



PAULO HENRIQUE FROIS CORREA BARROS

**O BORO FOLIAR AUXILIA A RESILIÊNCIA DE
CULTIVARES DE SOJA AO ESTRESSE AMBIENTAL?**

**LAVRAS - MG
2024**

PAULO HENRIQUE FROIS CORREA BARROS

**O BORO FOLIAR AUXILIA A RESILIÊNCIA DE CULTIVARES DE SOJA AO
ESTRESSE AMBIENTAL?**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Adriano Teodoro Bruzi
Orientador

Prof. Dr. Paulo Eduardo Ribeiro Marchiori
Coorientador

Prof. Dr. Silvino Guimarães Moreira
Coorientador

**LAVRAS - MG
2024**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA,
com dados informados pelo (a) autor(a)**

Barros, Paulo Henrique Frois Correa.

O boro foliar auxilia a resiliência de cultivares de soja ao estresse ambiental? / Paulo Henrique Frois Correa Barros. - 2024.

105 p. : il.

Orientador(a): Adriano Teodoro Bruzi.

Coorientador(a): Paulo Eduardo Ribeiro Marchiori, Silvino Guimarães Moreira.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2024.

Bibliografia.

1. Épocas de aplicação. 2. Fontes de boro. 3. Micronutrientes. I. Bruzi, Adriano Teodoro. II. Marchiori, Paulo Eduardo Ribeiro. III. Moreira, Silvino Guimarães. IV. Título.

O conteúdo desta obra é de responsabilidade do(a) autor(a) e de seu orientador(a).

PAULO HENRIQUE FROIS CORREA BARROS

**O BORO FOLIAR AUXILIA A RESILIÊNCIA DE CULTIVARES DE SOJA AO
ESTRESSE AMBIENTAL?**

**DOES FOLIAR BORON HELP THE RESILIENCE OF SOYBEAN CULTIVARS TO
ENVIRONMENTAL STRESS?**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 17 de julho de 2024

Dr. Paulo Eduardo Ribeiro Marchiori UFLA

Dr. Alexandre Alves de Carvalho UFLA

Dr. Willian Rodrigues Macedo UFSC

Prof. Dr. Adriano Teodoro Bruzi
Orientador

Prof. Dr. Paulo Eduardo Ribeiro Marchiori
Coorientador

Prof. Dr. Silvino Guimarães Moreira
Coorientador

**LAVRAS – MG
2024**

À minha família, minha mãe Maria Cristina Frois Correa Barros, meu Pai Paulo de Araújo Barros Filho, ao meu irmão Luís Guilherme Frois Correa Barros, e a minha namorada Cecília Baldoino Ferreira por todo o apoio, estímulo aos estudos e por sempre confiarem e acreditarem em mim!

Aos demais familiares tios, primos e amigos por sempre estarem presentes na minha vida e me apoiarem nas minhas decisões.

E sobretudo, a Deus.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro a Deus, pelo dom da vida, por iluminar meu caminho me guiando, me protegendo e proporcionando sempre o amanhã.

Agradeço também aos meus pais, Paulo de Araujo Barros Filho, minha mãe Maria Cristina Frois Correa Barros, ao meu irmão Luis Guilherme Frois Correa Barros, a minha namorada Cecília Baldoino Ferreira, aos meus familiares e amigos, que sempre me apoiaram e estiveram ao meu lado.

A Universidade Federal de Lavras pela infraestrutura, recursos, oportunidades acadêmicas e ensino de excelência proporcionadas durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos órgãos de fomento a educação (Capes e FAPEMIG), que apoiaram o presente trabalho me concedendo a bolsa, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Aos conselhos, amizade, ensinamentos e direcionamentos do meu orientador Adriano Teodoro Bruzi, por sempre me inspirar a buscar a melhor versão de mim.

Aos meus coorientadores Paulo Eduardo Ribeiro Marchiori e Silvino Guimarães Moreira por contribuírem com esta pesquisa, sempre esclarecendo as dúvidas e fornecendo ideias fundamentais para a pesquisa.

Aos amigos e colegas “Pesquisa Soja” pelo suporte, pelos ensinamentos, aprendizados e momentos de descontração.

Aos meus amigos Carlos Henrique Milagres, Mateus Piza, Tais Teixeira, Fernando Marques Junior e Marlí dos Santos pelo companheirismo e amizade.

Muito obrigado!

RESUMO

Dentre os micronutrientes, o boro vem recebendo atenção devido a sua importância na fase reprodutiva das plantas, visto que atua em processos metabólicos considerados essenciais. Porém, o manejo da adubação com boro deve ser cuidadoso, pois a faixa entre a deficiência e toxidez é estreita quando comparada aos demais nutrientes. Apesar dos inúmeros trabalhos desenvolvidos com micronutrientes, dúvidas ainda emergem a respeito do efeito das fontes, bem como a época mais adequada de aplicação. Sendo assim, objetivou-se quantificar a eficiência do emprego de boro na soja, associado à aplicação em diferentes estádios fenológicos visando à mitigação ao estresse hídrico bem como incremento na produtividade de grãos, utilizando diferentes ambientes de produção. O experimento de campo foi conduzido em dois anos agrícolas, no município de Ijaci-MG. Além disso, foi realizado um experimento em casa de vegetação, conduzido em Lavras-MG. Em campo foi adotado o delineamento em blocos completos casualizados, em esquema fatorial triplo, sendo adotado três cultivares com grupos de maturidade relativa distintos, com semeadura em faixas. Como manejo, foram as fontes Boro-MEA (0,5L/ha), Ácido bórico (700 g/ha) em duas épocas de aplicação, no estágio vegetativo (V6/Vn) e outra no reprodutivo (R1/R2), e o controle (água); e o terceiro fator foram os dois anos agrícolas. Foram avaliados os caracteres agronômicos altura de planta, inserção da primeira vagem, dias para maturação, índice de acamamento, produtividade de grãos, bem como os componentes de produção. Além dos caracteres agronômicos, foram realizadas as análises fisiológicas para quantificação de proteínas, prolina, peroxidação de hidrogênio e malondialdeído, composição mineral nas folhas e teor relativo de clorofilas. Em casa de vegetação, foi adotado o delineamento em blocos casualizados, em fatorial triplo, sendo os fatores (i) investimento em fertilidade do solo (alto e baixo), (ii) tratamentos (fontes de boro e suas épocas de aplicação e (iii) cultivares. O controle da disponibilidade hídrica foi realizado para indução do déficit hídrico a partir do estágio V3 até R4. As análises estatísticas foram realizadas no ambiente computacional R, sendo feito análise conjunta dos dados, análise de correlação e de PCA. A aplicação de boro foliar nos estádios de V6/Vn e R1/R2 é alternativa promissora para alterar a plasticidade fenotípica dos componentes de produção e por consonância, propiciar ganhos na produtividade de grãos na cultura da soja, além de contribuir com a resiliência às condições de déficit hídrico.

Palavras-chave: Épocas de aplicação. Fontes de boro. Grupos de maturação. Micronutriente. Sistemas de produção.

ABSTRACT

Among micronutrients, boron has received attention due to its importance in the reproductive phase of plants, as it acts on metabolic processes considered essential. However, management of boron fertilization must be careful, as the range between deficiency and toxicity is narrow when compared to other nutrients. Despite the numerous studies carried out with micronutrients, doubts still arise regarding the effect of the sources, as well as the most appropriate time of application. Therefore, the objective was to quantify the efficiency of boron use in soybeans, associated with application at different phenological stages aiming to mitigate water stress as well as increase grain yield, using different production environments. On the field experiment was conducted over two crop season, in the municipality of Ijaci-MG. Furthermore, an experiment was carried out in a greenhouse, conducted in Lavras-MG. In the field, a randomized complete block design was adopted in a triple factorial scheme, with three cultivars with different relative maturity groups adopted, with sowing in strips. As management, the sources were Boron-MEA (0.5L/ha), Boric acid (700 g/ha) in two application times, in the vegetative stage (V6/Vn) and another in the reproductive stage (R1/R2), and control (water); and the third factor was the two agricultural years. The agronomic traits of plant height, insertion of the first pod, days to maturation, lodging index, grain productivity, as well as production components were evaluated. In addition to agronomic characters, physiological analyzes were carried out to quantify proteins, proline, hydrogen peroxidation and malondialdehyde, mineral composition in the leaves and relative chlorophyll content. In a greenhouse, a randomized block design was adopted, in a triple factorial, with the factors being (i) investment in soil fertility (high and low), (ii) treatments (boron sources and their application times and (iii)) cultivars. Control of water availability was carried out to induce water deficit from stage V3 to R4. Statistical analyzes were carried out in the R computing environment, with joint analysis of data, correlation analysis and PCA. Leaf boron at the V6/Vn and R1/R2 stages is a promising alternative to alter the phenotypic plasticity of production components and, consequently, provide gains in grain productivity in soybean, in addition to contributing to resilience to water deficit conditions.

Keywords: Application moments. Boron sources. Maturity groups. Micronutrient. Production systems.

INDICADORES DE IMPACTO

A cultura da soja é uma das mais importantes no mundo por ser fontes de alimentação humana e animal, interferindo na segurança alimentar. Além de seu impacto na economia, por ser um dos principais produtos agrícolas nos países como Brasil, Estados Unidos e Argentina, sendo importante fonte de receita. E do ponto de vista sustentável, a cultura da soja pode ser utilizada como fonte de biocombustível, reduzindo o uso de combustíveis fósseis. Com o aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera terrestre, o número e o período de duração de eventos climáticos extremos tem aumentado. Nesse sentido, para reduzir os efeitos ambientais sobre a cultura da soja, estratégias de manejo para mitigar o estresse são necessárias. E a aplicação foliar de boro, mostra-se uma alternativa promissora. Com isso, o objetivo do trabalho foi quantificar a eficiência do emprego de boro na soja, associado à aplicação em diferentes estádios fenológicos visando à mitigação ao estresse hídrico bem como incremento na produtividade de grãos, utilizando diferentes ambientes de produção. Os resultados obtidos comprovam que a aplicação de boro foliar nos estádios de V6/Vn e R1/R2 figura-se como alternativa promissora para alterar a os caracteres fenotípicos da cultura da soja, como os componentes de produção e por consonância, propiciar ganhos na produtividade de grãos na cultura da soja. A aplicação de boro em pré-florescimento e florescimento, permite que as cultivares de soja com grupos de maturação distintos, obtenham resiliência à condições de déficit hídrico. As condições de fertilidade do solo, interferem no desenvolvimento das cultivares de soja em déficit hídrico, mesmo com a suplementação foliar de boro. O boro, propicia a maior produção de prolina e proteínas nas folhas, que contribuem sobremaneira para a redução do estresse da planta de soja. Com os resultados do trabalho, o produtor rural e toda cadeia agrônômica, será impactada positivamente, pois permitirá superar momentos de déficit hídrico, altas temperaturas e de baixa fertilidade. E produzindo de forma eficiente e sustentável, contribuindo com a redução da fome no mundo e economia de recursos finitos no planeta, como os fertilizantes agrícolas.

IMPACT INDICATOR

Soybean cultivation is one of the most important in the world due to its role as a source of human and animal nutrition, directly impacting food security. In addition to its economic impact, soybeans are among the main agricultural products in countries like Brazil, the United States, and Argentina, serving as an important source of revenue. From a sustainability perspective, soybean cultivation can also be used as a source of biofuel, reducing the reliance on fossil fuels. With the increase in greenhouse gas concentrations in the Earth's atmosphere, the frequency and duration of extreme weather events have risen. In this context, management strategies to mitigate stress on soybean crops are necessary to reduce environmental impacts. Foliar application of boron has emerged as a promising alternative. The objective of this study was to quantify the efficiency of boron application in soybeans, associated with application at different phenological stages, aiming at mitigating water stress and increasing grain yield across different production environments. The results confirmed that foliar application of boron at the V6/Vn and R1/R2 stages is a promising alternative for altering the phenotypic characteristics of soybean crops, such as production components, and consequently, enhancing grain yield. Applying boron during the pre-flowering and flowering stages allows soybean cultivars with different maturity groups to develop resilience to water deficit conditions. Soil fertility conditions influence the development of soybean cultivars under water deficit, even with foliar boron supplementation. Boron promotes increased production of proline and proteins in the leaves, which significantly contributes to reducing stress in soybean plants. Based on the results, it is expected that farmers and the entire agronomic chain will be positively impacted, as this will enable them to overcome periods of water deficit, high temperatures, and low soil fertility. By producing more efficiently and sustainably, they will contribute to reducing global hunger and conserving finite resources on the planet, such as agricultural fertilizers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Localização dos experimentos de campo durante os anos agrícolas de 2022/23 e de 2023/24.	35
Figura 2 – Dados meteorológicos do município de Ijaci -MG entre outubro de 2022 e março de 2024, (A) coeficiente de cultivo da soja-Kc, precipitação, temperatura máxima, média e mínima; (B) insolação total mensal e umidade relativa do ar.	36
Figura 3 – Localização do experimento de casa de vegetação no município de Lavras, no setor de grandes culturas – DAG/ESAL.....	47
Figura 4 – Regime hídrico empregado sobre o experimento de casa de vegetação, nas condições de alta e baixa fertilidade.....	49
Figura 5 – Correlação dos caracteres agronômicos, dos experimentos de campo das safras de 2022/23 e 2023/24.	60
Figura 6 – Análise de PCA, dos caracteres agronômicos, dos experimentos de campo das safras de 2022/23 e 2023/24; em função dos tratamentos e cultivares.	63
Figura 7 – Correlação dos caracteres fisiológicos, dos experimentos de campo das safras de 2022/23 e 2023/24.	65
Figura 8 – Análise de PCA, das dos caracteres fisiológicos, dos experimentos de campo das safras de 2022/23 e 2023/24.	67
Figura 9 – Correlação das análises nutricionais com o boro, e produtividade (Kg/ha) do experimento de campo da safra de 2022/23.	68
Figura 10 – Correlação dos caracteres agronômicos, do experimento em casa de vegetação, com condições de alto investimento em fertilidade do solo.....	77
Figura 11 – Análise de PCA, dos caracteres agronômicos, do experimento em casa de vegetação, com condições de alto investimento em fertilidade do solo.....	79
Figura 12 – Correlação dos caracteres fisiológicas, do experimento em casa de vegetação, com condições de alto investimento em fertilidade do solo.....	82
Figura 13 – Análise de PCA, dos caracteres fisiológicos, do experimento em casa de vegetação, com condições de alto investimento em fertilidade do solo.....	84
Figura 14 – Correlação dos caracteres agronômicos, do experimento em casa de vegetação, com condições de baixo investimento em fertilidade do solo.....	86
Figura 15 – Análise de PCA, dos caracteres agronômicos, do experimento em casa de vegetação, com condições de baixo investimento em fertilidade do solo.	88

Figura 16 – Correlação dos caracteres fisiológicos, do experimento em casa de vegetação, com condições de baixo investimento em fertilidade do solo.	90
Figura 17 – Análise de PCA, dos caracteres fisiológicos, do experimento em casa de vegetação, sob condições de baixo investimento em fertilidade do solo.	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização química e física do solo de Ijaci-MG, CDTT/UFLA, nos anos agrícolas de 2022/2023 e 2023/2024.....	37
Tabela 2 - Tratamentos aplicados via pulverização foliar, nos experimentos durante as safras de 2022/23 e 2023/24.	38
Tabela 3 - Cultivares de soja e os seus respectivos grupos de maturação relativos, adotados durante as safras de 2022/23 e 2023/24.....	38
Tabela 4 - Caracterização química e física do solo de alto investimento e baixo investimento respectivamente, do experimento em casa de vegetação.....	48
Tabela 5 - Resumo da análise de variância (ANAVA) das variáveis agronômicas e bioquímicas, pelo teste de razão de verossimilhança dos experimentos de campo, realizados nas safras de 2022/23 e 2023/24, no município de Ijaci-MG.	57
Tabela 6 – Resumo da análise de variância (ANAVA), pelo teste LRT (Teste de razão de verossimilhança) do experimento realizado na casa de vegetação, no município de Lavras-MG, não ano agrícola 2022/23, para as condições de alto investimento na fertilidade do solo.	73
Tabela 7 – Resumo da análise de variância (ANAVA), pelo teste LRT (Teste de razão de verossimilhança) do experimento realizado na casa de vegetação, no município de Lavras-MG, não ano agrícola 2022/23, para as condições de baixo investimento na fertilidade do solo.	74

LISTA DE ABREVIACÕES

V6	Estádio fenológico da cultura da soja da sexta folha trifoliolada está com seus trifoliolos expandidos
Vn	Estádio fenológico da cultura da soja da enésima folha trifoliolada está com seus trifoliolos expandidos
R1	Estádio fenológico da cultura da soja do início do florescimento, com uma flor aberta.
R6	Estádio fenológico da cultura da soja com a semente com granação completa
R8	Estádio fenológico da cultura da soja de maturidade plena
ALT-V6	Altura de plantas no estágio de V6
ALT-R1	Altura de plantas no estágio de R1
ALT-R6	Altura de plantas no estágio de R6
ALT-R8	Altura de plantas no estágio de R8
AIPV	Altura de inserção da primeira vagem
DPM	Dias para maturação absoluta
ACAM	Índice de acamamento
MFF R6	Massa fresca da parte aérea no estágio de R6
MFR R6	Massa fresca do sistema radicular no estágio de R6
MSF R6	Massa seca da parte aérea no estágio de R6
MSR R6	Massa seca do sistema radicular no estágio de R6
NRL	Número de ramos laterais
NVC1	Número de vagens com 1 grão
NVC2	Número de vagens com 2 grãos
NVC3	Número de vagens com 3 grãos
NVC4	Número de vagens com 4 grãos
NVT	Número de vagens total
NG/V	Número de grãos por vagem
PMG	Peso de mil grãos
PROD	Produtividade
PRODG	Produção com 13% de umidade
MDA-V6	Malondialdeído no estágio de V6
MDA-R1	Malondialdeído no estágio de R1
H ₂ O ₂ -V6	Peróxido de hidrogênio no estágio de V6
H ₂ O ₂ -R1	Peróxido de hidrogênio no estágio de R1
PRO-V6	Prolina no estágio de V6
PRO-R1	Prolina no estágio de R1
PTN-V6	Proteínas solúveis totais no estágio de V6
PTN-R1	Proteínas solúveis totais no estágio de R1
SPAD-V6	Índice SPAD no estágio de V6
SPAD-R1	Índice SPAD no estágio de R1

SPAD-R6	Índice SPAD no estágio de R6
PCA	Análise de componentes principais
PC1	Primeiro componente principal
PC2	Segundo componente principal
LRT	Teste de Razão de Verossimilhança
ANAVA	Análise de variância
EROS	Espécies reativas de oxigênio
ATP	Adenosina Trifosfato
boro-MEA	boro com nitrogênio - bortrac
Ac bórico	Ácido bórico
H ₃ BO ₃	Ácido bórico
ns	Não significativo
N	Nitrogênio
P	Fósforo
K	Potássio
Ca	Cálcio
Mg	Magnésio
S	Enxofre
Fe	Ferro
Mn	Manganês
Cu	Cobre
Zn	Zinco
B	Boro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
2	REFERENCIAL TEÓRICO	28
2.1	Adubação via foliar	28
2.2	Fontes de boro.....	28
2.3	Épocas de aplicação do boro.....	31
2.4	Demanda hídrica na cultura da soja.....	32
2.5	Estratégias para superar o déficit hídrico.....	32
2.6	Sistema de produção de soja.....	34
3	MATERIAL E MÉTODOS	35
3.1	Experimentos de Campo	35
3.1.1	Localização e implantação dos experimentos de campo	35
3.1.2	Planejamento experimental	37
3.1.3	Avaliações dos caracteres fenotípicos	39
3.1.4	Avaliações Bioquímicas.....	40
3.1.5	Análises estatísticas dos experimentos de campo	42
3.1.5.1	Análise dos componentes principais	44
3.1.5.2	Análise estatística das variáveis nutricionais	45
3.1.6	Procedimentos computacionais dos experimentos de campo	46
3.2	Experimento de Casa de vegetação.....	47
3.2.1	Localização e implantação do experimento de casa de vegetação	47
3.2.2	Planejamento experimental	47
3.2.3	Avaliações dos caracteres fenotípicos	50
3.2.4	Avaliações Bioquímicas.....	50
3.2.5	Análises estatísticas do experimento em casa de vegetação.....	52
3.2.5.1	Seleção de variáveis do experimento de casa de vegetação.....	52
3.2.5.2	Análise de componentes principais	54
3.2.6	Aspectos computacionais	54
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4.1	Experimento em Campo	55
4.2	Experimento em casa de vegetação.....	71
4.2.1	Condições de solo de alto investimento em fertilidade do solo.....	76
4.2.2	Condições de baixo investimento em fertilidade do solo.....	85
5	CONCLUSÕES.....	93
6	REFERÊNCIAS	94

1. INTRODUÇÃO

A maioria dos solos brasileiros são pobres quimicamente, por isso, a construção da fertilidade do perfil do solo, com calagem, gessagem e aplicação de macro e micronutrientes na quantidade e época correta é ponto chave para o sucesso dos sistemas de produção de grãos nas condições tropicais (Vani, 2022). Nesse sentido, o emprego de fertilizantes vem sendo pauta cada vez mais relevante, principalmente com a alta dos preços dos insumos agrícolas, que por consonância incrementaram o custo de produção e com isso, remetem que produtor deva ser mais eficiente e acurado no emprego de seus insumos (Artuzo, 2015; Raggiabdallah *et al.*, 2020).

