOTELHO et al., 2005), melhorando o ângulo de abertura das folhas, o que favorece um melhor aproveitamento da luz e, conseqüentemente, aumenta a eficiência fotossintética (GOUSSAIN et al., 2002; BASAGLI et al., 2003).

O nitrogênio é um elemento essencial para a fotossíntese, pois desempenha um papel importante na produção de clorofila, o pigmento responsável pela captação da luz durante a fotossíntese. A adubação nitrogenada adequada pode promover um aumento na taxa de fotossíntese em plantas de café arábica, resultando em maior produção de carboidratos e, conseqüentemente, no crescimento das plantas (NUNES-NESI et al., 2010; MARCHIORI et al., 2014).

Tabela 16 – Desdobramento Condições hídricas X doses de N X doses de Si para fotossíntese líquida (A) em plantas de café arábica

30% CC						
Doses de N (kg ha ⁻¹)	Doses de Si (mg L ⁻¹)				p>F (linear)	p>F (quadrático)
	0	400	600	800		
0	2,10 b	2,81 b	2,13 b	2,64 b	-	-
100	2,02 b	1,42 b	2,31 b	2,70 b	-	-
200	2,66 b	3,32 b	3,09 b	3,50 b	-	-
400	3,74 a	2,26 c	3,77 b	2,67 b	-	-
p>F(linear)	0,001(1)	-	0,002(2)			
p>F (quadrático)	0,408	-	0,980			
50% CC						
Doses de N (kg ha ⁻¹)	Doses de Si (mg L ⁻¹)				p>F (linear)	p>F (quadrático)
	0	400	600	800		
0	4,00 a	4,34 a	6,47 a	4,92 a	-	-
100	5,66 a	4,40 a	4,61 a	4,72 a	-	-
200	4,13 a	5,79 a	4,38 b	4,14 b	0,864	0,004(6)
400	5,07 a	4,95 b	5,61 a	5,87 a	-	-
p>F(linear)	-	-	0,358	0,074		
p>F (quadrático)	-	-	0,001(3)	0,017(4)		
100% CC						
Doses de N (kg ha ⁻¹)	Doses de Si (mg L ⁻¹)				p>F (linear)	p>F (quadrático)
	0	400	600	800		
0	3,61 a	4,77 a	5,63 a	5,61 a	0,001(7)	0,487
100	5,63 a	4,81 a	3,23 b	5,35 a	-	-
200	4,02 a	6,03 a	6,40 a	6,41 a	0,001(8)	0,071
400	4,35 a	6,52 a	5,36 a	5,08 a	0,202	0,001(9)
p>F(linear)	-	0,001(5)	-	-		
p>F (quadrático)	-	0,763	-	-		

Médias seguidas da mesma letra nas condições hídricas, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a nível de 5% de probabilidade. (1) $y=0,0044x+1,852$ ($R^2=0,917$); (2) $y=0,0043x+2,066$ ($R^2=0,9617$); (3) $y=0,00005x^2-0,0199x+6,3827$ ($R^2=0,966$); (4) $y=0,00003x^2-0,0087x+5,0299$ ($R^2=0,904$); (5) $y=0,0048x+4,688$ ($R^2=0,876$); (6) $y=-0,00008x^2+0,0061x+4,2026$ ($R^2=0,694$); (7) $y=0,0027x+3,69$ ($R^2=0,938$); (8) $y=0,0031x+4,3097$ ($R^2=0,869$); (9) $y=-0,000009x^2+0,008x+4,4148$ ($R^2=0,811$)

Fonte: Própria autora

Com 50% CC a dose de 400 mg L⁻¹ de Si contribuiu para a maior EUA com a dose de 150 kg ha⁻¹ de N e com a dose de 800 mg L⁻¹ de Si o EUA diminuiu com o aumento das doses de N, diferentemente de quando as plantas estavam com 100% CC em a EUA aumentou. As plantas que não foram submetidas a restrição hídrica (100% CC) e não receberam adubação nitrogenada apresentaram maior eficiência da água com a dose de 600 mg L⁻¹, com a dose de 100 kg ha⁻¹ de N a eficiência diminuiu e com a dose equivalente a 200 kg ha⁻¹ a eficiência aumentou com as doses de Si (Tabela 17).

As taxas transpiratórias menores em condições de estresse hídrico refletem na maior EUA. O mesmo efeito pode ser observado na maior dose de Si, onde as

plantas que estavam com 50% CC apresentaram uma alta na transpiração o que refletiu no menor uso e eficiência da água e com 100% CC o efeito é inverso.

Em condições de estresse hídrico, as plantas a reduzir a transpiração fechando os estômatos para minimizar a perda de água. Isso ajuda a preservar a água disponível para funções vitais, mas também pode afetar a absorção de nutrientes e a taxa de fotossíntese (FAROOQ et al., 2009 e TAIZ et al., 2017). O equilíbrio entre a abertura e o fechamento dos estômatos é crucial para otimizar a troca gasosa e minimizar a perda excessiva de água.

Tabela 17 – Desdobramento Condições hídricas X doses de nitrogênio (N) X doses de silício (Si) para eficiência e uso da água (EUA) em plantas de café arábica

30% CC						
Doses de N (kg ha ⁻¹)	Doses de Si (mg L ⁻¹)				p>F (linear)	p>F (cuadrático)
	0	400	600	800		
0	4,07 a	3,84 b	4,78 a	4,01 b	-	-
100	4,40 b	2,21 b	4,12 b	3,73 a	-	-
200	3,97 a	4,94 a	4,61 b	4,46 b	-	-
400	5,04 a	3,56 b	5,29 a	3,43 b	-	-
p>F(linear)	-	-	-	-		
p>F (cuadrático)	-	-	-	-		
50% CC						
Doses de N (kg ha ⁻¹)	Doses de Si (mg L ⁻¹)				p>F (linear)	p>F (cuadrático)
	0	400	600	800		
0	5,47 a	6,00 ab	4,52 a	6,72 a	-	-
100	7,27 a	6,69 a	7,64 a	5,96 a	-	-
200	5,70 a	7,09 a	5,33 b	5,27 ab	-	-
400	5,43 a	3,93 b	7,13 a	4,08 b	-	-
p>F(linear)	-	0,016	-	0,005(2)		
p>F(cuadrático)	-	0,011(1)	-	0,866		
100% CC						
Doses de N (kg ha ⁻¹)	Doses de Si (mg L ⁻¹)				p>F (linear)	p>F (cuadrático)
	0	400	600	800		
0	4,10 a	6,50 a	6,67 a	4,90 ab	0,178	0,005(4)
100	7,26 a	6,09 a	4,54 b	4,62 a	0,002(5)	0,834
200	5,06 a	7,22 a	7,95 a	7,09 a	0,012(6)	0,082
400	4,59 a	7,79 a	6,05 a	6,78 a	-	-
p>F(linear)	-	-	-	0,014(3)		
p>F(cuadrático)	-	-	-	0,421		

Médias seguidas da mesma letra nas condições hídricas, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a nível de 5% de probabilidade. (1) $y = -0,00005x^2 + 0,015x + 5,9157$ ($R^2 = 0,985$); (2) $y = -0,0066x + 6,654$ ($R^2 = 0,996$); (3) $y = 0,0057x + 4,85$ ($R^2 = 0,590$); (4) $y = -0,00001x^2 + 0,012x + 4,0658$ ($R^2 = 0,972$); (5) $y = -0,0036x + 7,2649$ ($R^2 = 0,912$); (6) $y = 0,003x + 5,498$ ($R^2 = 0,665$).