Dentre os micronutrientes o boro (B) merece destaque, devido a sua importância na fase reprodutiva e mobilidade no solo e planta; o mesmo atua em diversos processos metabólicos considerados essenciais, como transporte de açúcares, lignificação, estrutura da parede celular, metabolismo de carboidratos, metabolismo de RNA, respiração, metabolismo das Auxinas (AIA), metabolismo fenólico, metabolismo de ascorbato, síntese de proteínas, fixação de nitrogênio e participa da composição da parede celular e integridade da membrana plasmática (Silva *et al.*, 2017; Gomes *et al.*, 2017; Dameto *et al.*, 2023). Além disso, o boro é um micronutriente essencial para auxiliar na ligação cruzada do ramnogalacturonano II, um componente da parede celular, funcionalidade das membranas celulares e fixação de nitrogênio (Pawlowski *et al.*, 2019).

As funções e impactos da aplicação do boro variam com o método de aplicação, que pode ser via solo ou via foliar, no entanto, os efeitos das aplicações impactam nas plantas, pois a aplicação via solo na maioria das vezes possui efeito corretivo e via foliar efeito de suplementação (Tariq *et al.*, 2022). E as fontes que são utilizadas diferem quanto à concentração de boro, impactando assim nas estratégias de manejo, ação e desempenho na cultura (Dameto *et al.*, 2022).

Considerando o desempenho agrônômico, Silva *et al.* (2017), observaram que a produtividade de grãos da cultivar de soja NS5909 incrementou até as doses estimadas de 0,7 a 1,0 mg/dm³ de boro. Por outro lado, a aplicação de boro não resultou em diferença no número de inflorescências por planta, épocas de aplicação foliar de boro, número de vagens por planta, número de inflorescências e produtividade. Portanto, a aplicação foliar de boro nos estádios V4 (50%) + R1 (50%) e V4 (50%) + R3 (50%) aumentou os teores de boro na planta, enquanto em R1+R3 proporcionou o maior número de vagens iniciais. Entretanto, não houve efeito da

aplicação de boro na produtividade de grãos independente da época de aplicação (Schanoski, Souza *et al.*, 2022).

Em relação a época de aplicação na cultura da soja, as melhores respostas à aplicação de boro, ocorre entre Vn a R5 via foliar. A explicação para este fato pode estar alicerçada no fato de que nesses estádios as plantas necessitam de maiores quantidades de boro para a formação de legumes e enchimento de grãos (Raimundi *et al.*, 2013; Dias da Silva *et al.*, 2020).

Em relação ao desenvolvimento fenológico da cultura da soja, pode-se inferir que durante seu ciclo são requeridos cerca de 450 a 850 mm de água, a depender de alguns fatores como estágio fenológico, manejo empregado, condições edafoclimáticas e características intrínsecas da cultivar. A demanda requerida de água pela cultura da soja pode variar ainda de acordo com a época de semeadura, grupo de maturação e condições hídricas da região. A maior demanda de água ocorre na germinação e emergência (VE e VC), floração (R1 e R2) e no enchimento de grãos (R5.1 a R5.5), sendo a demanda por estádios fenológicos de 48, 92, 167, 43 mm respectivamente, somando um total de 351 mm durante seu ciclo de 118 dias após semeadura. (Barbieri, 2020; EMBRAPA, 2020).

Uma questão que surge então, seria quais as possíveis estratégias de manejo que poderiam ser empregadas visando aumentar a resiliência da cultura da soja no que tange a demanda hídrica. Neste sentido, verifica-se que a suplementação de boro via foliar foi capaz de amenizar os danos causados pela baixa disponibilidade de água na soja. Além disso, observou-se aumento de 42% na massa seca do sistema radicular, influência positiva na massa seca de vagens, índice de colheita e no número de grãos e de vagens por planta, nas plantas submetidas ao déficit hídrico e com a suplementação de boro em comparação ao controle (Júnior *et al.*, 2023).

E ainda que, o déficit hídrico quando em intensidade e duração suficiente, pode acarretar na quebra da homeostase redox, e com isso aumento da produção de espécies reativas de oxigênio (ERO's), que causa danos dentro da planta como degradação de lipídios, proteínas e DNA. Logo, o aumento no conteúdo de MDA e H₂O₂ em folhas e raízes de soja sob estresse hídrico, é perceptível, no entanto quando as plantas são suplementadas com boro, os danos oxidativos são reduzidos (Júnior *et al.*, 2023).

O boro é um nutriente essencial para a cultura da soja (Somavila *et al.*, 2022), porém, o manejo da adubação com este nutriente deve ser cuidadoso pois a faixa entre a deficiência e toxidez é estreita quando comparado aos demais nutrientes (Nasser *et al.*, 2021). Neste âmbito, apesar dos inúmeros trabalhos desenvolvidos com micronutrientes no Brasil, muitas dúvidas ainda emergem a respeito do efeito das fontes, bem como das doses e épocas de aplicação. No

que concerne o boro os ambientes de produção tais como solo de fertilidade construída ou área de abertura, e também condições de déficit hídrico devem ser estudados visando identificar o efeito positivo deste nutriente nos componentes de produção da cultura de soja e na produtividade de grãos de diferentes cultivares, bem como na maximização do aproveitamento da disponibilidade de água pela cultura.

Logo, objetivou-se quantificar a eficiência do emprego de boro na soja, associado à aplicação em diferentes estádios fenológicos visando à mitigação ao estresse hídrico bem como incremento na produtividade de grãos, utilizando diferentes ambientes de produção.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Adubação via foliar

A cultura da soja é extremamente importante para a economia brasileira, por isso realizar estudos que proporcionem o rendimento de grãos é necessário, como a aplicação de micronutrientes via foliar (Cerutti *et al.*, 2019). No entanto, por mais que tenhamos alguns resultados de trabalhos com micronutrientes e adubação foliar no Brasil, algumas dúvidas ainda surgem, como fonte, dose, época, modo e local correto de aplicação (Marques, 2019).

A adubação via foliar, é uma suplementação vantajosa no sentido de que os nutrientes são corrigidos rápido, absorvidos pela parte aérea das plantas, em quantidades controladas e em determinadas fases, bem como das folhas para as sementes, representando assim um método ecológico que pode ser utilizado para reduzir impactos negativos no solo e corrigir deficiências nutricionais (Bardas *et al.*, 2023).

Os produtos para adubação foliar geralmente são soluções aquosas contendo compostos de elementos minerais como ingredientes ativos, as doses são variáveis e geralmente baseadas na espécie de planta, as propriedades físico-químicas dos princípios ativos como, por exemplo, massa molar e solubilidade influenciarão a velocidade de absorção pelas folhas (Oliveira *et al.*, 2022).

Uma das vantagens da aplicação via foliar são: as doses são menores que a utilizada nas aplicações via solo; a distribuição é uniforme e fácil; as respostas aos nutrientes aplicados são imediatas, correção de deficiências facilitada durante cultivo e as suspeitas de deficiência são diagnosticadas mais facilmente (Kuraoka *et al.*, 2022). No entanto, as desvantagens quanto a adubação foliar, são a demanda de nutrientes é alta quando as plantas são pequenas e a superfície foliar é insuficiente para a absorção, a concentração excessiva de sais pode resultar em queimaduras nas folhas, adubação foliar apresenta baixo efeito residual, e ainda a absorção e movimentação dos nutrientes via foliar possui dificuldades (Niu *et al.*, 2021).

Sendo assim, o período em que os nutrientes são absorvidos em maior quantidade, corresponde à fase do desenvolvimento da planta em que as exigências nutricionais são maiores, esse período vai de V2 até R5. A velocidade de absorção aumenta durante a floração e início de enchimento dos grãos, assim como a translocação na planta nesse período (Stout, 2022).

2.2 Fontes de boro

A deficiência de boro é geral nos solos brasileiros, especialmente naqueles encontrados na região do Cerrado e em solos arenosos com baixos teores de matéria orgânica, onde o estresse

hídrico ocorre regularmente (Morais *et al.*, 2020). As condições que favorecem a deficiência de boro são o baixo teor de matéria orgânica (MO), tipo de solo, pH do solo, textura, estação muito seca, precipitação elevada, espécie de planta, o genótipo e também o fator mobilidade no solo, o qual o boro possui alta mobilidade, devido a característica da carga ser zero (Brdar-jkanovic, 2020).

O boro é classificado como micronutriente, sendo necessário para inúmeros processos fisiológicos. O boro é fundamental para as plantas, sua biodisponibilidade na água, no solo que está sendo cultivado é significativa, para a determinação do crescimento e da produtividade das culturas. Além disso, participa na regulação da integridade estrutural da membrana da parede celular e da membrana plasmática, mobilidade de íons através da membrana, divisão e alongamento celular, crescimento reprodutivo, síntese de biomoléculas, vias de carboidratos e proteínas, metabolismo de fenóis e auxinas, fixação de nitrogênio, resistência a doenças e gerenciamento de estresse abiótico (Kohli *et al.*, 2023).

Logo, para que o boro chegue na planta onde é necessário, é preciso saber qual fonte é mais adequada e atende melhor às necessidades da propriedade do produtor, as principais fontes encontradas no mercado são, ácido bórico (17% de Boro), Borato de monoetanolamina (8% de Boro), Borato de zinco (14% de Boro e 29% de Zinco), Bórax (10% de Boro), Colemanita (8% de Boro e 6% de Cálcio), Hidroborato (7% de Boro, 7% de Cálcio e 4% de Magnésio), Octaborato de Sódio (20% de Boro), Octaborato de potássio (19% de Boro e 18% de Potássio), Penta borato de sódio (18% de Boro), Quelato de Boro (8% de Boro) e Ulexita (8% de Boro, 7% de Cálcio e 6% de Sódio) (IPNI, 2018; Tomicioli *et al.*, 2021).

Assim, é realizado para compreender o efeito do nutriente nas plantas, a eficiência do boro nas culturas pode ser determinada, quando o boro é o nutriente limitante em relação aos demais componentes. Quando o boro se apresenta com alta disponibilidade, o nutriente permite que as culturas atinjam altas produções e desempenhem seu máximo potencial (Rerkasem *et al.*, 2020).

A aplicação de fertilizantes foliares a base de boro proporcionou aumento no número de vagens e a produtividade da soja, além disso boro via foliar altera os níveis nutricionais das sementes de soja, aumentando os teores de enxofre, nitrogênio e reduzindo os teores de fósforo, magnésio e cobre (Domingos *et al.*, 2021).

A aplicação de boro em diferentes dosagens exerceram efeitos significativos nas características da cultura, como, altura de plantas proporcionando aumento com relação à testemunha de 4 cm, o maior número de ramos, de vagens/ planta de 30,52 vagens, aumento do número de sementes/vagem de duas sementes para 3,5 sementes em relação a testemunha, além

de também o peso de 1.000 sementes acréscimo de quase 50 g a mais comparado ao tratamento sem boro, e a produtividade de sementes, aproximadamente uma tonelada a mais que a testemunha (Das *et al.*, 2022).

O boro também tem destacada importância nos processos de floração e fertilização das plantas, aumentando a produtividade e a qualidade da produção agrícola, sendo que a sua deficiência pode reduzir drasticamente a nodulação, o crescimento e a produção das leguminosas, devido ao fornecimento inadequado de carboidratos às bactérias nos nódulos radiculares e a conversão insuficiente de amido a açúcares solúveis (Pawlowski *et al.*, 2019).

O boro interferiu positivamente na taxa de germinação das sementes de soja, atingindo percentual máximo de germinação, enquanto a testemunha obteve germinação inferior ao tratamento com boro (Hamrcu *et al.*, 2019). O efeito de fontes de boro sobre a germinação de sementes, está associado a mobilidade da fonte aplicada, e a dosagem utilizada, segundo Gomes *et al.* (2020) quanto maior a dose de boro melhor a qualidade fisiológica, e a fase ideal de aplicação de boro para produção de sementes de alto vigor foi em R1, para produzir sementes de alta qualidade.

A exportação de boro em sementes não foi influenciada pelos tratamentos com boro, com valores variando entre 144,8 e 248,0 g ha⁻¹ e entre 208,9 e 302,1 g ha⁻¹ de boro nas safras conduzidas. Sendo a quantidade exportada de boro, em todas as doses, épocas, estação e método de aplicação, são suficientes para compensar as perdas de boro após a colheita (Silva *et al.*, 2020).

O uso extensivo de fertilizantes contendo boro na agricultura levou à produção diversificada destes fertilizantes. Dois produtos principais estão disponíveis como fertilizantes boratados, ácido bórico e bórax, que são solúveis. A solubilidade desses fertilizantes é uma vantagem, pois fornece facilmente boro para as plantas. Esses fertilizantes podem ser utilizados via foliar ou via solo, via foliar é uma opção viável devido à alta concentração desses fertilizantes, evitando a lixiviação consequente da carga zero, que pode ocorrer nos solos (Deshmukh *et al.*, 2020).

Em um experimento realizado com plântulas de girassol cultivadas em solução nutritiva, verificaram correlação positiva entre o rendimento de massa seca aérea, a concentração externa de boro e a concentração de boro nas plantas, sendo que a concentração crítica nas folhas para o crescimento do caule foi de 12 a 20 mg Kg⁻¹ de boro de massa seca, o boro adicionado estimulou a atividade meristemática das células, influenciando na elongação e diferenciação celular (Rios *et al.*, 2022). Com isso, é possível verificar a influência da fonte de Boro aplicada

nas plantas, em especial na soja, e quanto essa fonte impacta nos componentes de formação e produção das plantas.

2.3 Épocas de aplicação do boro

A cultura da soja possui exigências variáveis de boro de acordo com a fase do seu ciclo (vegetativo ou reprodutivo). Esse micronutriente está relacionado com a qualidade fisiológica da semente por atuar diretamente no crescimento do tubo polínico durante o processo de fecundação (Day *et al.*, 2020). E essa qualidade fisiológica de sementes, está ligada com a adubação boratada (Domingos *et al.*, 2021). O efeito da adubação com boro apresentou interação com a altura de planta, época de aplicação e doses, no entanto a altura de inserção da primeira vagem, não teve influência de época e doses de aplicação do boro (Saleem *et al.*, 2020).

A época de aplicação exerce influência na produtividade de grãos e produção de sementes, pois a época de maior demanda de nutrientes pelas plantas de soja ocorre nos estádios V4, R1, R3 a R5 (De Souza *et al.*, 2022). Porém, a época de maior carência de nutrientes pelas plantas de soja é no período reprodutivo, logo, como o boro possui baixa translocação na planta via floema, na medida que as plantas vão desenvolvendo, deve ser aportado nutrientes para as plantas, principalmente na fase de floração, ou pós floração, resultando efeitos no crescimento e rendimento de grãos na soja (Silva *et al.*, 2020).

A aplicação de boro com modulação de doses (0,5; 1,0; 1,5 e 2,0 Kg/ha) e épocas de aplicação (V4 e V4+R1) não afetaram os parâmetros agrônômicos de desenvolvimento da soja (Berti *et al.*, 2019). A adubação boratada via foliar não gerou interferência no desenvolvimento da soja. Outros autores, desde a década de noventa também já encontraram resultados semelhantes, não observando efeito benéfico do fertilizante foliar contendo boro, sobre o rendimento de soja, isso porque certas cultivares são pouco responsivas à adubação foliar ou o suprimento no solo (Ben *et al.*, 1993).

Porém, Amarilla *et al.* (2019), constataram que a adubação via foliar com micronutrientes, em especial o boro, quando aplicado em floração e pós floração, proporcionaram maior rendimento e geraram resultados positivos nas características agrônômicas, como altura, peso de mil grãos e número de vagens por planta. Logo, a época de aplicação de boro e de alguns outros micronutrientes carece de mais aprofundamento e detalhamento, sendo necessário investigação sobre efeito ambiental, genético, fontes de aplicação, dose aplicada, momentos de aplicação do boro.

2.4 Demanda hídrica na cultura da soja

A cultura da soja tem como maior limitação para altas produtividades o clima (Zanon *et al.*, 2018). Sendo o déficit hídrico, o grande causador da queda de produção nas lavouras, devido a irregularidade dos regimes pluviométricos e a elevada demanda evaporativa da atmosfera (Zipper *et al.*, 2016). A estimativa de consumo de água na cultura da soja é de 875,4 mm aproximadamente durante o período de cultivo (Barbieri, 2020).

Os momentos de maior demanda hídrica da cultura são no florescimento e desenvolvimento da vagem (Oliveira *et al.*, 2020). E nesses períodos, é crítico a exigência de água, sendo observado redução no rendimento de grãos (Wang *et al.*, 2022). O consumo hídrico da cultura da soja durante os estádios de desenvolvimento inicial, vegetativo, florescimento e final, foram de 48, 92, 167 e 43 mm respectivamente em cada fase do seu ciclo, totalizando 351 mm, em todo seu ciclo que foi de 118 dias (Ávila, 2016).

A necessidade de água aumenta durante o desenvolvimento da cultura, atingindo o máximo no período de floração ao enchimento de grãos, neste período a planta necessita de 7 a 8 mm/dia, decrescendo logo após essa etapa do ciclo (Gava *et al.*, 2016). Em condições áridas, as plantas de soja perdem conteúdo de água, fazendo com que as folhas murchem e caiam, desequilibrando o estado hídrico da planta e diminuindo o potencial hídrico e o turgor das células (Zhang *et al.*, 2020). Se a planta for submetida a condições de seca (déficit hídrico, altas temperaturas e insolação) por um período suficientemente longo, o fenômeno de perda de água celular é agravado, causando danos irreversíveis aos tecidos vegetais, o que acaba levando à morte da planta (Shen *et al.*, 2017).

Logo, nesse contexto, o impacto do déficit hídrico sobre o rendimento na cultura da soja depende da intensidade, duração e estágio fenológico de ocorrência do estresse, além da sensibilidade da cultivar, ocorrendo drásticas reduções no rendimento, principalmente quando a falta de água ocorre no período reprodutivo, onde é mais sensível a baixa disponibilidade hídrica (Júnior *et al.*, 2023).

2.5 Estratégias para superar o déficit hídrico

O período em que o déficit hídrico pode ser observado com mais frequência no Brasil é no período de seca, o qual a água presente no solo não é suficiente, e as raízes das plantas não conseguem absorvê-la, causando uma redução das atividades fisiológicas resultando em plantas menores e mais fracas, e esse grau de falta de água caso se mantenha por longos períodos pode levar a morte da planta (Wang *et al.*, 2022).

Isso por que, o sistema radicular da soja é pouco desenvolvido, sendo mais sensível, portanto as condições adversas, como a seca, em comparação a outras culturas com sistema radicular mais agressivo, enquanto a necessidade de água durante o ciclo de vida da planta é elevada, e podem causar perdas de rendimento que variam de 25 a 50% (Zou *et al.*, 2020).

Com isso, alguns mecanismos podem ser adotados para tornar a soja menos suscetível ao déficit hídrico, como realizar o plantio sob palhada para manter o solo com umidade nos períodos sem chuva diminuindo sua evapotranspiração (Bueno *et al.*, 2019); adotar o sistema de rotação de culturas de forma efetiva, implementando culturas com alta capacidade de enraizamento, plantas de cobertura, estruturando o solo, com isso condicionando um sistema de alta produção, que produza uma alta quantidade de palhada, matéria orgânica que vai contribuir para o condicionamento e manutenção da umidade do solo (Borghi *et al.*, 2021); realizar a correção do solo e suplementação de micronutrientes (B, Zn, Mn e Si) (Teixeira *et al.*, 2020), suprimindo suas necessidades, e com isso garantindo que a soja terá condição de criar um sistema radicular profundo, que em momento de déficit hídrico poderá buscar água em camadas mais profundas do solo.

O controle de pragas e doenças também é fator relevante, pois podem causar desfolha, comprometendo o crescimento e desenvolvimento. Sendo abertura para patógenos, e perda de potencial fotossintético, que permitirá que as plantas sobrevivam a períodos críticos com falta de água. Em vários estádios reprodutivos R4, R5 e R6, da cultura da soja, quando se submete a níveis de desfolha, 33%, 66% e 100%, observou-se o decréscimo na produção de grãos em todos os estádios, a medida que ocorreu o aumento do nível de desfolha (Alves, Bellettini, 2020).

A competição de plantas daninhas com o sistema de produção é fator fundamental, que deve se ter atenção, uma vez que as plantas invasoras possuem alta agressividade de sistema radicular, suprimindo as plantas cultivadas, fazendo com que as mesmas percam produtividade, que pode variar de 40 a 80%, já que a maioria das vezes as daninhas são mais eficazes no aproveitamento de água, luz e nutrientes (De Souza *et al.*, 2019).

Logo, buscar mecanismos que contribuam com a mitigação ao déficit hídrico, são primordiais, pois nos sistemas de produção brasileiro, existem diversos fatores abióticos e bióticos, que facilitam a redução de produtividade de diversas culturas.

2.6 Sistema de produção de soja

O clima é o principal fator ambiental associado à variabilidade da produtividade agrícola mundial, em especial para os sistemas de produção de sequeiro, que ocupam grandes áreas produtoras de grãos e outros produtos agrícolas no Brasil (Nascimento *et al.*, 2020). Logo, o sistema de produção que está sendo implementado na área de cultivo agrícola, impacta diretamente nas condições de produtividade e resiliência da cultura (Barbieri *et al.*, 2019).

No Brasil os modelos de cultivo amplamente utilizados são sucessão soja – milho, soja – plantas de cobertura, soja - trigo, ou soja - pousio (sem cultivo na área) (Vargas *et al.*, 2023). O desempenho agrônômico da soja e a qualidade do solo sob rotação e sucessão de culturas em plantio direto. No entanto, ainda se carece de estudos e incentivos para implementar o uso de plantas de cobertura nos sistemas de cultivo, para que se tenha produção de matéria orgânica sob o solo, com isso, reduzindo a presença de pragas, doenças e plantas daninhas. Que são fatores que contribuem com a perda de rendimento de produção da área, tornando insustentável o sistema de produção, e comprometendo a viabilidade do cultivo no longo prazo (Salomão *et al.*, 2020).

A adequação do modelo agrícola implementado, para o formato de sistema de produção de fato, obtendo circularidade e sustentabilidade dos recursos utilizados, garantem maiores produções, assim como em períodos de estresse abióticos, como secas, inundações, altas e baixas temperaturas, áreas compactadas e de baixa fertilidade (áreas de abertura), podem ser superados sem prejudicar o potencial produtivo da cultura (Moreira *et al.*, 2023). Isso porque, sistemas de produção circulares, garantem maior manutenção de matéria orgânica no solo, umidade do solo, acesso a nutrientes, e com isso permite com que a cultura que esteja na área se desenvolva plenamente, tanto em sua parte aérea e partições produtivas, como também o sistema radicular (De Castro *et al.*, 2021).

No estado de Minas Gerais, os sistemas de produção agrícola vem se inovando safra após safra, sendo implementado cada vez mais os sistemas circulares e a semeadura direta, com rotação de culturas, manutenção de palhada na área e mínimo revolvimento do solo (Moreira *et al.*, 2023). Isso, através de diversificação de culturas e utilização de plantas de cobertura (Sharma *et al.*, 2021). A região do campo das vertentes no estado de Minas Gerais, vem se tornando cada vez mais expressiva quanto a utilização de sistemas de produção circulares, batendo recordes de produtividade de soja, mesmo em anos agrícolas complexos, com situações extremas (Dos Santos *et al.*, 2021.).

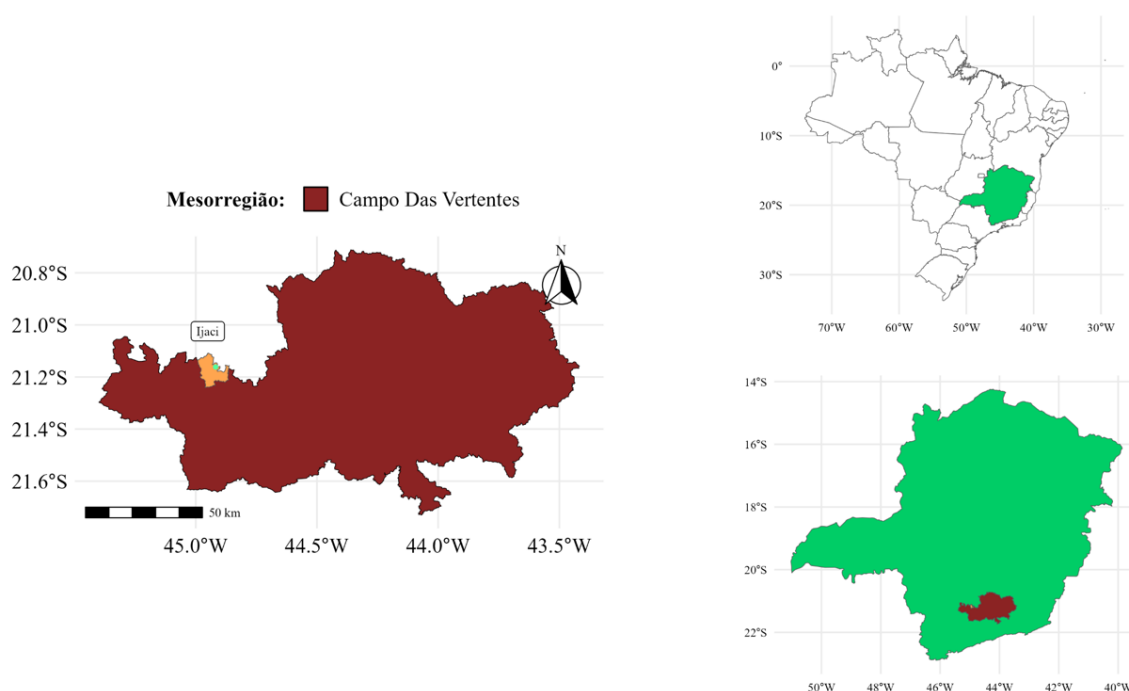
3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Experimentos de Campo

3.1.1 Localização e implantação dos experimentos de campo

Os experimentos foram conduzidos em dois anos agrícolas, ano um, safra 2022/2023 e o ano 2, na safra 2023/2024. Ambos os experimentos realizados no município de Ijací-MG (Figura 1), na fazenda Palmital – CDTT/UFLA (-21.162348, -44.918074), altitude 840 m.

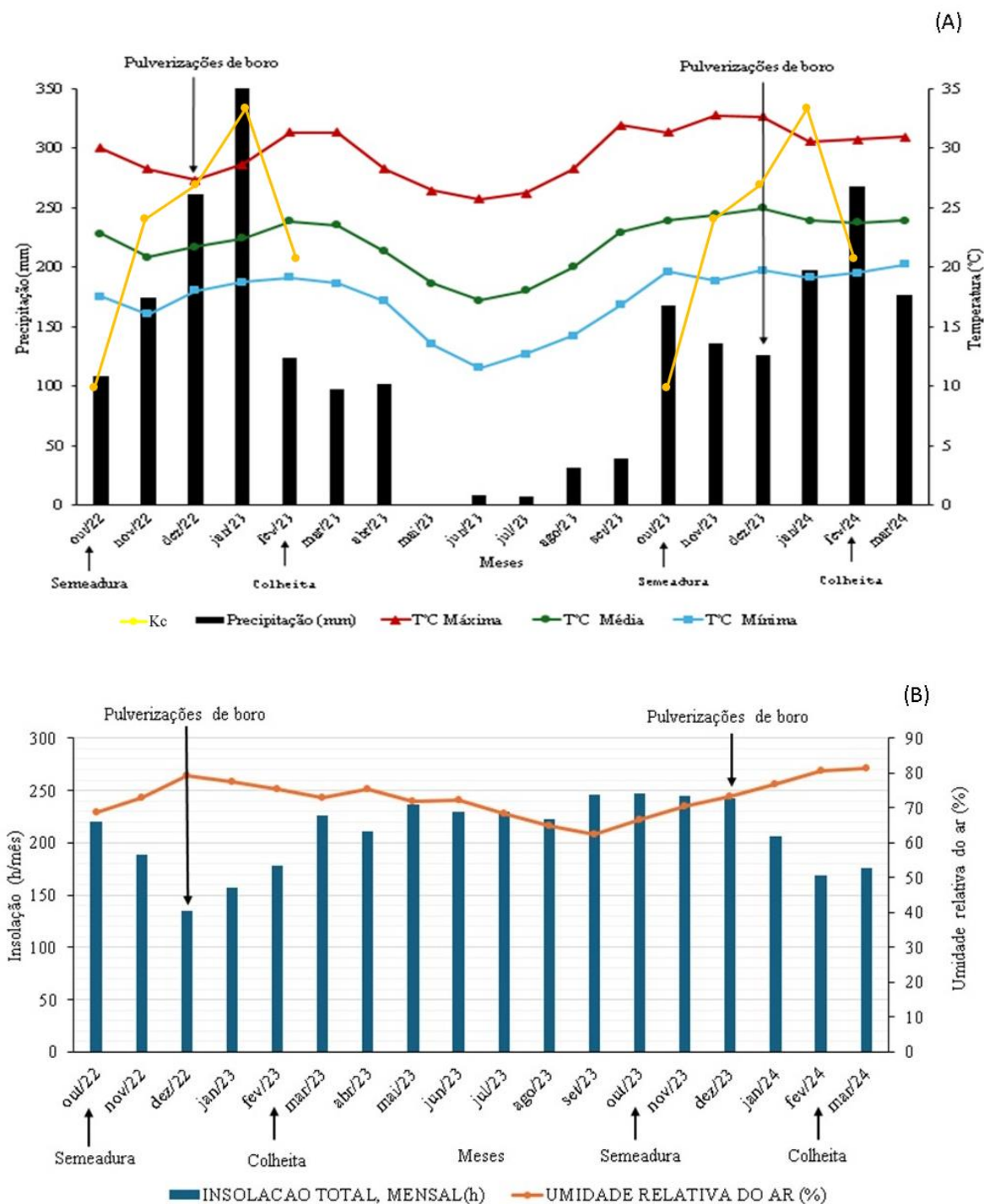
Figura 1- Localização dos experimentos de campo durante os anos agrícolas de 2022/23 e de 2023/24.



Fonte: Do autor (2024).

De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é definido como *Cwa*, temperado chuvoso (mesotérmico), com inverno seco e verão chuvoso, subtropical (Dantas *et al.*, 2007). Os dados meteorológicos de precipitação, temperaturas máxima, média e mínima, insolação e umidade relativa do ar, foram coletados no período de condução dos experimentos a campo estão apresentados na figura 2.

Figura 2 – Dados meteorológicos do município de Ijaci -MG entre outubro de 2022 e março de 2024, (A) coeficiente de cultivo da soja-Kc, precipitação, temperatura máxima, média e mínima; (B) insolação total mensal e umidade relativa do ar.



Médias mensais de temperatura máxima, mínima e média (°C), coeficiente de cultivo da soja, precipitação (mm); insolação (h) e umidade relativa do ar (%).

Fonte: Adaptado de Nasa Power (2024).

A adubação e correção dos solos nos dois anos agrícolas foram realizadas previamente a semeadura, sendo realizada a amostragem 30 dias antes da semeadura, e realizada as análises químicas e físicas dos solos, de 0-20 cm, para proceder a adubação e correção do solo necessárias, de acordo Alvarez *et al.* (1999). As análises químicas e físicas dos solos no município de Ijaci-MG, no primeiro ano agrícola e segundo ano agrícola estão apresentados na Tabela 1. A inoculação das sementes foi realizada com o inoculante contendo 10^9 células g^{-1} , na dose de 100 g kg^{-1} de sementes.

Tabela 1 – Caracterização química e física do solo de Ijaci-MG, CDTT/UFLA, nos anos agrícolas de 2022/2023 e 2023/2024.

Safr 2022/23	pH	K	P	Na	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	t	T	
	----- mg/dm³-----				----- cmol _c / dm³-----							
	6,3	185,8	24,5	-	3,9	1,2	0,0	2,1	5,6	5,7	7,7	
	V	m	MO	P-rem	Zn	Fe	Mn	Cu	B	S		
	----- % -----	dag/kg		mg/L	-----cmol _c / dm³-----							
	72,7	1,7	2,4	27,5	6,0	26,5	11,7	1,0	0,2	4,4		
	Argila				Silte				Areia			
	-----Dag/ kg-----											
491042												
Safr 2023/24	pH	K	P	Na	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	t	T	
	----- mg/dm³-----				----- cmol _c / dm³-----							
	6,5	144,8	21,0	-	4,0	1,2	0,1	2,5	5,5	5,6	8,1	
	V	m	MO	P-rem	Zn	Fe	Mn	Cu	B	S		
	----- % -----	dag/kg		mg/L	-----cmol _c / dm³-----							
	68,9	1,8	2,6	22,0	5,6	25,1	13,5	1,0	0,1	6,7		
	Argila				Silte				Areia			
	-----Dag/ kg-----											
51544												

P- Na - K- Fe - Zn- Mn- Cu- Extrator Mehlich 1

pH em água, KCl e CaCl₂ - Relação 1:2,5; Ca - Mg- Al- Extrator: KCl - 1 mol/L; H + Al- Extrator: SMP; Matéria Orgânica (MO) - Oxidação: Na₂Cr₂O₇ 4 mol/L+ H₂SO₄10 mol/L; B- Extrator água quente.

S - Extrator - Fosfato monocálcio em ácido acético

3.1.2 Planejamento experimental

O delineamento utilizado foi o de blocos casualizados completos (DBCC) em esquema fatorial triplo (3 x 5 x 2), com a semeadura das três cultivares (Pioneer® 97R50 IPRO, Pioneer® 95R21E, UFLA 6301RR) em faixas; os cinco manejos foram realizados através da aplicação

foliar, do controle (aplicação de água), boro-MEA no estágio de V6/Vn, boro-MEA no estágio de R1/R2, ácido bórico no estágio de V6/Vn e ácido bórico no estágio de R1/R2, isso em dois anos agrícolas (2022/23 e 2023/24). A aplicação do foliares, foi realizada utilizando pulverizador coltal de pressão de CO₂, calibrado a pressão de 0,6 Mpa, a barra de pulverização continha quatro bicos, com ponteiros de aplicação do tipo cônico vazio. A velocidade de aplicação foi de 5 Km/h, e o volume de calda utilizado foi de 2 L/ 36 m². As doses utilizadas foram de acordo com a necessidade ácido bórico aplicação de 1,4 Kg/ha e boro-MEA 0,5L/ha (Tabela 2). As cultivares adotadas com respectivos grupos de maturação relativo (GMR), densidade de plantas, bem como a origem (companhia obtentora) estão apresentados na tabela (3).

Tabela 2 - Tratamentos aplicados via pulverização foliar, nos experimentos durante as safras de 2022/23 e 2023/24.

Fonte	Época	Doses
Água	V6/Vn R1/R2	-
Ácido bórico (H ₃ BO ₃)	V6/Vn R1/R2	1,4 Kg/ha
Boro-MEA (N (4,7%)+B(10,9%))	V6/Vn R1/R2	0,5 L/ha

Fonte: Do autor (2024).

Tabela 3 - Cultivares de soja e os seus respectivos grupos de maturação relativos, adotados durante as safras de 2022/23 e 2023/24.

Cultivar	Companhia obtentora	GMR	Densidade de plantas	Safra de cultivo
95R21E	Pioneer ®	5.2	350 mil plantas/ha	2022/23
6301RR	UFLA	6.3	280 mil plantas/ha	2022/23 2023/24
97R50 IPRO	Pioneer®	7.5	220 mil plantas/ha	2022/23 2023/24

Zeus	Brasmax®	5.5	320 mil plantas/ha	2023/24
------	----------	-----	-----------------------	---------

Fonte: Do autor (2024).

A densidade de plantas foi ajustada buscando o máximo potencial produtivo das cultivares de soja. As parcelas foram constituídas de quatro linhas de 5,0 metros de comprimento, com espaçamento entre linhas de 0,6 metros, com três repetições. A área total da parcela foi de 12,0 m² e a área útil de 6,0 m², sendo excluídos uma linha de cada lado da parcela (bordadura). A semeadura foi realizada sob sistema de plantio direto (SPD), na segunda semana de outubro, e densidade de semeadura foi ajustada de acordo com as recomendações de cada cultivar. Os demais tratos culturais foram empregados de acordo com as recomendações para a cultura da soja na região.