Fonte: Própria autora

4.5 Teor nutricional

As diferentes condições hídricas e as doses da adubação nitrogenada apresentaram efeito apenas para os teores de nitrogênio (N), as doses de Si, o efeito foi observado para teores de N, fósforo (P) e potássio (P). Houve interação entre os três fatores estudados (CH x N x Si) para os teores de N, P, K e Si (Tabela 18).

Tabela 18 – Análise de variância teor de nitrogênio (N), fosforo (P), potássio (K) e silício (Si) da parte aérea das mudas de café arábica submetidas as diferentes condições hídricas (CH), doses de nitrogênio no solo (N) e aplicação foliar de silício (Si)

FV	Quadrado médio			
	N	P	K	Si
Bloco	7,00	0,15	25,919	0.027**
CH	133,47**	0,513	0,352	0.002
N	36,19*	0,613	31,028	0.003
Si	322,70**	1,364**	308,611**	0.0001
CH*N	25,21*	0,616	32,357	0.001
CH*Si	63,67**	0,946**	110,208**	0.005**
N*Si	103,21**	0,644*	109,467**	0.001
CH*N*Si	25,37**	0,524*	60,130**	0.002*
CV(%)	6,03	11,4	12,38	12,53

**, * significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Fonte: Própria autora

Com 30% CC e sem aplicação do Si houve um aumento linear no teor de N com aplicação da adubação nitrogenada, aumento que também podemos observar nas plantas que foram submetidas a 100% CC e sem aplicação de Si. Com 400 mg L⁻¹ de Si há uma mudança no teor de N na parte, que diminuiu com o aumento da adubação nitrogenada, o mesmo ocorre com a dose de 600 mg L⁻¹, isso com 100 e 50% CC, respectivamente. Com a maior dose de Si e com 50% CC o efeito é quadrático onde a dose de 223 kg ha⁻¹ de N proporcionou os menores teores de N (Tabela 19).

Os vasos que foram mantidos com 30% CC e sem aplicação da adubação nitrogenada apresentam efeito polinomial para as doses de Si, onde a dose de 458 mg L⁻¹ Si proporcionou o maior teor de N. Com 50% CC e com as doses equivalente a 100 e 200 kg ha⁻¹ N, o maior teor de N na parte área das mudas de café foi com a dose de 339 e 622 mg L⁻¹ de Si, respectivamente. E com 400 kg ha⁻¹ de N o teor

nutricional diminuiu com o aumento das doses de Si. Com 100% CC a resposta foi muito semelhante com o 50% CC, as doses equivalentes a 0, 100 e 200 kg ha⁻¹ N, foram responsáveis pelos maiores teores de N, com as doses de 644, 372 e 251 mg L⁻¹ de Si (Tabela 19).

Tabela 19 – Desdobramento Condições hídricas X doses de nitrogênio (N) X doses de silício (Si) para teor de N na parte aérea de mudas de café arábica

30% CC						
Doses de N (kg ha ⁻¹)	Doses de Si (mg L ⁻¹)				p>F (linear)	p>F (quadrático)
	0	400	600	800		
0	48,06 b	60,56 a	57,70 ab	56,43 ab	0,001	0,001(6)
100	56,00 a	57,36 b	50,76 b	54,46 a	-	-
200	53,93 a	56,26 a	61,86 a	53,53 a	-	-
400	59,60 a	57,40 a	54,16 a	52,50 ab	-	-
p>F (linear)	0,0003(1)	-	-	-		
p>F (quadrático)	0,386	-	-	-		
50% CC						
Doses de N (kg ha ⁻¹)	Doses de Si (mg L ⁻¹)				p>F (linear)	p>F (quadrático)
	0	400	600	800		
0	58,30 a	62,76 a	63,86 a	60,86 a	-	-
100	55,16 ab	59,20 ab	61,03 a	51,53 ab	0,610	0,001(7)
200	55,80 a	58,73 a	58,50 a	51,36 ab	0,263	0,008(8)
400	61,30 a	56,73 a	52,80 a	55,10 a	0,006(9)	0,260
p>F (linear)	-	-	0,0006(2)	0,150		
p>F (quadrático)	-	-	0,964	0,0007(3)		
100% CC						
Doses de N (kg ha ⁻¹)	Doses de Si (mg L ⁻¹)				p>F (linear)	p>F (quadrático)
	0	400	600	800		
0	48,20 b	65,66 a	55,73 b	50,20 b	0,410	0,001(10)
100	49,00 b	64,33 a	54,90 ab	47,63 b	0,760	0,001(11)
200	58,00 a	59,43 a	55,43 a	45,50 b	0,001	0,0007(12)
400	61,06 a	55,00 a	51,83 a	47,38 b	-	-
p>F (linear)	0,001(4)	0,0005(5)	-	-		
p>F (quadrático)	0,324	0,938	-	-		

Médias seguidas da mesma letra nas condições hídricas, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a nível de 5% de probabilidade. (1) $y=0,0245x+50,102$ ($R^2=0,752$); (2) $y=-0,0275x+63,868$ ($R^2=0,999$); (3) $y=0,0002x^2-0,0891x+60,222$ ($R^2=0,916$); (4) $y=0,0352x+47,908$ ($R^2=0,870$); (5) $y=-0,0281x+66,014$ ($R^2=0,966$); (6) $y=-0,00005x^2+0,0458x+48,269$ ($R^2=0,944$); (7) $y=-0,00005x^2+0,0339x+4,854$ ($R^2=0,810$); (8) $y=-0,00004x^2+0,0249x+55,642$ ($R^2=0,922$); (9) $y=-0,0092x+60,618$ ($R^2=0,763$); (10) $y=-0,00004x^2+0,0515x+47,122$ ($R^2=0,885$); (11) $y=0,00004x^2-0,0298x+66,099$ ($R^2=0,967$); (12) $y=-0,00005x^2+0,0251x+57,924$ ($R^2=0,994$).

Fonte: Própria autora

Com os aumentos das doses na adubação nitrogenada, diminui a necessidade requerida do Si, para aumentar o teor foliar de N nas mudas de café. Segundo alguns trabalhos (DETMANN et al., 2012; SHI et al., 2014; PARECIDO et al., 2018) a aplicação combinada de Si e a adubação nitrogenada pode promover um maior crescimento vegetativo, aumento da eficiência no uso da água, melhoria na absorção de nutrientes e maior qualidade dos grãos, segundo esses autores o Si influencia a atividade de enzimas envolvidas no metabolismo do nitrogênio, promovendo uma maior eficiência no uso desse nutriente pelas plantas, levando a um aumento no teor foliar de nitrogênio quando a aplicação foliar de silício é combinada com a adubação nitrogenada.

As maiores doses de Si e N combinadas contribuíram para menor taxa fotossintética (Tabela 16) e para o menor teor de N na parte aérea, o que mostrando que os efeitos da interação entre esses elementos podem variar dependendo das condições do solo, da planta e das práticas de manejo adotadas.