3.1.3 Avaliações dos caracteres fenotípicos

As avaliações dos caracteres fenotípicos, foram realizadas ao longo do ciclo da cultura de soja:

- Estande inicial de plantas/hectare(NPLI) (pl/ha): Ajustado para cultivar Pioneer® 95R21E (340 mil plantas/hectare), Pioneer® 97R50 IPRO (220 mil plantas/hectare), UFLA 6301RR (260 mil plantas/hectare) e Brasmax® Zeus (320 mil plantas/hectare).
- Estande final de plantas/hectare (NPLF) (pl/ha): No estágio de R1, realizado a contagem do número de plantas por metro linear.
- Altura de plantas (ALT) (cm): Nos estádios de V6, R1, R6 e R8, foi obtido a distância do colo da planta até a extremidade do meristema apical, coletado de 5 plantas aleatoriamente por parcela.
- Altura de inserção da primeira vagem (AIPV) (cm): Distância do colo da planta até o nó de inserção da primeira vagem, sendo coletados de 5 plantas aleatoriamente por parcela.
- Dias para maturação absoluta (DPM) (dias): Obtido a partir da data de semeadura até as plantas da parcela atingirem o estágio de R8.
- Índice de acamamento (ACAM) (nota): Avaliado segundo a escala de Bernard *et al.* (1965), sendo pontuações atribuídas a cultura, variando de 1 plantas eretas, à nota 5 mais

de 80% das plantas acamadas, sendo avaliado a parcela útil (2 linhas centrais, com 5 metros de comprimento).

- Número de ramos laterais (NRL) (un): Coletado 5 plantas aleatoriamente por parcela, no estágio de R8.
- Número de vagens total (NVT) por planta (un): Avaliado após a colheita, onde foram coletadas 3 plantas aleatoriamente na parcela, para contagem do número total de vagens.
- Número de grãos por vagem (NG/V) (un): Avaliado contando separadamente o número de vagens com 1, 2, 3 e 4 grãos (NVC1G; NVC2G; NVC3G; NVC4G), em 3 plantas por parcela útil.
- Peso de cem grãos (PCG) (g): Obtido a partir do peso de cem grãos tomados aleatoriamente, após a colheita da parcela.
- Produção (Kg): Obtida com a colheita de toda parcela útil, pesagem da produção e mensuração do teor de umidade da parcela.
- Produtividade (PROD) (Kg/ha): Determinado com a colheita de toda a parcela útil, padronização a umidade de 13%, e estima-se para um hectare, para obtenção da produtividade.

3.1.4 Avaliações Bioquímicas

As avaliações bioquímicas das plantas de soja, foram realizadas buscando compreender e elucidar quais as reações e produtos são obtidos, quando as plantas estão submetidas ao déficit hídrico e são expostas a adubação via foliar com boro, em comparação com plantas de soja sem nenhum tratamento com boro (testemunha):

Quantificação da peroxidação lipídica e a determinação do teor de peróxido de hidrogênio nos tecidos vegetais foi obtido o extrato bruto a partir de 0,2 g de tecido foliar congelado, que foram finamente macerados em almofariz com nitrogênio líquido. Logo após, foram homogeneizados em 1,5 mL de TCA e centrifugados a 12.000 rpm por 15 min, a 4 °C para coleta do sobrenadante.

- Peroxidação lipídica foi estimada pela detecção de malondialdeído (MDA), conforme descrito por Buege e Aust (1978). Alíquotas (125 µL) do sobrenadante foram adicionadas ao meio de reação, contendo 250 µL do seguinte meio de reação: 0,5% (m/v) de ácido tiobarbitúrico (TBA) e 10% (m/v) de TCA, incubando-se, em seguida, a 95 °C, por 30 min

em tubos para centrifugação de 2 mL. A reação foi paralisada por resfriamento rápido em gelo e as leituras foram determinadas em espectrofotômetro, de 535 nm a 600 nm. O TBA forma complexos de cor avermelhada com aldeídos de baixa massa molecular, como o malondialdeído (MDA), produto secundário do processo de peroxidação. A concentração do complexo MDA/TBA foi então calculada pela seguinte equação: $[MDA] = (A_{535} - A_{600}) / (\epsilon \cdot b)$, em que: ϵ (coeficiente de extinção = $1,56 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$); b (comprimento ótico = 1).

- Conteúdo de peróxido de hidrogênio (H_2O_2): Determinado medindo-se a absorbância a 390 nm em um meio de reação, contendo 45 μL tampão fosfato de potássio 10 mM, pH 7,0, 45 μL do extrato e 90 μL de iodeto de potássio 1M (Velikova *et al.*, 2000). A quantificação foi realizada, com base na curva padrão de peróxido de hidrogênio, com concentrações conhecidas.
- Determinação do conteúdo de Prolina foi realizado utilizando 0,1g do material vegetal fresco das folhas, foi homogeneizado e macerado com 5 mL de ácido sulfosalicílico 3% e acondicionados em tubo falcon de 15 mL. Logo após o material extraído foi agitado a temperatura ambiente por 60 min e em seguida centrifugado a 5000 rpm por 10 min para coleta do sobrenadante. O conteúdo de prolina foi determinado em tubos de ensaio pela reação com a amostra, reagente ninhidrina (2,5 g de ninhidrina, 60 mL de ácido acético e 40 mL de ácido fosfórico 6M), água e ácido acético por 60 min a 100 °C. A reação foi interrompida em banho de gelo. A mistura reacional foi extraída com tolueno e a concentração de prolina foi determinada a partir de uma curva padrão (Bates *et al.*, 1973).
- Quantificação de proteínas solúveis totais foi realizada de acordo com método descrito por Bradford (1976), utilizando como corante o reagente Bradford BG-250 (Sigma-Aldrich). As curvas padrões foram feitas com cinco concentrações de albumina de soro bovino (BSA 2,5 mg mL⁻¹): 0,001; 0,002; 0,003; 0,004 e 0,005 Ml.
As leituras foram realizadas a 560 nm e o cálculo da enzima foi realizado com a seguinte equação: % de inibição = $(A_{560} \text{ amostra com amostra} - A_{560} \text{ controle sem amostra}) / (A_{560} \text{ controle sem amostra})$.
- Índice relativo de clorofila (SPAD) foi avaliado com o clorofilômetro Konica Minolta® SPAD 502 plus, o qual possui elevada correlação com o teor relativo de clorofila, as avaliações foram realizadas na parte mediana da planta, sendo as folhas diagnosticas, a terceira folha do ápice para base, sendo a folha totalmente expandida, nos folíolos

centrais, em três plantas, das 9 às 11 horas da manhã, por parcela. As avaliações de SPAD foram realizadas nos estádios fenológicos de V6, R1 e R6 (Fehr e Caviness, 1977) nas safras de 2022/2023 e na safra 2023/2024 (Werner *et al.*, 2018).

- Quantificação da composição mineral dos tecidos vegetais, foram coletadas folhas padronizadas no centro parcela, estando totalmente desenvolvidas, sem qualquer sinal de patógenos ou pragas, sendo a folha diagnóstica, a terceira folha a partir do meristema apical (Harger *et al.*, 2003). Foi realizada avaliação do estado nutricional das plantas na qual, foi realizado pela diagnose de todas as folhas secas e moídas após 5 dias da coleta, após a soja atingir os estádios fenológicos de Vn/R1, R3 e R6. Foram determinados os teores de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn, no laboratório do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), em São Paulo; seguindo a metodologia descrita por Malavolta *et al.* (1997).

3.1.5 Análises estatísticas dos experimentos de campo

Para identificar um conjunto de variáveis linearmente independentes para serem utilizadas nas análises dentro do conjunto de variáveis coletas para cada condição experimental, e com isso evitar a realização de interpretações erradas ou resultados inconsistentes, utilizou-se matriz de correlações de Pearson adotando a equação um e a significância foi avaliada pelo teste *t* ao nível de 0,05 e 0,01 de probabilidade.

(1)

$$\rho_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\sqrt{(\sigma_i^2 * \sigma_j^2)}}$$

em que:

ρ_{ij} : correlação de Pearson entre as variáveis *i* e *j*;

σ_{ij} : covariância entre as variáveis *i* e *j*;

σ_i^2 : variância da variável *i*;

σ_j^2 : variância da variável *j*.

Posteriormente visando identificar entre as variáveis a presença de multicolineariedade (Montgomery, Peck, 1981), avaliou-se o número de condições entre o maior e menor autovalor. Para a seleção de variáveis, o fator inflacionário da variância (FIV) foi estimado pela equação dois (Marqueridt, 1970):

(2)

$$FIV = \frac{1}{1 - R_i^2}$$

em que:

FIV : Fator inflacionário da variância;

R_i^2 : coeficiente de determinação obtido pela regressão entre i -enésima variável em com relação as demais mensuradas;

Após a remoção de uma variável com alto FIV, a matriz de correlação foi atualizada e então recalculado o número de condições, repetindo este procedimento até que o valor desejado fosse atingido para proceder análise estatística dos dados fenotípicos.

Os experimentos de cada ano agrícola foram analisados individualmente com o modelo três, em que foram aplicados os testes de normalidade residual de Shapiro-Wilk (Shapiro, Wilk 1965) e a detecção de homogeneidade de variância entre os experimentos usando o teste F máximo (Hartley, 1950). As variáveis analisadas foram divididas em dois grupos, agronômicas e fisiológicas, e os critérios de multicolineariedade foram verificados, conforme descrito anteriormente.

(3)

$$\bar{y} = \mu + X_r\tau_r + X_c\tau_c + X_t\tau_t + X_{ct}\tau_{ct} + \varepsilon$$

em que:

$\bar{y}$: Valor observado para a característica avaliada;

μ : constante associada a todas as observações;

$X_r\tau_r$: vetor do efeito fixo de repetições;

$X_c\tau_c$: vetor do efeito fixo de cultivares;

$X_t\tau_t$: vetor do efeito fixo de tratamentos;

$X_{ct}\tau_{ct}$: vetor do efeito fixo entre a interação de cultivares e tratamentos;

ε : vetor dos efeitos de erros associados as observações (aleatório), $\varepsilon \sim N(0, I\sigma_\varepsilon^2)$.

Posteriormente ao teste de homogeneidade das variâncias residuais, procedeu-se com à análise conjunta para os ambientes conforme o modelo quatro, utilizando a abordagem de modelos mistos. Os componentes de variância tiveram sua significância avaliada conforme o teste LRT.

(4)

$$\bar{y} = \mu + X_{r(s)}\tau_{r(s)} + X_s u_s + X_c\tau_c + X_t\tau_t + X_{ct}\tau_{ct} + X_{sc}u_{sc} + X_{st}u_{st} + X_{sct}u_{sct} + \varepsilon$$

em que:

$\bar{y}$: Valor observado para a característica avaliada;
 μ : constante associada a todas as observações;
 $X_{r(s)}\tau_{r(s)}$: vetor do efeito fixo aninhado de repetições com safra;
 $X_s u_s$: vetor do efeito de safra (aleatório), $s \sim N(0, I\sigma_s^2)$.
 $X_c \tau_c$: vetor do efeito fixo de cultivares;
 $X_t \tau_t$: vetor do efeito fixo de tratamentos;
 $X_{ct} \tau_{ct}$: vetor do efeito fixo entre a interação de cultivares e tratamentos;
 $X_{sc} u_{sc}$: vetor do efeito de interação ente safra e cultivares (aleatório), $sc \sim N(0, I\sigma_{sc}^2)$;
 $X_{st} u_{st}$: vetor do efeito de interação ente safra e tratamentos (aleatório), $st \sim N(0, I\sigma_{st}^2)$;
 $X_{sct} u_{sct}$: vetor do efeito de interação ente safra, tratamentos e cultivares (aleatório), $sct \sim N(0, I\sigma_{sct}^2)$;
 ε : vetor dos efeitos de erros associados as observações (aleatório), $\varepsilon \sim N(0, I\sigma_\varepsilon^2)$.

Os BLUEs (*Best Linear Unbiased Estimador*) obtidos para os grupos de variáveis foram então utilizados para as análises de componentes principais. A precisão experimental foi avaliada pela estimativa da acurácia (Resende e Duarte, 2007) para os fatores experimentais, conforme equação cinco e pelo coeficiente de variação experimental, na equação seis.

(5)

$$r\hat{g}g = \sqrt{1 - \frac{1}{F_g}}$$

em que:

$r\hat{g}g$: acurácia para o efeito do fator g ;

F_g : F calculado na análise de variância para o efeito do fator g .

(6)

$$CV_e = \frac{\sqrt{QMe}}{\bar{X}_i}$$

em que:

CV_e : coeficiente de variação experimental;

QMe : quadrado médio do resíduo;

$\bar{X}$: média geral da variável i .

3.1.5.1 Análise dos componentes principais

A análise de componente principal (PCA) foi realizada com funções do pacote *stats* do ambiente R (R Core Team, 2020). Em que se utilizou a matriz de médias ajustadas padronizadas com média zero e variância igual a um para a estimação via decomposição de valor singular para a criação das variáveis latentes, ou componentes principais a partir da obtenção dos autovetores, que determinam o sentido da rotação de cada componente obtido, e dos autovalores, que definem a variância de cada um dos componentes.

Para a representação gráfica, o biplot foi adotado conforme descrito por Gabriel (1971) e a elipse de confiança foi ajustada utilizados os recursos do pacote *car* (Fox; Weisberg, 2019) para determinar as regiões do plano bivariado do biplot com probabilidade de apresenta o verdadeiro valor estimado para o efeito de tratamentos, assumindo uma distribuição normal multivariada com nível de confiança de 0,8.

Para estimar a contribuição de cada variável na variação explicada por cada componente principal adotado no biplot, os autovetores associados a cada componente foram elevados ao quadrado e então convertidos em valores percentuais.

3.1.5.2 Análise estatística das variáveis nutricionais

Os dados de concentração de nutrientes nos tecidos foliares foram analisados com o modelo sete, em que foram aplicados os testes de normalidade residual de Shapiro-Wilk (Shapiro, Wilk, 1965).

(7)

$$\bar{y} = \mu + X_r\tau_r + X_c\tau_c + X_t\tau_t + X_{ct}\tau_{ct} + \varepsilon$$

em que:

$\bar{y}$: Valor observado para a característica avaliada em cada condição de solo;

μ : constante associada a todas as observações;

$X_r\tau_r$: vetor do efeito fixo de repetições;

$X_c\tau_c$: vetor do efeito fixo de cultivares;

$X_t\tau_t$: vetor do efeito fixo de tratamentos;

$X_{ct}\tau_{ct}$: vetor do efeito fixo entre a interação de cultivares e tratamentos;

ε : vetor dos efeitos de erros associados as observações (aleatório), $\varepsilon \sim N(0, I\sigma_\varepsilon^2)$.

A precisão experimental foi avaliada pela estimativa da acurácia (Resende e Duarte, 2007) para os fatores experimentais, conforme equação 8 e pelo coeficiente de variação experimental, na equação 9.

(8)

$$r\hat{g}g = \sqrt{1 - \frac{1}{F_g}}$$

em que:

$r\hat{g}g$: acurácia para o efeito do fator g ;

F_g : F calculado na análise de variância para o efeito do fator g .

(9)

$$CV_e = \frac{\sqrt{QMe}}{\bar{X}_i}$$

em que:

CV_e : coeficiente de variação experimental;

QMe : quadrado médio do resíduo;

$\bar{X}$: média geral da variável i .

As médias ajustadas obtidas foram usados para a estimativa da correlação de Pearson, conforme equação 10 e a significância foi avaliada pelo teste t ao nível de 0,05 e 0,01 de probabilidade.

(10)

$$\rho_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\sqrt{(\sigma_i^2 * \sigma_j^2)}}$$

em que:

ρ_{ij} : correlação de Pearson entre as variáveis i e j ;

σ_{ij} : covariância entre as variáveis i e j ;

σ_i^2 : variância da variável i ;

σ_j^2 : variância da variável j .

3.1.6 Procedimentos computacionais dos experimentos de campo

O ambiente R (R Core Team, 2020) versão 4.1.3 foi utilizado para o tratamento dos dados e para o ajuste dos modelos utilizados. Utilizou-se o pacote lme4 (Bates *et al.* 2024) para o ajuste do modelo linear misto. As ferramentas disponíveis no pacote tidyverse (Wickham *et*

al., 2019) foram utilizadas para a manipulação dos dados e para a plotar dos gráficos apresentados.

3.2 Experimento de Casa de vegetação

3.2.1 Localização e implantação do experimento de casa de vegetação

O experimento foi realizado na Casa de vegetação do setor de grandes culturas da UFLA, em Lavras- MG (-21.226629, -44.972603) (Figura 3).

Figura 3 – Localização do experimento de casa de vegetação no município de Lavras, no setor de grandes culturas – DAG/ESAL.



Fonte: Do autor (2024).

3.2.2 Planejamento experimental

O delineamento utilizado foi o de blocos casualizados completos (DBCC) em esquema fatorial triplo (2 Condições de investimento em fertilidade x 3 Cultivares x 5 Manejos), com três repetições. Durante a condução do experimento foi simulado dois ambientes de produção, condições de alto investimento em fertilidade do solo, fertilidade construída e com correção do pH, e outro solo de baixo investimento em fertilidade do solo, simulando área de abertura. Foi utilizado as cultivares Pioneer® 95R21E, grupo de maturação relativo (GMR) de 5.2; Pioneer® 97R50 IPRO, GMR de 7.5; e a UFLA6301RR, GMR de 6.3. Os manejos foliares utilizados

foram controle (água), Boro-MEA no estadio de V6/Vn, Boro-MEA no estadio de R1/R2, Ácido bórico no estadio de V6/Vn e Ácido bórico no estadio de R1/R2.

A semeadura foi realizada manualmente, na primeira semana de novembro de 2022, sendo semeado seis sementes por vaso e após as plântulas atingirem V1, foi realizado desbaste dos vasos, mantendo duas plantas por vaso de 10 litros, a proporção de substrato para montagem dos vasos foram de 2:1 (solo: areia).

Foi realizado a Análise química e física das camadas de 0-20 cm, e após isso a adubação e correção do solo foram de acordo (Alvarez *et al.*,1999), buscando explorar o maximo das diferenças químicas dos solos, sendo separados dois solos (Tabela 4), no qual ambos os solos foram, corrigidos e adubados, no entanto o primeiro solo foi investido o dobro de fertilizantes e corretivos , sendo considerado solo de alto investimento; e o segundo solo, foi adubado e corrigido de acordo com recomendado, sendo considerado de baixo investimento. A inoculação das sementes foi realizada com inoculante contendo 10^9 células g^{-1} , na dose de $100 g kg^{-1}$ de sementes.

Tabela 4 - Caracterização química e física do solo de alto investimento e baixo investimento respectivamente, do experimento em casa de vegetação.

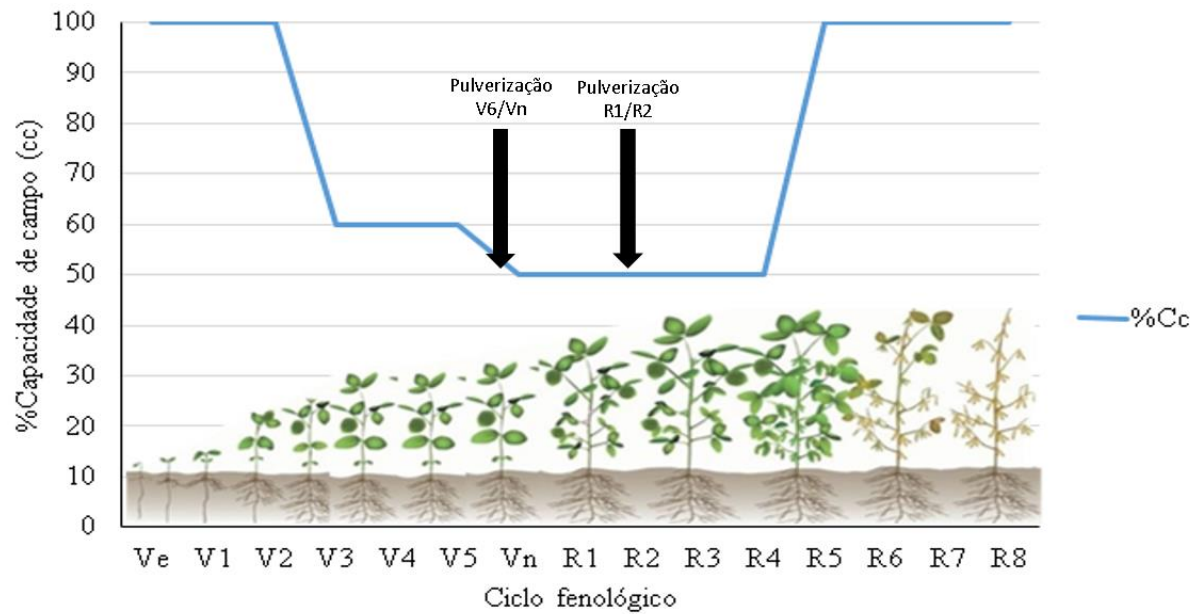
Alto investimento	pH	K	P	Na	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	t	T
	----- mg/dm ³ -----				----- cmol _c / dm ³ -----						
	5,9	63,3	0,5	-	2,7	0,6	0,0	2,2	3,5	3,7	5,7
	V	m	MO	P-rem	Zn	Fe	Mn	Cu	B	S	
	----- % -----	dag/kg		mg/L	-----cmol _c / dm ³ -----						
	-				-----						
61,2	2,8	1,4	6,3	1,3	27,4	18,9	1,5	0,1	14,2		
Argila				Silte				Areia			
-----Dag/ kg-----											
59				13				28			
Baixo investimento	pH	K	P	Na	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	t	T
	----- mg/dm ³ -----				----- cmol _c / dm ³ -----						
	5,1	10,4	0,1	-	0,3	0,1	0,1	1,3	0,4	0,5	1,7
	V	m	MO	P-rem	Zn	Fe	Mn	Cu	B	S	
	----- % -----	dag/kg		mg/L	-----cmol _c /dm ³ -----						
	-				-----						
21,9	21,3	0,2	2,2	1,3	33,1	5,8	0,7	0,2	5,8		
Argila				Silte				Areia			

	-----Dag/ kg-----	
63	21	16
P- Na - K- Fe - Zn- Mn- Cu- Extrator Mehlich 1		
pH em água, KCl e CaCl ₂ - Relação 1:2,5; Ca - Mg- Al- Extrator: KCl - 1 mol/L; H + Al- Extrator: SMP; Matéria Orgânica (MO) - Oxidação: Na ₂ Cr ₂ O ₇ mol/L+ H ₂ SO ₄ mol/L; B- Extrator água quente.		
S - Extrator - Fosfato monocálcio em ácido acético.		

O controle da disponibilidade hídrica foi realizado para indução do deficit hídrico. Primeiro foi mensurado a capacidade de campo (cc) do solo, para determinar a quantidade de água que o solo retêm. Para isso, foi coletado cem gramas do solo que foi utilizado, depositado sobre um funil com filtro; após isso foi acrescentado a quantidade de agua necessária até que este atingisse a saturação da água (100% cc). Após 24 horas foi coletado a quantidade de agua que saiu do funil com o solo saturado com água, e com isso, realizado o calculo de quanto de agua o solo manteve, permitindo com isso conhecer quanto de água o solo tem capacidade de reter (Vories *et al.*, 2021).

O volume de água que foi aplicado nos vasos (Figura 4) foi buscando manter a capacidade de campo em níveis acima de 100% (condições hídricas favoráveis), até as plantas de soja atingirem o estágio fenológico de V3, quando reduziu-se a capacidade de campo para 60% até o estágio de Vn. Após isso, reduziu-se novamente a disponibilidade hídrica para 50% da capacidade de campo, isso até o estágio fenológico de R4. Após isso foi realizada a reidratação dos vasos, voltando todos os vasos, para 100% da capacidade campo (Cc) até o final do seu ciclo (R8).

Figura 4 – Regime hídrico empregado sobre o experimento de casa de vegetação, nas condições de alta e baixa fertilidade.



Fonte: Do autor (2024).

3.2.3 Avaliações dos caracteres fenotípicos

As avaliações dos caracteres fenotípicos, foram realizadas no decorrer do desenvolvimento da cultura de soja, sendo semeado 6 sementes por vaso e após as plantas atingirem o estágio de V1, foi realizado o desbaste para que fosse mantido apenas 2 plantas por vaso, e evitando com isso competição entre plantas.:

- Altura de plantas (ALT) (cm): Nos estádios de V6, R1, R6 e R8, foi obtido a distância do colo da planta até a extremidade do meristema apical, nas duas plantas de cada vaso.
- Altura de inserção da primeira vagem (AIPV) (cm): Distância do colo da planta até o nó de inserção da primeira vagem, sendo realizado nas duas plantas de cada vaso.
- Dias para maturação absoluta (DPM) (dias): Obtido a partir da data de semeadura até as plantas da parcela atingirem o estágio de R8.
- Índice de acamamento (ACAM) (nota): Avaliado segundo a escala de Bernard *et al.* (1965), sendo pontuações atribuídas a cultura, variando de 1 plantas eretas, à nota 5 mais de 80% das plantas acamadas, sendo avaliado as duas plantas dos vasos, e dada a nota com base em cada planta.
- Número de ramos laterais (NRL) (un): Contagem da quantidade de ramos laterais com vagens produtivas, de cada planta do vaso, no estágio de R8.
- Número de vagens total (NVT) por planta (un): Avaliado após a colheita, onde foram coletadas as 2 plantas de cada vaso, para contagem do número total de vagens.
- Número de grãos por vagem (NG/V) (un): Avaliado contando separadamente o número de vagens com 1, 2, 3 e 4 grãos, nas duas plantas do vaso.
- Produção (PESOG) (g): Obtida com a colheita das duas plantas de cada vaso, ou seja, seis plantas por tratamento, após isso, foram realizadas a pesagem da produção e mensuração do teor de umidade da parcela, para que fosse posteriormente corrigido a umidade para 13%.

3.2.4 Avaliações Bioquímicas

As avaliações das plantas de soja, foram buscando explicar de forma mais precisa quais os efeitos do boro na soja, foram realizadas as análises de peroxidação lipídica (MDA), teor de peróxido de hidrogênio (H₂O₂), conteúdo de prolina, quantificação de proteínas e índice de concentração de clorofila (SPAD), nos estádios fenológicos de Vn/R1 (pré florescimento) e

R1/R2 (floreescimento e emissão de vagens). Para a quantificação da peroxidação lipídica e a determinação do teor de peróxido de hidrogênio nos tecidos vegetais foi obtido o extrato bruto a partir de 0,2 g de tecido foliar congelado, que foram finamente macerados em almofariz com nitrogênio líquido. Logo após, foram homogeneizados em 1,5 mL de TCA e centrifugados a 12.000 rpm por 15 min, a 4 °C para coleta do sobrenadante.

- Peroxidação lipídica foi estimada pela detecção de malondialdeído (MDA), conforme descrito por Buege e Aust (1978). Alíquotas (125 µL) do sobrenadante foram adicionadas ao meio de reação, contendo 250 µL do seguinte meio de reação: 0,5% (m/v) de ácido tiobarbitúrico (TBA) e 10% (m/v) de TCA, incubando-se, em seguida, a 95 °C, por 30 min em tubos para centrifugação de 2 mL. A reação foi paralisada por resfriamento rápido em gelo e as leituras foram determinadas em espectrofotômetro, de 535 nm a 600 nm. O TBA forma complexos de cor avermelhada com aldeídos de baixa massa molecular, como o malondialdeído (MDA), produto secundário do processo de peroxidação. A concentração do complexo MDA/TBA foi então calculada pela seguinte equação: $[MDA] = (A_{535} - A_{600}) / (\epsilon \cdot b)$, em que: ϵ (coeficiente de extinção = $1,56 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$); b (comprimento ótico = 1).
- Conteúdo de peróxido de hidrogênio (H_2O_2): Determinado medindo-se a absorbância a 390 nm em um meio de reação, contendo 45 µL tampão fosfato de potássio 10 mM, pH 7,0, 45 µL do extrato e 90 µL de iodeto de potássio 1M (Velikova *et al.*, 2000). A quantificação foi realizada, com base na curva padrão de peróxido de hidrogênio, com concentrações conhecidas.
- Determinação do conteúdo de Prolina foi realizado utilizando 0,1g do material vegetal fresco das folhas, foi homogeneizado e macerado com 5 mL de ácido sulfosalicílico 3% e acondicionados em tubo falcon de 15 mL. Logo após o material extraído foi agitado a temperatura ambiente por 60 min e em seguida centrifugado a 5000 rpm por 10 min para coleta do sobrenadante. O conteúdo de prolina foi determinado em tubos de ensaio pela reação com a amostra, reagente ninhidrina (2,5 g de ninhidrina, 60 mL de ácido acético e 40 mL de ácido fosfórico 6M), água e ácido acético por 60 min a 100 °C. A reação foi interrompida em banho de gelo. A mistura reacional foi extraída com tolueno e a concentração de prolina foi determinada a partir de uma curva padrão (Bates *et al.*, 1973).
- Quantificação de proteínas solúveis totais foi realizada de acordo com método descrito por Bradford (1976), utilizando como corante o reagente Bradford BG-250 (Sigma-

Aldrich). As curvas padrões foram feitas com cinco concentrações de albumina de soro bovino (BSA 2,5 mg mL⁻¹): 0,001; 0,002; 0,003; 0,004 e 0,005 Ml. As leituras foram realizadas a 560 nm e o cálculo da enzima foi realizado com a seguinte equação: % de inibição = (A560 amostra com amostra – A560 controle sem amostra) / (A560 controle sem amostra).

- Índice relativo de clorofila (SPAD) foi avaliado com o clorofilômetro Konica Minolta® SPAD 502 plus, o qual possui elevada correlação com o teor relativo de clorofila, as avaliações foram realizadas na parte mediana da planta, sendo as folhas diagnosticas, a terceira folha do ápice para base, sendo a folha totalmente expandida, nos folíolos centrais, em três plantas, das 9 às 11 horas da manhã, por parcela. As avaliações de SPAD foram realizadas nos estádios fenológicos de V6, R1 e R6 (Fehr e Caviness, 1977) nas safras de 2022/2023 e na safra 2023/2024 (Werner *et al.*, 2018).

3.2.5 Análises estatísticas do experimento em casa de vegetação

3.2.5.1 Seleção de variáveis do experimento de casa de vegetação

Para identificar um conjunto de variáveis linearmente independentes para serem utilizadas nas análises dentro do conjunto de variáveis coletas para a condição experimental de casa de vegetação, e com isso evitar a realização de interpretações erradas ou resultados inconsistentes, adotou-se a matriz de correlações de Pearson na equação 11, a significância foi avaliada pelo teste *t* ao nível de 0,05 e 0,01 de probabilidade.

(11)

$$\rho_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\sqrt{(\sigma_i^2 * \sigma_j^2)}}$$

em que:

ρ_{ij} : correlação de Pearson entre as variáveis *i* e *j*;

σ_{ij} : covariância entre as variáveis *i* e *j*;

σ_i^2 : variância da variável *i*;

σ_j^2 : variância da variável *j*.

Em seguida identificou-se entre as variáveis a presença de multicolineariedade, conforme apresentado por Montgomery e Peck, (1981). Para a seleção de variáveis, o fator inflacionário da variância (FIV) conforme foi utilizado, conforme equação 12 (Marquardt, 1970):

(12)

$$FIV = \frac{1}{1 - R_i^2}$$

em que:

FIV : Fator inflacionário da variância;

R_i^2 : coeficiente de determinação obtido pela regressão entre i -enésima variável em com relação as demais mensuradas;

Após a remoção de uma variável com alto FIV, a matriz de correlação foi atualizada e então recalculado o número de condições, repetindo este procedimento até que o valor desejado fosse atingido para proceder com o procedimento de análise.

Os experimentos para cada condição de fertilidade do solo foram analisados individualmente com o modelo 13, em que foram aplicados os testes de normalidade residual de Shapiro-Wilk (Shapiro, Wilk, 1965). As variáveis analisadas foram divididas em dois grupos, agronômicas e fisiológicas para cada condição de fertilidade e os critérios de multicolineariedade foram verificados, conforme descrito na seção acima.

(13)

$$\bar{y} = \mu + X_r\tau_r + X_c\tau_c + X_t\tau_t + X_{ct}\tau_{ct} + \varepsilon$$

em que:

$\bar{y}$: Valor observado para a característica avaliada em cada condição de solo;

μ : constante associada a todas as observações;

$X_r\tau_r$: vetor do efeito fixo de repetições;

$X_c\tau_c$: vetor do efeito fixo de cultivares;

$X_t\tau_t$: vetor do efeito fixo de tratamentos;

$X_{ct}\tau_{ct}$: vetor do efeito fixo entre a interação de cultivares e tratamentos;

ε : vetor dos efeitos de erros associados as observações (aleatório), $\varepsilon \sim N(0, I\sigma_\varepsilon^2)$.

Os BLUEs (*Best Linear Unbiased Estimador*) obtidos para os grupos de variáveis foram então utilizados para as análises de componentes principais. A precisão experimental foi avaliada pela estimativa da acurácia (Resende, Duarte, 2007) para os fatores experimentais, conforme equação 14 e pelo coeficiente de variação experimental, na equação 15.

(14)

$$r\hat{g}g = \sqrt{1 - \frac{1}{F_g}}$$

em que:

$r\hat{g}g$: acurácia para o efeito do fator g ;

F_g : F calculado na análise de variância para o efeito do fator g .

(15)

$$CV_e = \frac{\sqrt{QMe}}{\bar{X}_i}$$

em que:

CV_e : coeficiente de variação experimental;

QMe : quadrado médio do resíduo;

$\bar{X}$: média geral da variável i .

3.2.5.2 Análise de componentes principais

A análise de componente principal (PCA) foi realizada com funções do pacote *stats* do ambiente R (R Core Team, 2020). Em que se utilizou a matriz de médias ajustadas padronizadas com média zero e variância igual a um para a estimação via decomposição de valor singular para a criação das variáveis latentes, ou componentes principais a partir da obtenção dos altos vetores, que determinam o sentido da rotação de cada componente obtido, e dos altos valores, que definem a variância de cada um dos componentes.

Para a representação gráfica, o biplot foi adotado conforme descrito por Gabriel (1971) e a elipse de confiança foi ajustada utilizados os recursos do pacote *car* (Fox, Weiserg, 2019) para determinar as regiões do plano bivariado do biplot com probabilidade de apresenta o verdadeiro valor estimado para o efeito de tratamentos, assumindo uma distribuição normal multivariada com nível de confiança de 0,8.

Para estimar a contribuição de cada variável na variação explicada por cada componente principal adotado no biplot, os autovetores associados a cada componente foram elevados ao quadrado e então convertidos em valores percentuais.

3.2.6 Aspectos computacionais

O ambiente R (R Core Team, 2020) versão 4.1.3 foi utilizado para o tratamento dos dados e para o ajuste dos modelos utilizados. Utilizou-se o pacote *lme4* (Bates *et al.* 2024) para

o ajuste do modelo linear misto. As ferramentas disponíveis no pacote *tydiverse* (Wickham *et al.*, 2019) foram utilizadas para a manipulação dos dados e para a plotar dos gráficos apresentados (Figura 5; 6; 7; 8; 9).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Experimento em Campo

Pode-se observar com os resultados, que o nível de confiabilidade dos dados e a precisão experimental está diretamente relacionado, com o planejamento experimental e modelo estatístico empregado. Neste sentido, utilizou-se a acurácia e o coeficiente de variação como os parâmetros para se aferir a precisão dos dados (Tabela 5).

Nesse estudo, as variáveis ALT-R8, SPAD-R1, PMG, PROD, MDA-V6, PRO-V6 e MDA-R1, apresentaram CV's com valores abaixo de 10% (Tabela 5). Isto é, a dispersão dos dados (variabilidade) em relação a média foi baixa, ou seja, alta precisão experimental, resultados estes corroborados pelos autores Sureshrao *et al.*, (2014) e Koraddi *et al.*, (2019). Por seu turno, as variáveis ACAM, AIPV, NVT, H₂O₂-V6, PTN-V6, H₂O₂-R1, PRO-R1 e PTN-R1, apresentaram CV's com valores entre 10 e 20%, evidenciando precisão mediantemente alta (Tabela 5). Por outro lado, a variável NRL, apresentou CV acima de 30%, o que é classificado como baixa precisão experimental. Avaliando a resposta do NRL, pode-se inferir que está é altamente dependente do estande de plantas e das características genéticas da cultivares em responder ao adensamento.

Pode-se observar que não se detectou efeito significativo para nenhum dos caracteres para a variação de safra. Isto é, as diferentes condições ambientais, de precipitação, temperatura média, máxima e mínima, insolação e umidade relativa do ar, não foram suficientes para influenciar de maneira direta os caracteres (Figura 2). Neste sentido, pode-se inferir que a alternativa mais eficaz é utilizar o desempenho médio dos tratamentos considerando os dois anos agrícolas. Por outro lado, a variância da interação entre safra e cultivar (Var SC), foi significativa para algumas variáveis, assim sendo, está evidente que o comportamento destes caracteres é dependente do ano agrícola, que por seu turno, está diretamente relacionado aos fatores ambientais imprevisíveis, tais como, ocorrência de chuva, veranico, geada, ataque de pragas e doenças (Barbosa, 2013; Gesteira *et al.*, 2015).

Como os fatores ambientais exercem influência sobre as cultivares, e ocorrem de forma aleatória, os agrônomos precisam ajustar as condições ambientais a seu favor, buscando

minimizá-las. Neste âmbito, uma alternativa que emerge é utilizar o desempenho médio das cultivares nos diferentes ambientes/anos agrícolas (Gesteira *et al.*, 2015, Rauf *et al.*, 2023).

Tabela 5 - Resumo da análise de variância (ANAVA) das variáveis agronômicas e bioquímicas, pelo teste de razão de verossimilhança dos experimentos de campo, realizados nas safras de 2022/23 e 2023/24, no município de Ijaci-MG.