As plantas que sofreram maior restrição hídrica (30% CC) e que não receberam aplicação foliar de Si, tiveram o maior teor de P com a dose de 242 kg ha⁻¹ N, já com 100% CC e com a maior dose de Si (800 mg L⁻¹) o teor de P aumentou linearmente com as doses de N. Sem adubação nitrogenada o maior teor de P foi com a dose de 433 mg L⁻¹ de Si, e com a dose equivalente a 100 e 200 kg ha⁻¹ de N, há uma diminuição do teor de P com aplicação foliar de Si, isso tanto para as plantas submetidas a 30 e 100% CC (Tabela 20).

Tanto o N quanto o Si podem afetar a capacidade das plantas em absorver o P do solo. A adubação nitrogenada pode estimular a atividade das raízes e aumentar a absorção de P. Além disso, a presença de silício no solo pode melhorar a absorção de nutrientes pelas plantas, incluindo o fósforo (PARECIDO et al., 2022), principalmente em condições de boa disponibilidade hídrica.

A relação entre P e N é particularmente significativa devido ao papel do P na síntese de adenosina trifosfato (ATP). O ATP é necessário para a conversão do N absorvido em aminoácidos e proteínas. Isso significa que, mesmo que haja N disponível, a ausência de P pode limitar a capacidade das plantas de utilizar eficazmente o N absorvido para a síntese de proteínas e, consequentemente, para o crescimento e desenvolvimento (TAIZ et al., 2017).

Nessa situação, as concentrações de P foram consideradas adequadas para a cultura do café (RAIJ et al., 1997). O P é um dos macronutrientes menos exigidos

pelo cafeeiro para o seu crescimento vegetativo e produção (MALAVOLTA 1997; FERREIRA et al., 2022) mas após absorvido esse nutriente, juntamente com o N, é o elemento mais redistribuído.

Tabela 20 – Desdobramento Condições hídricas X doses de nitrogênio (N) X doses de silício (Si) para teor de fósforo (P) na parte aérea de mudas de café arábica

30% CC						
Doses de N (kg ha ⁻¹)	Doses de Si (mg L ⁻¹)				p>F (linear)	p>F (quadrático)
	0	400	600	800		
0	4,23 a	5,26 a	5,10 a	4,30 a	0,590	0,005(3)
100	5,43 a	5,26 a	4,30 a	4,40 a	0,006(4)	0,730
200	5,23 a	5,53 a	4,80 a	4,53 ab	-	-
400	4,96 a	5,03 a	5,36 a	5,23 ab	-	-
p>F (linear)	0,289	-	-	-		
p>F (quadrático)	0,022(1)	-	-	-		
50% CC						
Doses de N (kg ha ⁻¹)	Doses de Si (mg L ⁻¹)				p>F (linear)	p>F (quadrático)
	0	400	600	800		
0	4,93 a	4,96 a	4,73 a	4,73 a	-	-
100	4,90 a	4,73 a	4,63 a	4,43 a	-	-
200	4,53 a	5,00 a	4,63 a	5,43 a	-	-
400	4,66 a	4,26 a	4,90 a	4,33 b	-	-
p>F (linear)	-	-	-	-		
p>F (quadrático)	-	-	-	-		
100% CC						
Doses de N (kg ha ⁻¹)	Doses de Si (mg L ⁻¹)				p>F (linear)	p>F (quadrático)
	0	400	600	800		
0	4,56 a	4,63 a	5,66 a	3,70 a	-	-
100	4,53 a	4,53 a	5,30 a	3,83 a	-	-
200	5,36 a	4,66 a	5,06 a	3,80 b	0,003(5)	0,290
400	5,13 a	4,80 a	5,26 a	5,71 a	-	-
p>F (linear)	-	-	-	0,0001(2)		
p>F (quadrático)	-	-	-	0,028		

Médias seguidas da mesma letra nas condições hídricas, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a nível de 5% de probabilidade. (1) $y = -0,00002x^2 + 0,0097x + 4,3481$ ($R^2 = 0,793$); (2) $y = 0,0051x + 3,37$ ($R^2 = 0,804$); (3) $y = -0,000006x^2 + 0,0052x + 4,2248$ ($R^2 = 0,996$); (4) $y = -0,0015x + 5,518$ ($R^2 = 0,769$); (5) $y = 0,002x + 3,3446$ ($R^2 = 0,515$).

Fonte: Própria autora

Com 30% CC e sem aplicação de Si o maior teor de K é com a dose de 287 kg ha⁻¹ de N. A dose de 600 mg L⁻¹ de Si aumenta linearmente os teores de K com as doses de N no solo, mas com a maior dose de Si (800 mg L⁻¹) o teor de K diminui com a adubação nitrogenada, isso quando as plantas estão com 50% CC. Sem a restrição hídrica (100% CC) e com a maior dose de Si, o menor teor de K é

observado com a dose de 165 kg ha⁻¹ de N. Sem aplicação de N no solo o maior teor de K é com a dose de 613 e 546 mg L⁻¹, isso com e sem a restrição hídrica (30 e 100% CC) respectivamente (Tabela 21).

Tabela 21 – Desdobramento Condições hídricas X doses de nitrogênio (N) X doses de silício (Si) para teor de potássio (K) na parte aérea de mudas de café arábica

30% CC						
Doses de N (kg ha ⁻¹)	Doses de Si (mg L ⁻¹)				p>F (linear)	p>F (quadrático)
	0	400	600	800		
0	23,50 b	46,50 a	42,03 ab	44,86 a	0,011	0,003(5)
100	43,46 a	45,40 a	33,93 b	40,20 a	-	-
200	42,60 a	44,50 a	40,40 a	40,53 a	-	-
400	40,06 a	41,40 a	41,46 a	34,53 a	-	-
p>F (linear)	0,002	-	-	-		
p>F (quadrático)	0,0001(1)	-	-	-		
50% CC						
Doses de N (kg ha ⁻¹)	Doses de Si (mg L ⁻¹)				p>F (linear)	p>F (quadrático)
	0	400	600	800		
0	33,53 a	40,83 a	37,23 b	42,70 a	-	-
100	38,53 a	43,13 a	37,80 b	41,86 a	-	-
200	40,60 a	49,73 a	44,06 a	40,43 a	-	-
400	37,60 a	38,90 a	47,40 a	32,06 a	-	-
p>F (linear)	-	-	0,005(2)	0,006(3)		
p>F (quadrático)	-	-	0,865	0,378		
100% CC						
Doses de N (kg ha ⁻¹)	Doses de Si (mg L ⁻¹)				p>F (linear)	p>F (quadrático)
	0	400	600	800		
0	32,03 ab	40,86 a	50,60 a	39,56 a	0,001	0,011(6)
100	37,50 a	40,06 a	51,46 a	33,60 a	-	-
200	40,20 a	40,50 a	46,63 a	29,53 b	-	-
400	39,03 a	42,06 a	43,23 a	41,21 a	-	-
p>F (linear)	-	-	-	0,507		
p>F (quadrático)	-	-	-	0,002(4)		

Médias seguidas da mesma letra nas condições hídricas, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a nível de 5% de probabilidade. (1) $y = -0,0003x^2 + 0,172x + 25,181$ ($R^2 = 0,869$); (2) $y = 0,0276x + 36,79$ ($R^2 = 0,911$); (3) $y = -0,0273x + 44,038$ ($R^2 = 0,907$); (4) $y = 0,0003x^2 - 0,0993x + 39,946$ ($R^2 = 0,979$); (5) $y = -0,00006x^2 + 0,0736x + 23,989$ ($R^2 = 0,922$); (6) $y = -0,00005x^2 + 0,0546x + 31,366$ ($R^2 = 0,7224$).