Variáveis Agronômicas																
Fontes de variação	ALT-R8		ACAM		AIPV		SPAD-R1		NRL		NVT		PMG		PROD	
F cult	54,07	**	0,55	ns	2,16	ns	5,53	**	0,56	ns	0,28	ns	9,90	**	1,16	ns
F Trat	0,13	ns	6,04	**	1,86	ns	3,90	**	1,40	ns	1,60	ns	7,63	**	6,14	**
F CT	1,68	ns	5,45	**	1,46	ns	2,34	*	0,80	ns	0,70	ns	4,98	**	0,36	ns
Var Safra	32,59	ns	0,00	ns	5,88	ns	5,43	ns	0,77	ns	339,25	ns	85,92	ns	180417,83	ns
Var SC	18,86	ns	2,49	**	8,65	**	1,52	ns	1,57	*	505,61	**	30,02	ns	285136,79	ns
Var ST	111,64	*	0,05	ns	0,00	ns	0,30	ns	0,00	ns	3,45	ns	37,53	ns	28299,59	ns
Var SCT	11,26	ns	0,00	ns	0,00	ns	0,00	ns	0,28	ns	40,41	*	0,00	ns	149368,47	*
Média	106,41		3,12		14,17		40,16		2,27		51,43		190,13		5369,47	
CV	4,30		13,60		14,90		5,11		34,69		13,39		5,18		7,35	
Variáveis bioquímicas																
Fontes de variação	H2O2-V6		MDA-V6		PRO-V6		PTN-V6		H2O2-R1		MDA-R1		PRO-R1		PTN-R1	
F cult	0,51	ns	0,04	ns	33,94	**	0,05	ns	0,41	ns	8,06	**	0,47	ns	0,17	ns
F Trat	5,26	**	2,31	ns	17,96	**	5,38	**	0,89	ns	0,62	ns	0,79	ns	7,03	**
F CT	1,62	ns	3,11	**	18,71	**	0,63	ns	0,69	ns	1,76	ns	0,54	ns	0,68	ns
Var Safra	0,04	ns	3,49	ns	2,34	ns	161979510,30	ns	0,08	ns	6,52	ns	0,06	ns	114344942,02	ns
Var SC	0,33	ns	21,07	*	0,00	ns	91998014,52	ns	0,06	ns	0,00	ns	759,70	**	17051574,64	ns
Var ST	0,00	ns	4,94	ns	0,00	ns	0,07	ns	0,02	ns	2,01	ns	38,03	ns	4512161,35	ns
Var SCT	0,33	**	2,17	ns	6,87	**	13337904	ns	0,02	ns	12,66	**	148,21	**	1,66	ns
Média	3,15		33,10		19,90		74694,44		2,43		30,86		33,84		74475,24	
CV	11,45		6,61		7,74		16,21		11,64		8,37		11,24		17,80	

**Significativo pelo teste LRT ($p < 0,01$); *Significativo pelo teste LRT ($p < 0,05$); ns Não significativo;

F cult: F calculado de cultivar; F Trat: F calculado dos tratamentos; F CT: F calculado da interação de cultivares de tratamentos; Var Safra: Variância da safra; Var SC: Variância da interação de safra e cultivares; Var ST: variância da interação de safra e tratamentos; Var SCT: variância da interação de safra, cultivares e tratamentos; Média: média dos das variáveis respostas; CV: Coeficiente de variação. Fonte: Do autor (2024).

As variáveis que foram significativas para a interação safra cultivares, foram acamamento, altura de inserção da primeira vagem, número de ramos laterais, número de vagens total, malondialdeído no estádio de V6 e prolina no estádio de R1. Esta significância observada está em acordo com a literatura (Andirman *et al.*, 2023), isso porque as variáveis agronômicas estão ligadas as características genéticas da cultivar, ou seja durante as etapas de melhoramento, selecionou-se a cultivar com as características desejadas, como maior produtividade e precocidade e que por sua vez podem se interagir com os fatores ambientais (Filho *et al.*, 2022).

Está evidente também o efeito da interação genótipos*safras, que condiciona as manifestações fenotípicas (Rani *et al.*, 2023). A precipitação decorrente ao longo da safras foram expressivas em fases fenológicas distintas (Figura 2). Ou seja, a maior ocorrência de chuvas ficou concentrado na fase final do ciclo das cultivares na safra 2022/23. Por outro lado, na safra 2023/24 o maior volume de chuva ocorreu no início do ciclo das cultivares de soja, o que evidencia a influência deste efeito de safra na expressão dos caracteres.

Nesse mesmo sentido, as variáveis fisiológicas malondialdeído no estádio de V6 e prolina no estádio de R1, podem ser avaliadas como respostas ao ambiente. O malondialdeído é produto da degradação da membrana celular, através de reações de oxidação. Por seu turno, a prolina é um aminoácido das plantas que evita a degradação celular (Tabela 5). Ou seja são substâncias antagonistas, com funções opostas. Neste sentido o MDA sinaliza para o metabolismo da planta quando o ambiente está desfavorável, produzindo assim mais aminoácido (prolina) que será concentrando nas folhas (Li *et al.*, 2021).

A variância safra*tratamento (ST) foi significativa somente para a variável resposta altura de plantas em R8, com 95,00% de probabilidade (Tabela 5). Esse comportamento evidencia que pulverizações de boro via foliar impactam no crescimento das plantas, uma vez que o boro possui diferentes funções, sendo uma delas estrutural, condicionando assim o crescimento das cultivares de soja (Pawlowski *et al.*, 2019).

A variância da interação tripla safra*cultivares*tratamentos, permite verificar o efeito conjunto dessas fontes de variação. Houve significância para as variáveis agronômicas, número de vagens total e produtividade (Tabela 5). Nas variáveis fisiológicas observou-se significância para os caracteres, peróxido de hidrogênio no estádio de V6, prolina no estádio de V6, malondialdeído no estádio de R1 e prolina no estádio de R1.

O fato de a interação tripla significativa (Tabela 5) somente para o número de vagens total e produtividade, denota que para obtenção de produção de grande magnitude, deve-se pensar no sistema produtivo como um todo, um sistema circular e complexo (Moreira *et al.*,

2023), uma vez que desde efeitos ambientais, como o manejo adotado em safras anteriores, irão refletir no presente, como a escolha da cultivar e qual estratégia dever-se-á adotar (Tenelli *et al.*, 2021).

Em relação as variáveis bioquímicas/fisiológicas peróxido de hidrogênio no estágio de V6, prolina no estágio de V6, malondialdeído no estágio de R1 e prolina no estágio de R1, está evidente que MDA e H_2O_2 , são produtos do estresse ambiental. Por outro lado, a prolina pode atenuar este efeito, ou seja as cultivares de soja possuem mecanismos para superar os impactos ambientais (Barcelos, 2022; Li *et al.*, 2021) (Tabela 5).

As variáveis respostas que foram significativas de acordo com o F calculado, foram altura em R8, no entanto somente para a fonte de variação cultivares, evidenciando que o efeito de aplicações e épocas de boro via foliar na soja não interferiram negativamente ou positivamente sobre o seu crescimento, mais sobretudo o o efeito genético. Por seu turno, as variáveis resposta para peróxido de hidrogênio no estágio de V6, quantidade de proteínas em R1 e produtividade foram significativas somente para o efeito de tratamentos, denotando que independente da cultivar os tratamentos aplicados propiciam diferenças, proporcionando ganhos e melhoria de desempenho (Tabela 5).

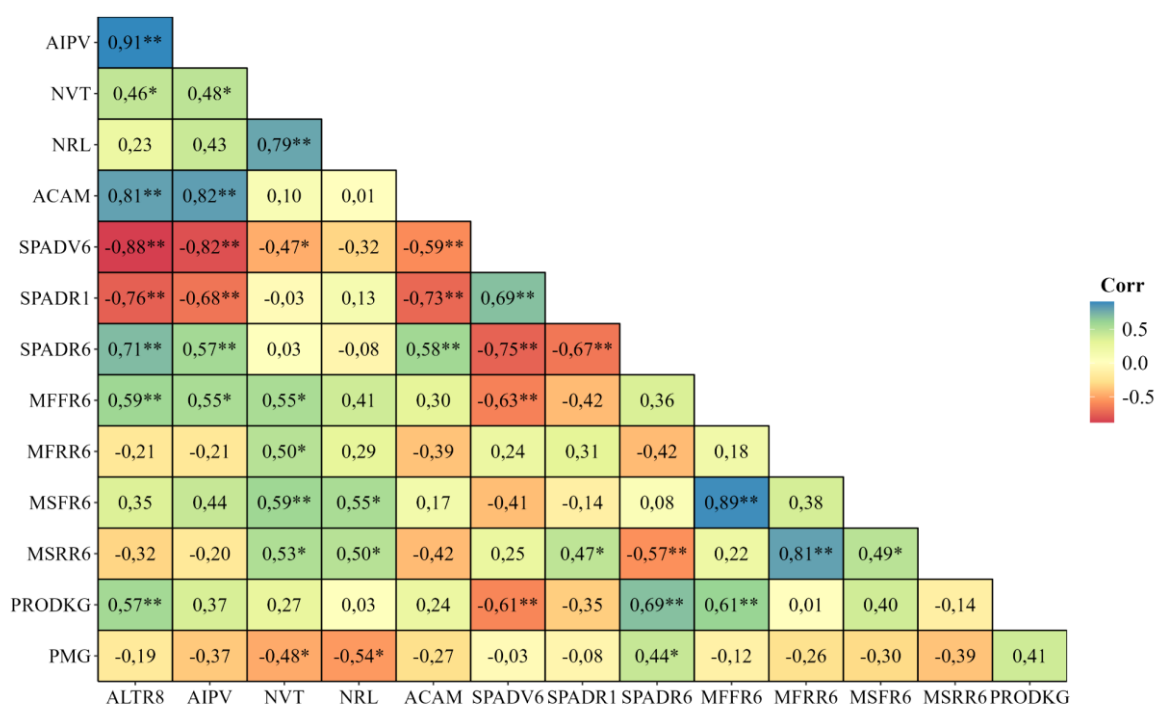
Tendo em questão a interação CT, observa-se significância para os caracteres acamamento, malondialdeído no estágio de V6, Prolina no estágio de V6 e peso de mil grãos, e ao nível de significância de 95,00% para índice SPAD em R1 (Tabela 5). A significância para a interação cultivar e tratamentos, permite inferir que o acamamento pode ser manipulado e evitado se for manejado com a fonte e época correta de aplicação via foliar de boro. Neste mesmo sentido, pode-se destacar que em condições de déficit hídrico, com produção de compostos de degradação de membrana (MDA-V6) e do sistema antioxidante (PRO-V6), é possível associar ferramentas de manejo e sobretudo cultivares adequadas para o ambiente, visando minimizar o efeito de déficit hídrico e maximizar o potencial produtivo, mesmo em situações adversas.

Tendo em relação os carecteres peso de mil grãos e o índice SPAD, é possível verificar que o componente que mais afeta a produtividade , isto é o peso de grãos, está diretamente relacionado com efeitos genéticos, ou seja, a escolha adequada da cultivar que já possui naturalmente maior densidade de seus grãos (Pelekh, 2021). Pode-se destacar também que a adequação das aplicações, isto é na época correta e sobreudo adotando a melhor fonte, emerge como estratégia de manejo visando maiores produtividades e sobretudo melhor resiliência da soja no ambiente de estresse hídrico.

Por seu turno, o índice SPAD confirma o efeito de tratamentos à base de boro via foliar em momento de pré e pós floração, produzindo plantas com maior concentração de clorofila nas folhas, logo, a planta possui maior maquinário de conversão de energia luminosa em química e assim maior produtividade (Galeriani *et al.*, 2022).

A partir da análise de variância, pelo teste LRT (Zhang *et al.*, 2019), foi possível realizar Análise de correlação de Pearson, que facilita a compreensão e comportamento das variáveis respostas e o efeito entre essas (Figura 5). É possível verificar que as variáveis de arquitetura de plantas, como, altura de plantas no estágio de R8 e produtividade denotam correlação positiva de 0,57**, o que permite afirmar que plantas com maior altura final serão mais produtivas (Kovalenko *et al.*, 2023). Neste mesmo sentido, a altura de plantas em R8 e número de vagens total, também se associaram positivamente (0,46*), o que confirma que plantas com maior altura de plantas tendem a apresentar maior número de vagem e por consonância, maior produtividade (Figura 5).

Figura 5 – Correlação dos caracteres agrônômicos, dos experimentos de campo das safras de 2022/23 e 2023/24.



**Significativo pelo teste de correlação de Pearson ($p < 0,01$); *Significativo pelo teste de correlação de Pearson ($p < 0,05$); ^{ns} Não significativo. Corr: escala de correlação de 1 a -1.

Fonte: Do autor (2024).

Por outro lado, plantas com maior altura em R8, apresentam correlação positiva também com acamamento (0,81**) e altura de inserção da primeira vagem (0,91**), o que comprova

que plantas, com maior altura final, em R8, são mais susceptíveis ao acamamento (Figura 5). O acamamento é prejudicial a colheita, devido a lamina de corte da colhedora, cortar plantas na altura inadequada, causando assim perdas (Hussain *et al.*, 2019); Neste mesmo sentido, foi possível observar também que plantas com maior altura de inserção da primeira vagem, permitem que o centro de gravidade da planta desloque da base (Kang *et al.*, 2017; Nakamura *et al.*, 2019) aumento a suscetibilidade ao acamamento, e também acarretando que a planta de soja apresente internódios mais longos, reduzindo assim a produção (Shan *et al.*, 2022).

Merece destaque também a correlação entre altura de planta em R8 e índice SPAD em R1 é negativa (-0,76**) (Figura 5), ou seja, plantas com maior concentração de clorofila, não irão apresentar maior altura final de plantas, sendo, portanto, a clorofila do estágio em R1, degrada, transformada em substancias passíveis de transporte, e direcionadas para outros drenos, como racemos florais, vagens, ramos laterais, desenvolvimento do sistema radicular, entre outros, além do crescimento da soja em se (meristema apical) (Galeriani, *et al.*, 2022).

Outra correlação que se tem com índice SPAD é a altura de inserção da primeira vagem (-0,68**), comprovando que plantas com alto índice SPAD no estágio de florescimento (concentração de clorofila), não irão possuir altura de inserção da primeira vagem elevada (Figura 5). Portanto, plantas com alta concentração de clorofila, irão possuir baixa altura de inserção da primeira vagem, o que vai de acordo com a correlação de altura de plantas em R8, índice SPAD e altura de inserção da primeira vagem, evidenciando o efeito de fonte e dreno nas plantas de soja, e que a clorofila nos estádios reprodutivos é direcionada para manutenção de vagens mais basais e enchimento de grãos; e em menor proporção para o crescimento de plantas e alongamento de internódios (altura de inserção de primeira vagem elevado) (Bhatla *et al.*, 2023).

Ademais, o índice SPAD elevado em R1, emerge para a redução do acamamento de plantas, devido a correlação negativa entre os dois parâmetros (-0,73**) (Figura 5). Isso porque a planta, a partir de R1, começa a direcionar seu metabolismo para suas estruturas reprodutivas e não para o crescimento e com isso diminuindo o acamamento (Bhatla *et al.*, 2018).

Por seu turno, as variáveis dos componentes de produção da cultura da soja, o componente número de vagens total, apresentam correlação com peso de mil grãos (-0,48*) e número de ramos laterais (0,79**), o que permite a interpretação de que os componentes de produção competem intrinsecamente na planta, fazendo com que plantas com maior número de vagens por planta e conseqüente maior quantidade de ramos laterais, apresentem grãos com menor peso (Coelho *et al.*, 2023) (Figura 5). O que, comprova ainda mais a afirmação anterior, de que os drenos da planta competem internamente é que a correlação entre número de ramos

laterais e peso de mil grãos foi de -0,54*, ou seja, plantas com alto peso de grãos tendem a não apresentar muitas ramificações.

Com o objetivo de se compreender melhor os dados obtidos no presente estudo, foi realizado a análise de componentes principais (PCA), que permite analisar os efeitos observados por meio de um agrupamento mantendo o máximo de informações possíveis (Rehman *et al.*, 2020). Sendo assim, foi realizado a análise PCA dos dados agronômicos, dos experimentos de campo, das duas safras (2022/23 e 2023/24), no município de Ijaci, no estado de Minas Gerais (Figura 6). Os dois componentes principais explicaram 71,01% da variação total, o que permite inferir que o modelo bidimensional ajustou aos dados obtidos e explicou a quase totalidade da variação observada.

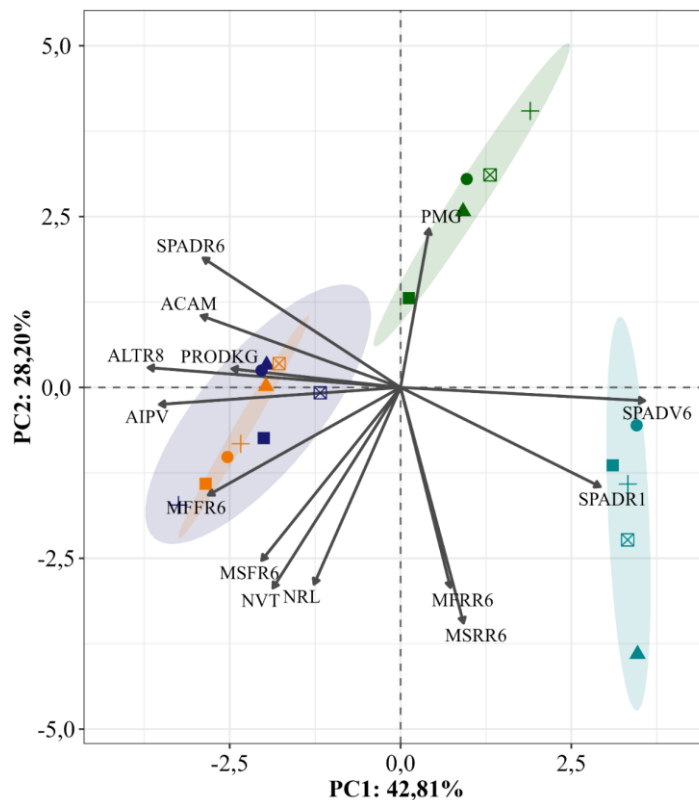
É possível inferir também, que há diferença de comportamento entre as cultivares Pioneer® 95R21E e Zeus, que apresentam menor grupo de maturidade relativa (5.2 e 5.5) em relação as cultivares Pioneer® 97R50 IPRO e UFLA6301RR (7.5 e 6.3), que são consideradas de ciclo tardio e normal para a região na qual o experimento foi implementado (Figura 6).

Com a análise de PCA, é possível afirmar que as variáveis altura de inserção da primeira vagem, altura de plantas em R8, produtividade, índice de acamamento e índice SPAD em R6 possuem alta correlação, isso porque os vetores destas possuem o mesmo sentido, no segundo e terceiro quadrante, no qual se encontra as cultivares Pioneer® 97R50 IPRO e UFLA6301RR (Figura 6).

A cultivar que apresentou maior altura de plantas em R8 foi a Pioneer® 97R50 IPRO, com 126,36 cm de altura, e a que apresentou menor altura de plantas em R8 foi a Pioneer® 95R21E com 59,61 cm, o que é evidenciado na análise de PCA. É possível afirmar também que as cultivares Pioneer® 97R50 IPRO e UFLA6301RR obtiveram maior altura de inserção da primeira vagem e índice de acamamento. No âmbito da produtividade de grãos observou-se 5329,06 e 4135,99 Kg/ha e índice SPAD em R6 de 47,18 e 48,6, respectivamente (Figura 6).