Fonte: Própria autora

Desta forma observou-se que tanto as maiores doses da adubação nitrogenada quanto as maiores doses do Si contribuíram para menor teor de K nas mudas de café. O que mostra que é importante encontrar uma dose de equilíbrio entre esses elementos para que seja benéfica, já que eles podem influenciar diretamente as plantas.

A relação entre K e N está intimamente ligada à síntese de proteínas. O N necessário para a construção dos aminoácidos, que são os blocos de construção das proteínas. O K, por sua vez, auxilia no transporte de aminoácidos dentro das plantas, contribuindo para a síntese adequada de proteínas essenciais para o crescimento, desenvolvimento e resistência das mudas de café arábica (TAIZ et al., 2017).

O cafeeiro não é considerado uma planta acumuladora de Si (TAKAHASHI et al., 1990) mas se houver uma oferta adequada de Si no ambiente, as plantas podem ser capazes de absorver e acumular esse nutriente.

A dose de 600 mg L⁻¹ de Si na menor condição hídrica (30% CC) apresentou efeito linear negativo, onde o teor de Si diminuiu com o aumento das doses de N. Com 800 mg L⁻¹ de Si e com 100% CC o efeito foi parecido, houve uma diminuição no teor de Si com o aumento das doses de N. Com 50% CC e a dose equivalente a 100 kg ha⁻¹ de N houve efeito linear positivo com o aumento das doses de Si, o mesmo efeito foi observado com 100% CC e sem aplicação de N (Tabela 22).

De forma geral as plantas em estresse hídrico apresentaram menor teor de Si na parte aérea do cafeeiro, mesmo na maior dose de Si. E com 50 e 100% da CC é onde foram observados os maiores teores. O menor teor de Si nas mudas de café arábica sob estresse hídrico pode estar relacionado à redução na absorção, transporte e disponibilidade de Si. A falta de água pode afetar diversos processos fisiológicos e metabólicos das plantas, impactando sua capacidade de absorver e utilizar nutrientes e dado que o Si também compõe a parede celular é possível inferir que há uma absorção geralmente maior de Si pelos cafeeiros com maior biomassa vegetativa (BRIAT et al., 2020, PARECIDO et al., 2022), como nas plantas que estavam com 100% CC.

Por isso pensando na utilização do Si para minimizar os possíveis danos causado por déficit hídrico o interessante seria fazer essa aplicação na forma preventiva, ou seja, antes que a planta esteja passando pelo estresse hídrico, já que a falta de água vai dificultar a absorção e a disponibilidade desse elemento para as plantas.

Tabela 22 – Desdobramento Condições hídricas X doses de nitrogênio (N) X doses de silício (Si) para teor de Si na parte aérea de mudas de café arábica

30% CC						
Doses de N (kg ha ⁻¹)	Doses de Si (mg L ⁻¹)				p>F (linear)	p>F (quadrático)
	0	400	600	800		
0	0,25 a	0,24 a	0,33 a	0,25 b	-	-
100	0,27 a	0,27 a	0,32 a	0,25 b	-	-
200	0,27 a	0,24 a	0,25 a	0,23 b	-	-
400	0,29 a	0,30 a	0,27 b	0,27 a	-	-
p>F(linear)	-	-	0,018(1)	-		
p>F (quadrático)	-	-	0,205	-		
50% CC						
Doses de N (kg ha ⁻¹)	Doses de Si (mg L ⁻¹)				p>F (linear)	p>F (quadrático)
	0	400	600	800		
0	0,28 a	0,26 a	0,27 a	0,25 b	-	-
100	0,27 a	0,26 a	0,30 a	0,34 a	0,009(3)	0,090
200	0,29 a	0,28 a	0,23 a	0,29 a	-	-
400	0,26 a	0,25 a	0,25 b	0,30 a	-	-
p>F(linear)	-	-	-	-		
p>F (quadrático)	-	-	-	-		
100% CC						
Doses de N (kg ha ⁻¹)	Doses de Si (mg L ⁻¹)				p>F (linear)	p>F (quadrático)
	0	400	600	800		
0	0,24 a	0,28 a	0,30 a	0,34 a	0,001(4)	0,689
100	0,25 a	0,30 a	0,30 a	0,31 ab	-	-
200	0,24 a	0,28 a	0,28 a	0,29 a	-	-
400	0,28 a	0,29 a	0,34 a	0,24 a	-	-
p>F(linear)	-	-	-	0,0004(2)		
p>F (quadrático)	-	-	-	0,770		

Médias seguidas da mesma letra nas condições hídricas, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a nível de 5% de probabilidade. (1) $y=-0,0002x+0,322$ ($R^2=0,555$); (2) $y=-0,0002x+0,338$ ($R^2=0,996$); (3) $y=0,00008x+0,2546$ ($R^2=0,641$); (4) $y=0,0001x+0,236$ ($R^2=0,969$).

Fonte: Própria autora

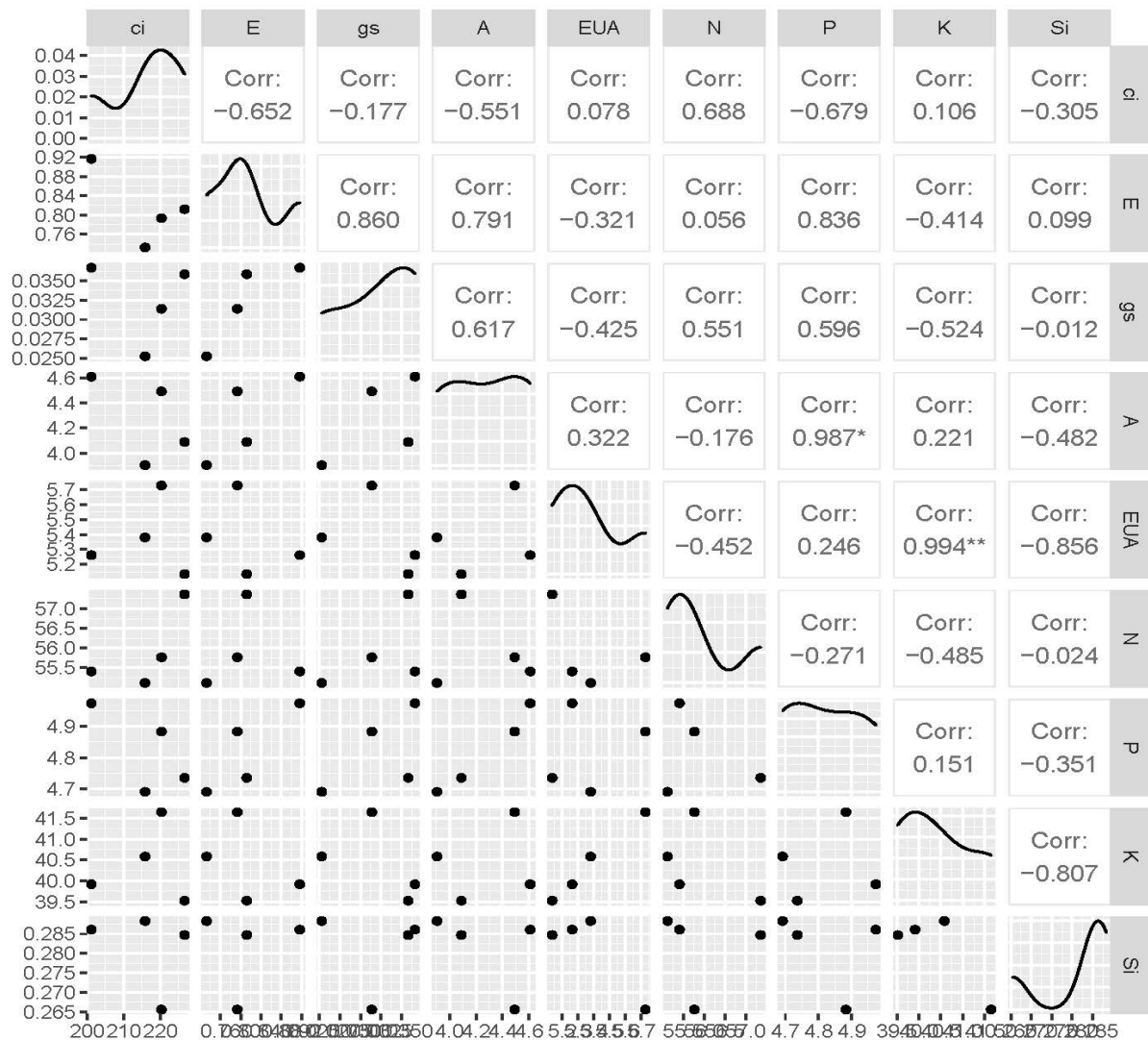
4.6 Correlação

Na análise de correlação muitas variáveis apresentaram associação forte, acima de 0,7. A relação entre g_s e E (0,86) revela uma associação positiva significativa (Figura 11). Isso sugere que uma maior g_s leva a um aumento da E das plantas, e o mesmo ocorre quando há uma menor condutância estomática que leva a menor transpiração, quando os estômatos estão fechados, a planta reduz a perda de água para a atmosfera (TAIZ et al., 2017). Isso pode ocorrer em condições de

estresse hídrico, altas temperaturas ou em certos momentos do dia para a plantas conseguir conservar água.

É possível observar outras correlações positivas como entre EUA e K (0.99), e entre a fotossíntese líquida e o teor de P (0.99) (Figura 11). O P é um dos principais elementos necessários para a realização eficiente da fotossíntese (LIU et al., 2015, BEZERRA et al., 2017) devido a suas funções essenciais nas seguintes vias metabólicas.

Figura 11 – Resumo da análise de correlação para as variáveis concentração interna de CO₂ (Ci), Transpiração (E), condutância estomática (gs), fotossíntese líquida (A), eficiência no uso da água (EUA), teor foliar de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K) e silício (Si) para mudas de café arábica



Fonte: Própria autora

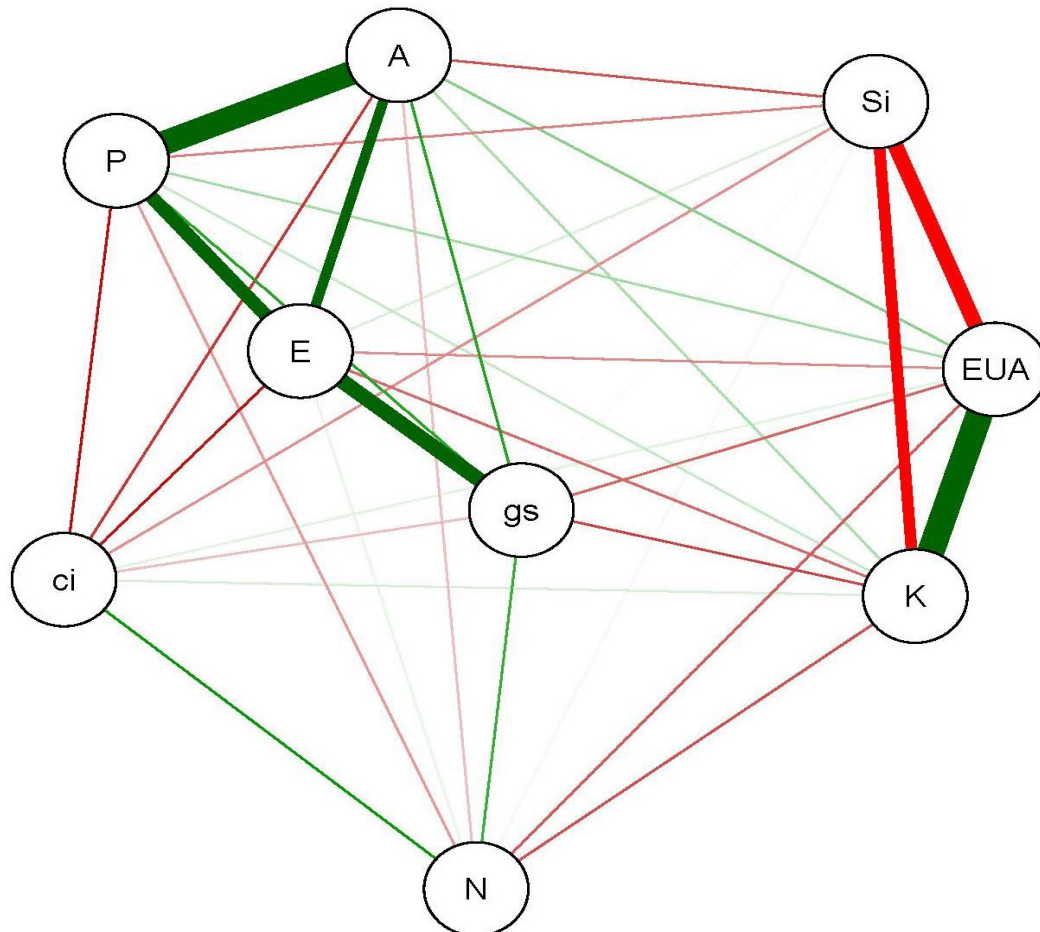
Notavelmente, a correlação entre C_i e E (-0.65), indica uma relação negativa moderada. Isso pode significar que, à medida que C_i diminui, a transpiração tende a aumentar e vice-versa e entre E e EUA (-0.32) (Figura 11), como foi possível observar anteriormente neste trabalho, onde os tratamentos que proporcionaram maior E nas mudas de café arábica apresentam menor valor no EUA , e as plantas que apresentam maior EUA tiveram menor taxa transpiratório (Tabela 14 e 17).

Valores próximos a 0 indicam correlações fracas ou nulas entre variáveis, como no caso da relação entre g_s e teor de Si (-0.01), e entre o teor de N e teor de Si (-0.02).