Por outro lado, as cultivares destacadas anteriormente, apresentam correlação negativa das variáveis respostas altura de inserção da primeira vagem, altura de plantas em R8, produtividade, índice de acamamento e índice SPAD em R6, com índice SPAD em V6 e R1, confirmando que ao longo do ciclo as cultivares direcionam suas reservas, e seus aparatos fisiológicos para seus grãos, garantindo alta produção. E que ao longo do ciclo da soja, existe a senescência de baixo para cima (basipeto), propiciando um fluxo de translocação de reservas e do aparato fotossintético (Lindoo *et al.*, 1977) (Figura 6).

Figura 6 – Análise de PCA, dos caracteres agronômicos, dos experimentos de campo das safras de 2022/23 e 2023/24; em função dos tratamentos e cultivares.



Tratamentos:

● Ácido bórico em R1; ▲ Ácido bórico em V6; ■ Boro-MEA em R1; + Boro-MEA em V6; ☒ Testemunha.

Cultivares:

■ UFLA 6301RR; ■ Pioneer 95R21E; ■ Pioneer 97R50IPRO; ■ Zeus.

Fonte: Do autor (2024).

Outra correlação, que pode ser mencionada, é a massa fresca da parte aérea em R6 (MFFR6), massa seca da parte aérea em R6 (MSFR6), número de vagens total (NVT) e número de ramos laterais (NRL), que também possuem mesmo sentido, direcionados no terceiro quadrante, e opostos do vetor de peso de mil grãos que se encontra no primeiro quadrante. Logo, é possível afirmar que a correlação positiva entre MFFR6 e MSFR6 de 0,89** denota que o tratamento com boro garante maior biomassa das plantas e estruturação, permitindo que ocorra o crescimento de ramos laterais (NRL) e desenvolvimento de vagens (NVT) em toda a planta.

É oportuno comentar também que a cultivar Pioneer® 97R50 IPRO (ciclo mais tardio) apresenta maior biomassa, com a aplicação de boro-MEA independente da época (V6/Vn ou R1/R2). No entanto a aplicação de boro em comparação a testemunha para NRL e NVT, propiciou ganhos, contudo sem distinção as fontes e épocas de aplicação. Sendo assim, pode-se afirmar que o boro proporciona ganhos quanto a biomassa em R6, número de vagens total e

número de ramos laterais, o que garante maior resiliência as plantas de soja sobretudo em momentos de estresse hídrico (Dass *et al.*, 2022).

No quarto quadrante, é possível observar que as variáveis massa fresca e massa seca do sistema radicular em R6 (MFRR6, MSRR6) possuem alta correlação 0,81** (Figura 6), e que os vetores dessas variáveis respostas possuem médias maiores nas cultivares mais precoces, Pioneer® 95R21E e Zeus, comprovando que cultivares mais precoces possuem sistema radicular mais bem estabelecido, e também evidenciando que o boro atua sobre o sistema radicular proporcionando maior biomassa das raízes (Yan *et al.*, 2019; Salim *et al.*, 2021).

Existe também correlação significativa entre índice SPAD em V6 e índice SPAD em R1 de 0,69**, com a cultivar Pioneer® 95R21E, obtendo em V6/Vn 35,87 e em R1/R2 45,87 (Figura 6), validando a hipótese de que as cultivares mais precoces por serem mais sensíveis a luz, vão possuir um ciclo menor, demandando assim um sistema fotossintético mais eficiente para que garanta que as plantas de soja mesmo com menor ciclo produzam igual ou até mais que as cultivares de ciclo mais tardio (Pioneer® 97R50 IPRO e UFLA 6301RR).

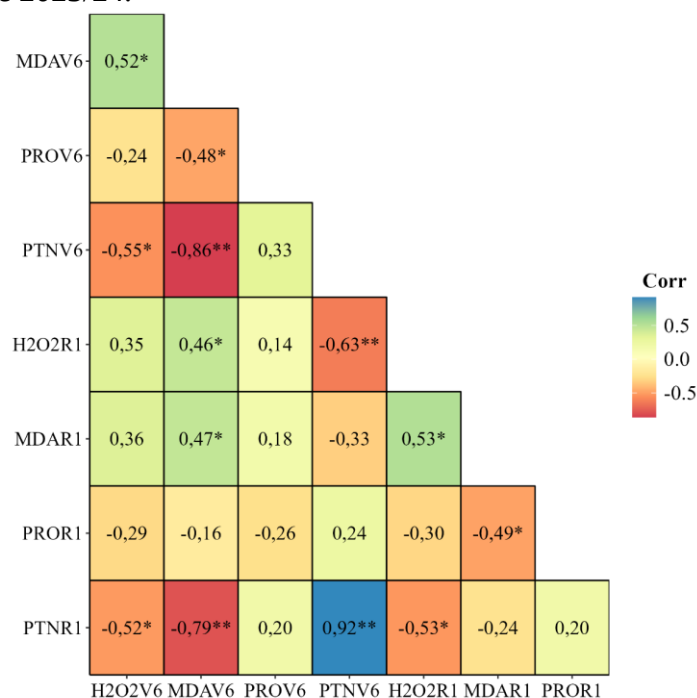
Tendo em relação o vetor do peso de mil grãos no quadrante um, destaca-se com maior média fenotípica a cultivar Zeus, grupo de maturidade relativa 5.5 (ciclo precoce para região sul de Minas/Campo das Vertentes), o qual apresentou 254,74 g com o tratamento de ácido bórico em V6/Vn, seguido de boro-MEA em V6/Vn e ácido bórico em R1/R2, comprovando que as aplicações de boro proporciona ganhos nos componentes de produção da soja. Deve-se enfatizar também que o peso de mil grãos tem relação direta na produtividade. Neste sentido, o emprego do boro via foliar na soja figura-se como alternativa importante visando o incremento da produtividade de grãos na cultura da soja (Dameto *et al.*, 2022; Dameto *et al.*, 2023).

Neste mesmo sentido, com o propósito de compreender melhor os efeitos das aplicações de boro via foliar foi realizado as análises de PCA, para as variáveis fisiológicas e bioquímicas das cultivares de soja (Figura 7). É possível observar que peróxido de hidrogênio em V6 (H₂O₂-V6) possui correlação com quantidade de proteínas solúveis totais em R1/R2 (PTN R1) de -0,52*, proteínas solúveis totais em V6/Vn (PTN V6) de -0,55* e também com peroxidação lipídica em V6 através da detecção do malondialdeído (MDA V6) de 0,52*. Assim como, MDA V6 possui correlação com a quantidade de proteínas em V6 e R1, de -0,79** e -0,86**, e também com Prolina em V6, de -0,48*. E a quantificação de MDA em R1 possui correlação também com Prolina em R1 (-0,49*) e com H₂O₂ em R1 (0,53*).

É possível verificar também que existe correlação muito alta entre quantidade de proteínas em V6/Vn e proteínas em R1/R2. O que permite a interpretação de que cultivares de soja com folhas com maior quantidade de proteínas em V6 e R1, garantem menor produção de

compostos da degradação da membrana (MDA e H_2O_2), que são produtos da oxidação da membrana das folhas, logo, a folha que apresenta alta produção dessas duas substâncias encontra-se em estresse oxidativo. Pode-se afirmar também que a cultivar não possui resiliência ao estresse que se encontra (Haq *et al.*, 2019).

Figura 7 – Correlação dos caracteres fisiológicos, dos experimentos de campo das safras de 2022/23 e 2023/24.



**Significativo pelo teste de correlação de Pearson ($p < 0,01$); *Significativo pelo teste de correlação de Pearson ($p < 0,05$); ^{ns} Não significativo. Corr: escala de correlação de 1 a -1.

Fonte: Do autor (2024).

Em sentido contrário, a alta produção de prolina, emerge que a planta está com o sistema antioxidante ativo na tentativa de minimizar os efeitos dos estresse hídrico, assegurando a resiliência da cultura. A prolina é um aminoácido de construção das proteínas e serve como um osmoprotetor para plantas em situação de estresse ambiental (salinidade, seca, excesso de chuva e alta radiação) (Batista *et al.*, 2019).

Portanto, MDA em V6 e R1, denotam correlação negativa com proteína e prolina, evidencia que as cultivares de soja são promissoras a resistência ao estresse hídrico, e que a aplicação de boro via foliar proporciona ganhos e sobretudo vantagens, independente da época de aplicação (V6/Vn e R1/R2) e da fonte (boro-MEA e ácido bórico), em comparação a testemunha (Figura 7). Assim, os tratamentos com boro, independente da cultivar e da época de aplicação propicia de 20.457 a 23.386 mg de proteína g^{-1} de MF a mais que a testemunha. Quanto ao conteúdo de prolina, a cultivar que apresentou maior conteúdo foi a Pioneer®

95R21E. A melhor fonte e época de aplicação foram boro-MEA na de aplicação de R1, apresentando diferença quanto a testemunha de 53,8 μmol de prolina g^{-1} MF (Figura 7). Já a cultivar que mais possui prolina em R1/R2, é a Pioneer® 97R50 IPRO (50,95 μmol de prolina g^{-1} MF), sendo a fonte mais responsiva o ácido bórico (H_3BO_3).

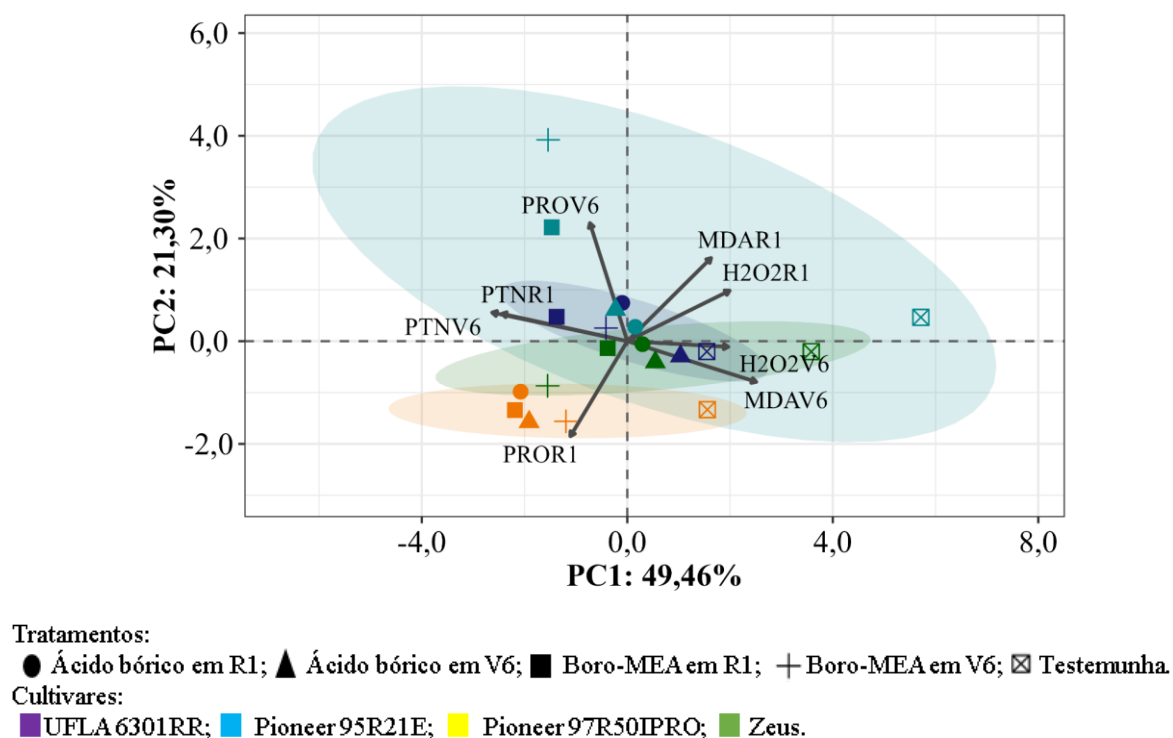
É possível verificar também que as cultivares de soja que entraram em situação de estresse oxidativo, formaram espécies reativas de oxigênio (EROs), como o peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e o subproduto, malondialdeído (MDA), devido a degradação de lipídios das membranas (tóxicos). Sendo assim, de acordo com os resultados obtidos, a planta apresentar alto conteúdo de MDA, remete a possuir alto conteúdo de H_2O_2 , devido a correlação entre as duas moléculas, em algumas épocas do ciclo da cultura (Figura 7) (Wang *et al.*, 2022).

Já pela análise de PCA para as variáveis fisiológicas, dos experimentos de campo (Figura 8), é possível observar o comportamento das correlações entre as cultivares e os tratamentos frente as variáveis respostas. Os dois primeiros componentes principais explicaram 70,76% da variação total, o que permite inferir que o modelo bidimensional ajustou aos dados obtidos. No primeiro quadrante é possível afirmar que no estágio de R1, MDA e H_2O_2 possuem correlação, e que a cultivar que mais produziu essas duas substâncias foi a cultivar Pioneer® 95R21E, e que as duas substâncias possuem correlação com prolina no mesmo estágio, devido ao sentido dos vetores (Figura 8).

Destaca-se também que a aplicação de boro em qualquer fonte e época de aplicação seja proporciona resistência ao déficit hídrico para as cultivares (Figura 8). Quanto a produção de prolina no estágio de R1, a cultivar que apresentou maior conteúdo foi a Pioneer® 97R50 IPRO, sendo os tratamentos à base de ácido bórico apresentando maior quantidade de prolina nas duas épocas críticas da cultura, V6/Vn (pré florescimento) e R1/R2 (florescimento e emissão de vagens) (Figura 8).

Já no segundo quadrante é possível verificar que o conteúdo de proteínas em V6/Vn e R1/R2 possuem alta correlação positiva de 0,92**, ou seja, a soja que possui alto teor de proteína no estágio de florescimento (V6/Vn), também possuirá alta quantidade nas folhas após o florescimento (R1/R2), e que a aplicação via foliar de boro nas duas épocas de aplicação proporciona ganhos quanto a proteínas em folhas, quando comparado a testemunha. Emerge também proteína em V6/Vn e R1/R2 possuem correlação negativa (-0,86**, -0,79**, -0,55*, -0,52*) com H_2O_2 em V6/Vn e MDA em V6/Vn, ou seja, se a cultivar de soja apresentar alto conteúdo de proteínas nas folhas, tende a obter maior resiliência em ambientes de estresse hídrico, formando menos MDA e H_2O_2 , que são produtos da degradação da membrana (Figura 8).

Figura 8 – Análise de PCA, das dos caracteres fisiológicos, dos experimentos de campo das safras de 2022/23 e 2023/24.



Fonte: Do autor (2024).

Outra perspectiva da análise de PCA para componentes fisiológicos, seria verificar quais variáveis respostas são prejudiciais para as plantas, como MDA e H_2O_2 ao longo do ciclo. Pode-se observar que estes componentes estão fortemente relacionados as cultivares mais precoces (Pioneer® 95R21E e Zeus) (Figura 8). Neste sentido, pode-se inferir que as cultivares precoces, devido ao seu período de vegetação reduzido, entram rapidamente no estágio reprodutivo e completam seu ciclo de maturação em um curto espaço de tempo, o que emerge inferir que estas cultivares estão potencialmente mais suscetíveis ao estresse oxidativo. Isso ocorre, devido à possível ineficiência na ativação do sistema antioxidante, que pode não ser realizado de forma rápida e eficiente. Por seu turno, essas cultivares tendem a priorizar o metabolismo central, direcionando seus metabólitos principalmente para os órgãos reprodutivos, vagens e grãos (Gebre *et al.*, 2022).

Em contraste a observação anterior, as cultivares mais tardias, devido ao prolongado período de vegetação e estruturação, denotam uma capacidade aprimorada de direcionar recursos para múltiplos aspectos metabólicos, incluindo proteção contra estresses, produção de biomassa, ativação do sistema antioxidante e eficiência no aproveitamento de nutrientes (Figura 8). Esse fenômeno pode ser atribuído à menor sensibilidade ao fotoperíodo existente nas cultivares tardias, o que permite um tempo mais extenso para o desenvolvimento,

estabelecimento e reprodução da planta (Miranda *et al.*, 2023). Vale ressaltar também, que as aplicações de boro, propiciaram menor conteúdo de compostos que degradam as plantas (MDA e H_2O_2), quando comparados as testemunhas sem tratamento com boro, permitindo ressaltar que o boro pode atenuar o efeito do estresse.

Uma observação que merece destaque é efeito da aplicação de boro na ação de outros nutrientes, podendo estes se correlacionarem de forma positiva (um nutriente gera aumento a absorção e translocação de outro) e de forma negativa (um nutriente prejudicando a absorção e translocação de outro). Neste sentido, procedeu-se a análise de associação entre as épocas de aplicação e as diferentes fontes de boro frente a macro e micronutrientes (Figura 9).

Figura 9 – Correlação das análises nutricionais com o boro, e produtividade (Kg/ha) do experimento de campo da safra de 2022/23.

	Ácido bórico-R1			Ácido bórico-V6			Boro MEA-R1			Boro MEA-V6			Testemunha			Fontes
Zn	1,00*	0,74	-0,04	-0,90	0,96	0,95	-0,95	0,44	-1,00*	0,64	-0,35	-0,26	0,90	0,79	0,94	
Cu	0,73	1,00*	0,98	-0,99	0,81	1,00	-0,16	0,18	0,15	0,00	-0,55	-0,98	-0,71	0,62	-0,90	
Mn	-0,98	0,87	-0,63	0,95	1,00*	0,41	-0,66	0,51	-0,30	0,29	0,07	0,83	0,60	0,70	0,75	
Fe	1,00*	-0,29	-0,60	-0,88	-0,47	-0,56	0,19	-0,17	0,51	-0,97	0,99	0,96	0,72	0,98	0,93	
S	0,30	0,41	0,54	0,99	0,56	0,12	-0,51	0,90	-0,46	0,03	1,00	1,00	0,68	0,92	0,93	
Mg	0,52	0,45	-0,14	0,02	-0,80	-0,66	0,77	0,11	0,58	-0,40	-0,99	0,74	-0,44	0,97	0,93	
Ca	0,91	-0,99	-0,72	-0,72	-0,98	-0,95	-0,49	-0,23	0,02	-0,70	-0,96	0,86	0,43	0,45	0,91	
K	-0,32	0,87	0,63	-0,91	0,05	0,63	0,99	0,60	-0,13	-0,24	0,56	-0,89	-0,96	0,87	-0,63	
P	0,07	0,80	-0,83	0,45	1,00	-0,96	0,90	0,53	0,37	0,57	-0,34	0,97	-0,57	0,83	-0,33	
N	-0,33	1,00*	0,04	0,89	-0,62	0,94	0,95	-0,91	-0,24	-0,81	-0,56	-0,59	-0,99	0,78	-0,87	
	V6	R1	R6	V6	R1	R6	V6	R1	R6	V6	R1	R6	V6	R1	R6	
	5.213 Kg/ha ^{1/}			5.499 Kg/ha ^{1/}			5.664 Kg/ha ^{1/}			5.579 Kg/ha ^{1/}			4.360 Kg/ha ^{1/}			Produtividade
	b			a			a			a			c			

**Significativo pelo teste de correlação de Pearson ($p < 0,01$); *Significativo pelo teste de correlação de Pearson ($p < 0,05$); ^{ns} Não significativo. Corr: escala de correlação de 1 a -1.