Observa-se um padrão onde EUA está altamente correlacionado com K (Figura 12). A eficiência no uso da água refere-se à capacidade das plantas de realizar suas funções fisiológicas e crescimento utilizando uma quantidade mínima de água (VIEIRA et al 2010). O K é um dos nutrientes essenciais para as plantas e desempenha várias funções importantes na regulação da abertura estomática, na osmorregulação, o K ainda é necessário para a atividade de várias enzimas envolvidas no metabolismo energético das plantas, incluindo a fotossíntese e a síntese de ATP (BEZERRA et al., 2017). Todos esses fatores podem contribuir para uma maior EUA , permitindo que o cafeeiro mantenha suas funções vitais e crescimento mesmo em condições de estresse hídrico.

O teor foliar de Si está muito correlacionado com o EUA , mas de forma negativa (Figura 8), o aumento de uma variável diminuiu o da outra, o silício formar uma dupla camada silício-cutícula que pode reduzir a perda de água por transpiração foliar, contribuindo para uma maior EUA (KORNDÖRFER, 2007; PEIXOTO et al., 2011), no presente trabalho podemos observar que as doses de Si influenciaram a EUA nas mudas de café arábica, e que a dose em torno de 400 a 600 mg L⁻¹ foram as que mais contribuíram para maior EUA , mas em alguns trabalhos (PINTO et al., 2012; FERRAZ et al., 2014) não foram encontrados relação entre o Si e EUA , indicando que ainda há a necessidade de mais estudos para entender a relação entre essas variáveis.

Figura 12 – Rede de correlação para as variáveis concentração interna de CO₂ (Ci), Transpiração (E), condutância estomática (gs), fotossíntese líquida (A), eficiência no uso da água (EUA), teor foliar de nitrogênio (N), fosforo (P), potássio (K) e silício (Si) para mudas de café arábica



Fonte: Própria autora

5 CONCLUSÃO

O estresse hídrico prejudica o crescimento em altura e diâmetro de mudas de café, além de reduzir a transpiração e a fotossíntese líquida.

A adubação nitrogenada propiciou maior índice de clorofila e aumento da área foliar, além de aumentar o EUA em mudas de café arábica.

Mudas de café sem estresse hídrico e com uso de silício sofre redução na concentração interna de CO₂, transpiração e condutância estomática.

REFERÊNCIAS

- ADREES, M., ALI, S., RIZWAN, M., ZIA-UR-REHMAN, M., IBRAHIM, M., ABBAS, F., FARID, M., QAYYUM, M.F., IRSHAD, M.K. Mechanisms of silicon mediated alleviation of heavy metal toxicity in plants: a review. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, New York, US: Academic Press. v. 119, p. 186–197. 2015.
- ARAUJO, G. L., DOS REIS, E. F., MORAES, W. B., DE OLIVEIRA GARCIA, G., & NAZÁRIO, A. A. Influência do déficit hídrico no desenvolvimento inicial de duas cultivares de café conilon. **Irriga**, Botucatu, SP. v. 16, p. 115-124, 2011
- BASAGLI, M. A. B.; MORAES, J. C.; CARVALHO, G. A.; ECOLE, C. C.; GONÇALVES-GERVÁSIO, R. D. C. Efeito da aplicação de silicato de sódio na resistência de plantas de trigo ao pulgão-verde *Schizaphis graminum* (Hemiptera: Aphididae). **Neotropical Entomology**, Londrina, PR. v. 32, p. 659–663, 2003.
- BATISTA, L. A., GUIMARÃES, R. J., PEREIRA, F. J., CARVALHO, G. R., & CASTRO, E. M. D. Anatomia foliar e potencial hídrico na tolerância de cultivares de café ao estresse hídrico. **Revista Ciência Agronômica**, Ceará, CE. v. 41, p. 475-481, 2010.
- BEZERRA, B. K. L. Adubação com silício e tolerância ao déficit hídrico em cana-de-açúcar. 2015, 74 f. Dissertação (mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônomicas da UNESP, Campus de Botucatu, Botucatu, 2015.
- BEZERRA, B. K. L., ALVES, D. A. D. S., GERMINO, G. H., DE LIMA, J. É. S. S. I. C. A., BIANCHI, L., & BROETTO, F. Estresse mineral (macronutrientes). In: BROETTO, F., GOMES, E. R., JOCA, T. A. C. **O Estresse das Plantas Teoria & Prática**, São Paulo: Cultura acadêmica, 2017.
- BLUM, Abraham. Plant water relations, plant stress and plant production. **Plant breeding for water-limited environments**, Berlim: Springer. p. 11-52, 2011.
- BOTELHO, D. M.S.; POZZA, E.A.; POZZA, A.A.A.; CARVALHO, J.G. Intensidade da cercosporiose em mudas de cafeeiro em função de fontes e doses de silício. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, DF. v. 30, p. 582-588, 2005.
- BRIAT, J. F. GOJON, A., PLASSARD, C., ROUACHED, H., & LEMAIRE. REAPPRAISAL of the central role of soil nutrient availability in nutrient management in light of recent advances in plant nutrition at crop and molecular levels. **European Journal of Agronomy**, Conthey, CH, v. 116, p. 126069, 2020.
- CASTRO, E. M.; PEREIRA, F. J.; PAIVA, R. **Histologia Vegetal: Estrutura e Função de Órgãos Vegetativos**. Lavras: UFLA, 2009. 234 p.
- CHEN, W., YAO, X., CAI, K., CHEN, J., & WANG, P. Silicon alleviates drought stress of rice plants by improving plant water status, photosynthesis and mineral nutrient absorption. **Biological Trace Element Research**, Clifton, NJ. v. 142, p. 67-76, 2011.

CLEMENTE, J. M., MARTINEZ, H. E. P., ALVES, L. C., & LARA, M. C. Effect of N and K doses in nutritive solution on growth, production and coffee bean size. **Revista Ceres**, Viçosa, MG. v. 60, p. 279-285, 2013.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de café, Brasília, DF, v. 10, n. 2 segundo levantamento, maio. 2023.

CORRÊA, C. V. **Aplicação de silício em plantas de tomate cultivar Micro-tom sob déficit hídrico**. 2019. 112 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista - Unesp, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2019.

CUNHA, A. P. M., ZERI, M., DEUSDARÁ LEAL, K., COSTA, L., CUARTAS, L. A., MARENGO, J. A., ... & RIBEIRO-NETO, G. Extreme drought events over Brazil from 2011 to 2019. **Atmosphere**, Basel, CH. v.10, p. 642, 2019.

DAMATTA, F. M.; RAMALHO, J. D. C. Impact of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Campinas, SP. v. 18, p. 55-81, 2006.

DAMATTA, F.M., LOOS, R.A., SILVA, E.A., LOUREIRO, M.E., DUCATTI, C. Effects of soil water deficit and nitrogen nutrition on water relations and photosynthesis of pot-grown *coffea canephora pierre*. **Trees**, Berlin, DE. v. 16, p. 555–558, 2002.

DAVIS, A.P. *Psilanthusmannii*, the Type Species of *Psilanthus*, Transferred to *Coffea*. **Nordic Journal of Botany**, Copenhagen, DK. v. 29, p. 471–472, 2011

DETMANN, K. C., ARAÚJO, W. L., MARTINS, S. C., SANGIARD, L. M., REIS, J. V., DETMANN, E., ... & DAMATTA, F. M. Silicon nutrition increases grain yield, which, in turn, exerts a feed-forward stimulation of photosynthetic rates via enhanced mesophyll conductance and alters primary metabolism in rice. **New Phytologist**, Cambridge, UK. v. 196, p. 752-762, 2012.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solos. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos**: Rio de Janeiro, 1999.

EPSKAMP, S., CRAMER, A. O. J., WALDORP, L. J., SCHMITTMANN, V. D., BORSBOOM, D. qgraph: Network Visualizations of Relationships in Psychometric Data. **Journal of Statistical Software**, California, LA. v. 48, p. 1-18. 2012.

FAROOQ, M., WAHID, A., KOBAYASHI, N. S. M. A., FUJITA, D. B. S. M. A., & BASRA, S. M. A. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. **Sustainable agriculture**, Binghamton, NY. p. 153-188, 2009.

FENG, J., SHI, Q., WANG, X., WEI, M., YANG, F., XU, H. Silicon supplementation ameliorated the inhibition of photosynthesis and nitrate metabolism by cadmium (Cd) toxicity in *Cucumis sativus* L. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, NL. v. 123, p. 521–530. 2010.

FERRAZ, R. L. D. S., MACEDO BELTRÃO, N. E. D., MELO, A. S. D., MAGALHAES, I. D., FERNANDES, P. D., & ROCHA, M. D. S. Trocas gasosas e eficiência fotoquímica de cultivares de algodoeiro herbáceo sob aplicação de silício foliar. **Semina-ciencias Agrarias**, Londrina, PR, p. 735-748, 2014.

FERREIRA, G. F. P., LEMOS, O. L., SORATTO, R. P., & PERDONÁ, M. J. Spatial variability of leaf macronutrient concentration and fruit production of an Arabica coffee plantation using two sampling densities. **Precision Agriculture**, Dordrecht, NL. v. 23, p. 1473-1488, 2022.

FERREIRA, S. M. **Efeito do silício na cultura do algodoeiro (*Gossipium hirsutum* L.)**: aspectos bioquímicos, qualidade de fibra e produtividade. 2008. Tese (Doutorado em Ecologia Aplicada) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo, Piracicaba.

FERREIRA, E.B., CAVALCANTI, P.P; NOGUEIRA, D. **A ExpDes.pt: Pacote Experimental Designs (Portugues)**. Alfenas, MG. R package version 1.2.2. 2021. <https://CRAN.R-project.org/package=ExpDes.pt>

FONTES PCR; ARAÚJO C. **Adubação nitrogenada de hortaliças: princípios e práticas com o tomateiro**. Lavras, MG. UFV, 2007

GALLO, P. B., RAIJ, B. V., QUAGGIO, J. A., & PEREIRA, L. C. E. Resposta de cafezais adensados à adubação NPK. **Bragantia**, Campinas, SP. v. 58, p. 341-351, 1999.

GAO, X., ZOU, C., WANG, L., & ZHANG, F. Silicon decreases transpiration rate and conductance from stomata of maize plants. **Journal of Plant Nutrition**, New York, US. v. 29, n. 9, p. 1637-1647, 2006.

GONG, H.; ZHU, X.; CHEN, K.; WANG, S. & ZHANG, C. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. **Plant Science**, Limerick, IE. v.169, p.313-321, 2005.

GOUSSAIN, M. M; MORAES, J. C.; CARVALHO, J. G.; NOGUEIRA, N. L.; ROSSI, M. L. Efeito da Aplicação de Silício em plantas de milho no desenvolvimento biológico da Lagarta-do-Cartucho *Spodoptera frugiperda* (J.E.Smith) (Lepidoptera: Noctuidae). **Neotropical Entomology**, Londrina, PR. v. 31, 305-310, 2002.

GUNTZER, F., KELLER, C., MEUNIER, J.D. Benefits of plant silicon for crops: a review. **Agronomy for Sustainable Development**. Paris, FR. v. 32, p. 201-213. 2012.

HAILE, M.; KANG, W. H. Isolation, identification, and characterization of pectinolytic yeasts for starter culture in coffee fermentation. **Microorganisms**, Basel, CH. v. 7, p. 401, 2019.

HATTORI, T.; INANAGA, S.; ARAKI, H.; NA, P.; MORITA, S.; LUXOVÁ, M.; LUX, A. Application of silicon enhanced drought tolerance in *Sorghum bicolor*. **Physiologia Plantarum**, Oxford, UK. v.123, p.459-466, 2005.

KASSAMBARA A. ggpubr: 'ggplot2' Based, 2020. **Publication Ready Plots**. Marseille, FR. R package version 0.4.0. <https://CRAN.R-project.org/package=ggpubr>

KELLER, C., RIZWAN, M., DAVIDIAN, J.-C., POKROVSKY, O., BOVET, N., CHAURAND, P., MEUNIER, J.D. Effect of silicon on wheat seedlings (*Triticum turgidum* L.) grown in hydroponics and exposed to 0 to 30 μ M Cu. **Planta**, Berlin, DE. v. 241, p. 847–860. 2015.

KORNDÖRFER, G. H. Uso de Silício na Agricultura. **Informações Agronômicas**. Piracicaba, SP. n. 117. p. 9- 11, 2007.

LIMA FILHO, O. F. Aspectos Gerais sobre o Silício em Solos, Plantas e Animais. *In*: RODRIGUES, F. A. (Ed.). **Silício na Agricultura**: anais do V Simpósio Brasileiro sobre silício na agricultura. Viçosa: UFV, 2010. p. 47-60.

LIU, C., WANG, Y., PAN, K., JIN, Y., LI, W., & ZHANG, L. Effects of phosphorus application on photosynthetic carbon and nitrogen metabolism, water use efficiency and growth of dwarf bamboo (*Fargesia rufa*) subjected to water deficit. **Plant Physiology and Biochemistry**, Paris, FR. v. 96, p. 20-28, 2015.

MA, J.F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science**, Oxford, UK. v. 11, p. 392-397, 2006.

MAIA JÚNIOR, S. D. O.; DE ANDRADE, J. R.; DE SOUSA FERREIRA, R.; DE ARAÚJO, D. L.; GUERRA, H.O. C.; DA SILVA, F. G. Teores de pigmentos, fluorescência da clorofila a e índice SPAD em cultivares de girassol sob regimes hídricos. **Agrarian**, Dourados, MS. v. 10, p. 105-112, 2017

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional de plantas**: princípios e aplicações. Piracicaba: Potafós, 1997. 308 p.

MARCHIORI, P.E.R.; MACHADO, E.C.; RIBEIRO, R.V. Photosynthetic limitations imposed by self-shading in field-grown sugarcane varieties. **Field Crops Research**, Amsterdam, NL v. 155, p. 30-37, 2014.

MATIELLO, J.B.; SANTINATO, R.; GARCIA, A.W.R.; ALMEIDA, S.R.; FERNANDES, D.R. **Cultura de Café no Brasil**: Manual de recomendações. Rio de Janeiro: MAPA/PROCAFÉ, 2010. 542 p.

MAUAD, M. **Desenvolvimento e marcha de absorção de silício em plantas de arroz sob condições de déficit hídrico e adubação silicatada**. 2006. 107 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP, Campus de Botucatu, Botucatu, 2006.

MENEGALE, M. L. C. **Resposta de plantas de cobertura a doses de silício e estresse hídrico**. 2012. 104 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, Campus de Botucatu, Botucatu, 2012.

NUNES-NESI, A.; FERNIE, A.R.; STITT, M. Metabolic and signaling aspects underpinning the regulation of plant carbon nitrogen interactions. **Molecular Plant**, Oxford, UK. v. 3, p. 973-996, 2010.

OLIVEIRA, I. P.; OLIVEIRA, L. C.; DE MO, C. S. F. T. Cultura de café: histórico, classificação botânica e fases de crescimento. **Revista Eletrônica Faculdade Montes Belos**, Brasília, DF. v. 5, n. 4, 2012.

PAIVA, R.; OLIVEIRA, L. M. **Fisiologia e produção vegetal**. Lavras: UFLA, 2006. 104 p.

PARECIDO, R. J., SORATTO, R. P., GUIDORIZZI, F. V., PERDONÁ, M. J., & GITARI, H. I. Soil application of silicon enhances initial growth and nitrogen use efficiency of Arabica coffee plants. **Journal of Plant Nutrition**, New York, US. v. 45, p. 1061-1071, 2022.

PARECIDO, R. J., SORATTO, R. P., PAULA, R. A., PERDONÁ, M. J., MANCUSO, M. A. C., & ABRANCHES, J. L. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 42., 2018, Serra Negra. **Anais [...]** Brasília, DF: Embrapa Café, 2018.

PEIXOTO, C. P. **Curso de fisiologia vegetal**. Cruz das Almas: UFRB, 2011. 177 f.

PELOSO, A. F., TATAGIBA, S. D., & AMARAL, J. F. T. Limitações do crescimento vegetativo em cafeeiro arábica promovido pelo déficit hídrico. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG. v. 25, p. 139-147, 2017.

PINTO, D. G., AGUILAR, M. A. G., SOUZA, C. A. S., SILVA, D. M., SIQUEIRA, P. R., CAO, J. R., & ZANETTI, L. V. Alterações fisiológicas após aplicação de silício em cacau e sua influência na preferência por pulgões. **Revista Ceres**, Viçosa, MG. v. 59, p. 360-367, 2012.

RAIJ, B. van; COSTA, W.M. da; IGUE, T.; SERRA, J.R.M.; GUERREIRO, G. Calagem e adubação nitrogenada e potássica para o cafeeiro. **Bragantia**, Campinas, SP. v. 55, p. 347-355, 1996.

RAMOS, A. R. P.; SANTOS, R. L.; AMARO, A. C. E.; FUMES, L. A. A.; BOARO, C. S. F.; CARDOSO, A. I. I. Eficiência do silicato de potássio no controle do oídio e no desenvolvimento de abobrinha de moita. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF. v. 31, p. 432-438, 2013

REICHARDT, K., SILVA, A. L. D., FENILLI, T. A. B., TIMM, L. C., BRUNO, I. P., & VOLPE, C. Relação entre a adubação nitrogenada e as condições hídricas do solo para um cafezal de Piracicaba, SP. **Coffee Science**, Lavras, v. 4, n. 1, p. 41-55, jan./jun. 2009.

RIBEIRO, A. F. F., MATSUMOTO, S. N., RAMOS, P. A. S., SANTOS, J. L. D. D., TEIXEIRA, E. C., D'ARÊDE, L. O., & VIANA, A. E. S. Paclobutrazol e restrição hídrica no crescimento e desenvolvimento de plantas de café. **Coffee Science**, Lavras, MG. v. 12, 2017.

SAKIYAMA, N.; MARTINEZ, H.; TOMAZ, M.; BORÉM, A. **Café Arábica: do plantio à colheita**. 22.ed. Viçosa: UFV, 2015. 316 p.

SANGOI, L.; ERNANI, P.R.; LECH, V.A.; RAMPAZZO, C. Lixiviação de nitrogênio afetada pela forma de aplicação da ureia e manejo dos restos culturais de aveia em dois solos com texturas contrastantes. **Ciência Rural**, Santa Maria, RS. v.33, p.65-70, 2003.

SANTOS, R. F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB. v. 2, p. 287-294, 1998

SCHLOERKE, B.; COOK, D.; LARMARANGE, J.; BRIATTE, F.; MARBACH, M.; THOEN, E.; ELBERG, A.; CROWLEY, J. **GGally**: extension to 'ggplot2'. R package version 2.1.2. Virginia, US. 2021.

SHI, Y., ZHANG, Y., YAO, H., WU, J., SUN, H., & GONG, H. Silicon improves seed germination and alleviates oxidative stress of bud seedlings in tomato under water deficit stress. **Plant Physiology and Biochemistry**, Paris, FR. v. 78, p. 27-36, 2014.

SILVA, E. A.; MAZZAFERA, P. Influences of temperature and water in the coffee culture. **The Americas Journal of Plant Science and Biotechnology**, Japão, JP. v. 2, p. 32-41, 2008

SILVA, E. S. **Efeito das concentrações de nitrogênio e silício em plantas de milho e de trigo sob cultivo hidropônico**. 2013. 68 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, 2013.

SILVA, J. G. F.; REIS, E. F. Irrigação do cafeeiro conilon. *In*: FERRÃO, R. G. et al. **Café conilon**. Vitória: Incaper, 2007. p. 345-389.

SILVEIRA, P. M. da; BRAZ, A. J. B. P.; DIDONET, A. D. Uso do clorofilômetro como indicador da necessidade de adubação nitrogenada em cobertura no feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Rio de Janeiro, RJ. v. 38, p. 1083-1087, 2003.

SOUZA, B. P., MARTINEZ, H. E. P., DE CARVALHO, F. P., LOUREIRO, M. E., & STURIÃO, W. P. Gas exchanges and chlorophyll fluorescence of young coffee plants submitted to water and nitrogen stresses. **Journal of Plant Nutrition**, Paris, FR. v. 43, p. 2455-2465, 2020.

SUN, Y., WANG, M., MUR, L. A. J., SHEN, Q., & GUO, S. Unravelling the roles of nitrogen nutrition in plant disease defences. **International journal of molecular sciences**, Basel, CH. v. 21, p. 572, 2020.

TAIZ, L., ZEIGER, E., MØLLER, I. M., & MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Porto Alegre, RS. Artmed Editora, 2017.

TAKAHASHI, E.; MA, J.F.; MIYAKE, Y. The possibility of silicon as an essential element for higher plants. **Comments on Agricultural and Food Chemistry**, Washington, DC. v. 2, p. 99-122. 1990.

THOMAZIELLO, R. A.; TOLEDO FILHO, J. A. DE; LORENA NETO, B. Café de São Paulo. *In*: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 1., 2000, Poços de Caldas. **Resumos expandidos** [...] Brasília, D.F.: Embrapa Café; Belo Horizonte: Minasplan, 2000. 2v. (1490p.), p. 1469-1472.

VIEIRA, E. L., DE SOUZA, G. S., DOS SANTOS, A. R., & DOS SANTOS SILVA, J. **Manual de fisiologia vegetal**. São Luís: Edufma. 2010.

WICKHAM H. **ggplot2**: Elegant Graphics for Data Analysis. New York: Springer-Verlag, 2016.