^{1/} Médias seguidas da mesma letra pertencem ao mesmo grupo pelo teste Scott-Knott (1974).

Fonte: Do autor (2024).

Quando foi aplicado ácido bórico (H_3BO_3) no estágio de R1, pode-se observar que no estágio de pré florescimento de V6/Vn, os nutrientes que possuíam correlação positiva (sinergismo) eram Cálcio (0,91), Ferro (1,00) e Zinco (1,00). A correlação negativa (antagonismo) foi observada somente para o Manganês (-0,98). Por outro lado, a aplicação do ácido bórico em R1, propiciou o sinergismo com o nitrogênio (1,00), fósforo (0,80), potássio (0,87), Manganês (0,87) e Cobre (1,00). No entanto, ocorreu correlação negativa com cálcio (-0,99), sendo, portanto, o aumento da disponibilidade de boro nas folhas prejudicial ao nutriente cálcio. Isso se deve ao fato, de o boro e do cálcio possuírem algumas funções fisiológicas semelhantes, como a estruturação da planta, causando essa queda de cálcio nas folhas (Galeriani *et al.*, 2022).

Por seu turno, em R6 é possível verificar o comportamento dos nutrientes durante a fase final da cultura da soja, no período reprodutivo. Ocorreu a queda da maioria dos teores, com exceção do cobre (0,98) que se manteve com correlação positiva significativa, e do cálcio (-0,72) e fósforo (-0,83), correlação negativa (Figura 9). Uma possível explicação para este fato pode ser aventado devido o cálcio e o boro possuírem funções similares, fazendo com que a planta utilize o nutriente que está em maior concentração no momento, emergindo assim a correlação negativa (Blagorodova *et al.*, 2021). No entanto, do ponto de vista produtivo, é possível observar que o tratamento mesmo com alterações no balanço nutricional, produziu 853 Kg/ha a mais que testemunha (Figura 9).

No âmbito do nutriente fósforo, o alicerce científico para este comportamento fisiológico é devido a sua alta mobilidade nas plantas e também sua função de armazenamento de energia e integridade estrutural, como componente de adenosina trifosfato (ATP), ácidos nucleicos e nucleotídeos (Bechtaoui *et al.*, 2021). Em relação ao cobre, este manteve-se em correlação positiva devido não estar em situação de excesso no solo, não causando toxidez para as plantas (Shabbir *et al.*, 2020).

Tendo em relação a associação dos nutrientes com a aplicação de ácido bórico no estágio V6, pode-se observar que o nitrogênio, enxofre e manganês possuem correlação positiva de 0,89; 0,99 e 0,95 respectivamente; e potássio, ferro, cobre e zinco possuem correlação negativa de -0,91; -0,88; -0,99 e -0,90 respectivamente (Figura 9). Neste sentido, observa-se o efeito imediato da aplicação de boro nos nutrientes nitrogênio e manganês (Vieira *et al.*, 2019). Por outro lado, o efeito imediato, não se repete para a aplicação de ácido bórico em V6, divergindo da aplicação de ácido bórico em R1 (Figura 9).

Considerando no estágio de R6 é possível verificar o efeito residual do ácido bórico, o qual denota a mobilidade do nitrogênio e sua movimentação na planta, pois este nutriente apresenta sinergismo com boro (0,94). Este fato também foi reportado por Gupta (2020). Ocorre também a correlação com cobre (1,00) e zinco (0,95). No entanto associação negativa de fósforo e cálcio (Figura 9). A pulverização de ácido bórico em V6, em comparação a testemunha nos permite observar os efeitos da aplicação que proporcionou ganhos de produção de mais de mil e cem Kg/ha, isso devido ao efeito sobre as concentrações de nitrogênio nas folhas e também reduzindo as concentrações de cobre e zinco, que podem gerar toxidez e com isso reduzir produtividade.

Em comparação a aplicação de boro-MEA no estágio de R1, é possível verificar que antes da aplicação os nutrientes nitrogênio, fósforo e potássio possuem correlação com boro, respectivamente de 0,95; 0,90 e 0,99; já o zinco possui correlação negativa -0,95. E em R1,

ocorre somente correlação com enxofre (0,90), e associação negativa com o nitrogênio (-0,91). Por seu turno, no estágio de R6, somente zinco possui correlação -1,00 (Figura 9).

Já para o tratamento com boro-MEA em V6, é possível verificar que se obteve correlação do ferro com o boro (-0,97). A curto prazo a aplicação de boro impactou diretamente sobre a concentração de ferro nas folhas. E em R1, o cálcio e magnésio denotam correlação negativa como boro, respectivamente -0,96 e -0,99; e o enxofre o e o ferro correlação positiva, de 1,00 e 0,99 (Figura 9). Uma observação que merece destaque é o comportamento do teor de ferro após a aplicação, correlação positiva, e com o passar do tempo ocorreu inversão, isto é associação negativa, evidenciando que o boro, prejudicou a absorção e translocação desse nutriente na planta (Long *et al.*, 2023).

Sendo assim, em R6, a concentração de alguns nutrientes foi favorecida com a aplicação de boro após o desenvolvimento da cultura, isto é, fosforo, enxofre e ferro (0,97; 1,00; 0,96 respectivamente). Por outro lado, antagonismo com o cobre, sendo a correlação de -0,98 (Figura 9); isso ocorre devido ao cobre ser o nutriente envolvido em reações redox. O boro é um nutriente mineral importante na armazenagem de energia e integridade estrutural. De acordo com Chen *et al.* (2022), a suplementação com boro mitigou os efeitos tóxicos do Cobre (Cu) nas folhas, caules e raízes, na maioria dos parâmetros que foram estudados.

Emerge então, que a suplementação de boro reduziu a absorção de cobre e suas concentrações nas raízes, caules e folhas e, subsequentemente, aliviou os danos induzidos pela toxicidade do cobre ao crescimento das raízes e função, melhorando assim os nutrientes das plantas (diminuição da absorção de Cu e manutenção eficiente da homeostase e equilíbrio de outros nutrientes) e o estado da água.

Análises adicionais indicaram também, que a melhoria do estado de nutrientes e água contribuiu para a melhoria mediada por boro da inibição do crescimento de plântulas induzida pela toxicidade do cobre, com isso permitindo que a aplicação de boro-MEA tanto em V6 quanto em R1, produzissem mais que a testemunha, sendo respectivamente, 5.579 Kg/ha e 5.664 Kg/ha, diferença de mais de 1.200 Kg/ha, que impacta diretamente nos custos de produção do produtores rurais.

É possível observar também o comportamento da testemunha sem a aplicação de boro, e a associação do boro com os demais nutrientes em momentos chave da cultura (Figura 9). No estágio fenológico de V6, nitrogênio, potássio e zinco apresentaram correlação com o boro, -0,99; -0,96 e 0,90, respectivamente. Em R1 quase todos os nutrientes quantificados apresentam correlação com o boro, com exceção de cálcio, manganês e cobre.

Logo, é possível afirmar que no estágio de R1, tem-se a necessidade premente de nutrientes, sobretudo, devido ao florescimento da soja (Wijewardana *et al.*, 2019). Assim, a maioria dos nutrientes são absorvidos. Em R6, maturação fisiológica dos grãos, ocorre a correlação antagônica de boro com nitrogênio e cobre de -0,87 e -0,90, e sinergismo do boro com cálcio, magnésio, enxofre, ferro e zinco (Figura 9).

Os efeitos da aplicação via foliar das fontes de boro, em comparação a testemunha, atua maneira mais expressiva, como o ferro no estágio de V6/Vn, cálcio no estágio de R1/R2 e fósforo no estágio de R6. Por outro lado, exerce função de menor destaque sobre o manganês e zinco no estágio de V6/Vn, nitrogênio e magnésio em R1/R2 e cobre em R6 (Figura 9). No âmbito das épocas de aplicação, o tratamento em V6/Vn, pré-floração, proporcionou maiores alterações nos nutrientes, corroborando assim os resultados obtidos por Dass *et al.* (2022). Os achados obtidos no presente estudo complementam também os relatos apresentados por Kaim *et al.* (2022), em que os autores observaram que o número de vagens por planta foi maior com a aplicação de boro no estágio de pré florescimento. Deve-se destacar também que Belivaqua *et al.* (2002), afirmam que na fase vegetativa os resultados com aplicação de boro geram maior maiores rendimentos de grãos.

Por fim uma reflexão que merece destaque é fato de que a aplicação de ácido bórico em R1, propiciou o maior quantitativo de associações no âmbito das variáveis estudadas. Uma explicação que pode-se aventar é o fato de o ácido bórico possuir carga zero o que facilita o seu transporte e translocação dentro da planta (Landi *et al.*, 2019). Assim, por mais que o boro seja um nutriente tratado como imóvel nas plantas este possui movimentação expressiva (Dameto *et al.*, 2022). Impactando sobremaneira nos demais nutrientes, emergindo assim, as correlações, de sinergismo e antagonismo entre nutrientes (Kumar *et al.*, 2021). Além disso, pode-se aventar que a pulverização foliar com boro, proporcionou maiores produtividades quando comparado a testemunha.

4.2 Experimento em casa de vegetação

O coeficiente de variação (CV) da análise de variância do experimento de casa de vegetação (Tabela 6 e 7), representa o quanto os dados são confiáveis, e o quão representativo é o experimento em comparação a realidade de campo. Além disso, possibilita extrapolar os resultados obtidos em condições controladas para as de campo, ou seja, em resumo pode-se aventar acerca da aplicabilidade do mesmo (Campos *et al.*, 2024). A maioria dos coeficientes de variação obtidos, encontram-se abaixo de 20,00%, o que garante a alta confiabilidade e

precisão dos dados. Das 50 variáveis respostas analisadas, 34 apresentam CV menor que 20,00%, confirmando a alta precisão dos dados obtidos (Tabela 6 e 7).

Tabela 6 – Resumo da análise de variância (ANAVA), pelo teste LRT (Teste de razão de verossimilhança) do experimento realizado na casa de vegetação, no município de Lavras-MG, não ano agrícola 2022/23, para as condições de alto investimento na fertilidade do solo.

Variáveis agronômicas														
Fontes de variação	ALT-R8		AIPV		NVC4		NVC3		NVC2		NVC1		NVT	
F Cult	139,25	**	96,15	**	20,62	**	99,26	**	46,04	**	24,23	**	138,22	**
F Trat	21,51	**	5,20	**	0,83	ns	29,82	**	11,74	**	3,67	**	42,90	**
F Cult*Trat	3,82	**	3,07	**	0,92	ns	7,40	**	4,34	**	3,10	**	8,60	**
Média	58,03		14,26		1,96		27,46		19,54		2,24		51,20	
CV	12,09		24,75		93,57		18,01		25,61		82,81		14,03	
Fontes de variação	ALT-V6		ALT-R1		ALT-R6		SPAD-V6		SPAD-R1		SPAD-R6		PESOG	
F Cult	14,68	**	67,66	**	110,55	**	7,09	**	10,79	**	79,62	**	101,31	**
F Trat	3,35	*	19,27	**	15,15	**	10,99	**	21,65	**	5,26	**	50,51	**
F Cult*Trat	0,94	ns	1,77	ns	3,20	**	1,18	ns	1,95	ns	3,85	**	8,08	**
Média	36,14		57,94		61,01		35,98		42,25		35,99		23,72	
CV	11,16		13,66		11,99		7,36		7,82		12,37		13,16	
Variáveis Fisiológicas														
Fontes de variação	H₂O₂-V6		MDA-V6		PRO-V6		PTN-V6		H₂O₂-R1		MDA-R1		PRO-R1	
F Cult	39,98	**	45,97	**	627,60	**	32,01	**	12,47	**	99,36	**	402,43	**
F Trat	47,08	**	72,75	**	495,35	**	27,77	**	1,36	ns	2,42	ns	42,53	**
F Cult*Trat	20,96	**	37,51	**	425,53	**	2,30	*	2,20	*	47,25	**	12,49	**
Média	3,53		39,19		24,13		4549,52		2,26		35,79		62,94	
CV	15,92		4,5		7,44		19,61		20,86		6,87		12,92	

**Significativo pelo teste LRT (p<0,01); *Significativo pelo teste LRT (p<0,05); ^{ns} Não significativo.

F cult: F calculado de cultivar; F Trat: F calculado dos tratamentos; F Cult*Trat: F calculado da interação de cultivares de tratamentos; Média: média dos das variáveis respostas; CV: Coeficiente de variação. Fonte: Do autor (2024).

Tabela 7 – Resumo da análise de variância (ANAVA), pelo teste LRT (Teste de razão de verossimilhança) do experimento realizado na casa de vegetação, no município de Lavras-MG, não ano agrícola 2022/23, para as condições de baixo investimento na fertilidade do solo.

Variáveis agronômicas																		
Fontes de variação	ALT-R8		AIPV		NVC4		NVC3		NVC2		NVC1		NVT		NRL		ACAM	
F Cult	277,64	**	55,56	**	1,6	ns	74,68	**	91,7	**	0,75	ns	175,81	**	1,02	ns	306,88	**
F Trat	20,99	**	1,7	ns	5,61	**	7,13	**	14,07	**	2,64	*	25,11	**	0,71	ns	26,92	**
F Cult*Trat	3,41	**	1,44	ns	0,69	ns	4,06	**	5,46	**	1,95	ns	4,5	**	1,02	ns	1,96	ns
Média	94,11		14,8		0,79		24,51		20,29		2,67		48,26		4,72		2,87	
CV	9,17		33,32		118,98		22,3		23,13		106,78		14,24		25,46		15,62	
Fontes de variação	ALT-V6		ALT-R1		ALT-R6		SPAD-V6		SPAD-R1		SPAD-R6		PESOG		DPM			
F Cult	42,98	**	22,27	**	25,34	**	38,79	**	8,52	**	23,1	**	144,49	**	357,36	**		
F Trat	5,19	**	5,64	**	3,13	*	11,76	**	4,4	**	7,5	**	16,92	**	13,67	**		
F Cult*Trat	3,11	**	2,69	*	1,24	ns	6,75	**	4,01	**	5,2	**	3,33	**	1,17	ns		
Média	56,72		82,22		87,59		37,06		42,15		36,29		18,7		123,18			
CV	22,34		27,79		28,68		4,34		8,13		10,41		15,91		1,28			
Variáveis Fisiológicas																		
Fontes de variação	H ₂ O ₂ -V6		MDA-V6		PRO-V6		PTN-V6		H ₂ O ₂ -R1		MDA-R1		PRO-R1		PTN-R1			
F Cult	27,96	**	30,26	**	668,05	**	21,63	**	3,68	*	121,68	**	418,27	**	7,75	**		
F Trat	47,23	**	93,55	**	502,95	**	27,19	**	1,43	ns	4,95	**	38,9	**	24,3	**		
F Cult*Trat	21,03	**	27,39	**	432,06	**	2,27	*	2,31	*	47,7	**	17,36	**	2,22	ns		
Média	3,83		39,5		24,44		4248,44		2,57		36,09		63,42		4685,18			
CV	14,65		4,46		7,29		20,87		17,92		6,69		12,33		19,19			

**Significativo pelo teste LRT ($p < 0,01$); *Significativo pelo teste LRT ($p < 0,05$); ^{ns} Não significativo.

F cult: F calculado de cultivar; F Trat: F calculado dos tratamentos; F Cult*Trat: F calculado da interação de cultivares de tratamentos; Média: média dos das variáveis respostas; CV: Coeficiente de variação. Fonte: Do autor (2024).

Procedeu-se a análise de variância com três fatores, as condições de fertilidade, tratadas como, solo de alto investimento em fertilidade (ambiente de produção de alta fertilidade, disponibilidade de nutrientes e com correção do solo superiores) e solo de baixo investimento em fertilidade (ambiente de produção de baixa fertilidade, de baixa disponibilidade de nutrientes e com correção do solo mínimas necessárias); o segundo fator foram as cultivares utilizadas (Pioneer® 97R50 IPRO, Pioneer® 95R21E e UFLA 6301RR) com grupos de maturação distintos, e o terceiro os tratamentos com boro (ácido bórico no estágio fenológico de V6/Vn, boro-MEA no estágio fenológico de V6/Vn, ácido bórico no estágio fenológico de R1/R2, boro-MEA no estágio fenológico de R1/R2, e a testemunha sem aplicação de boro).

Neste âmbito, foi possível verificar que altura de plantas no estágio de R8 (ALT-R8), número de vagens com três grãos (NV3), número de vagens com dois grãos (NV2), número de vagens total (NVT), índice SPAD no estágio de R6 (SPAD-R6), produção (PESOG), conteúdo de peroxidação de hidrogênio no estágio de V6 (H2O2-V6), quantificação de Malondialdeído no estágio de V6 (MDA-V6), prolina no estágio de V6 (PRO-V6), proteínas no estágio de V6 (PTN-V6), conteúdo de peróxido de hidrogênio no estágio de R1 (H2O2-R1), quantificação de malondialdeído no estágio de R1 (MDA-R1), prolina no estágio de R1 (PRO-R1), proteínas no estágio de R1 (PTN-R1); foram significativas para interação entre cultivar e tratamentos, nas condições de alto e baixo investimento na fertilidade do solo (Tabelas 6 e 7).

Isso se deve ao fato, de as condições de fertilidade do solo, ser um fator considerado como ambiental, que não pode ser controlado. Quando as condições do solo são controladas, e garantem seu efeito, é possível verificar o quanto o sistema solo, planta atmosfera, é dinâmico e complexo (Boanares *et al.*, 2020). Sendo assim, o experimento implementado retrata o efeito da interação do solo, com os outros fatores estudados, como o genético (cultivares) e o manejo (tratamentos com pulverização de boro em momentos distintos).

As variáveis que denotam significância estatística em apenas uma única condição de solo, evidenciam a influência dos níveis de disponibilidade dos nutrientes e correção do solo sobre o crescimento e desenvolvimento da cultura da soja. Estes fatores estão associados a uma redução no ciclo da cultura, aumento na produção, manifestando-se tanto por meio do incremento de componentes de produção, como o número de vagens ou de grãos, quanto efeitos fisiológicos pela elevação dos teores de clorofila ou de proteínas (Tabela 6 e 7).

As variáveis resposta que variaram o comportamento, quanto as condições de solo, obtendo significância somente para solo de alto investimento em fertilidade, foram, altura de inserção da primeira vagem (AIPV), número de vagens com um grão (NVC1), número de ramos laterais (NRL), altura de plantas no estágio de R6 (ALT-R6). As variáveis que foram

significativas somente para solo de baixa fertilidade, foram, altura de plantas no estágio de V6 (ALT-V6), altura de plantas no estágio de R1 (ALT-R1), índice SPAD no estágio de V6 (SPAD-V6) e índice SPAD em R1 (SPAD-R1) (Tabela 6). Outro ponto que merece destaque é que as variáveis obtidas no experimento de casa de vegetação foram submetidas a estresse hídrico durante quase todo ciclo da cultura (Figura 5), o que acentua ainda mais, o efeito das condições de investimento em fertilidade, visto que é necessária água para que as plantas transportem nutriente por capilaridade para dentro do seu sistema vascular (Boanares *et al.*, 2020).

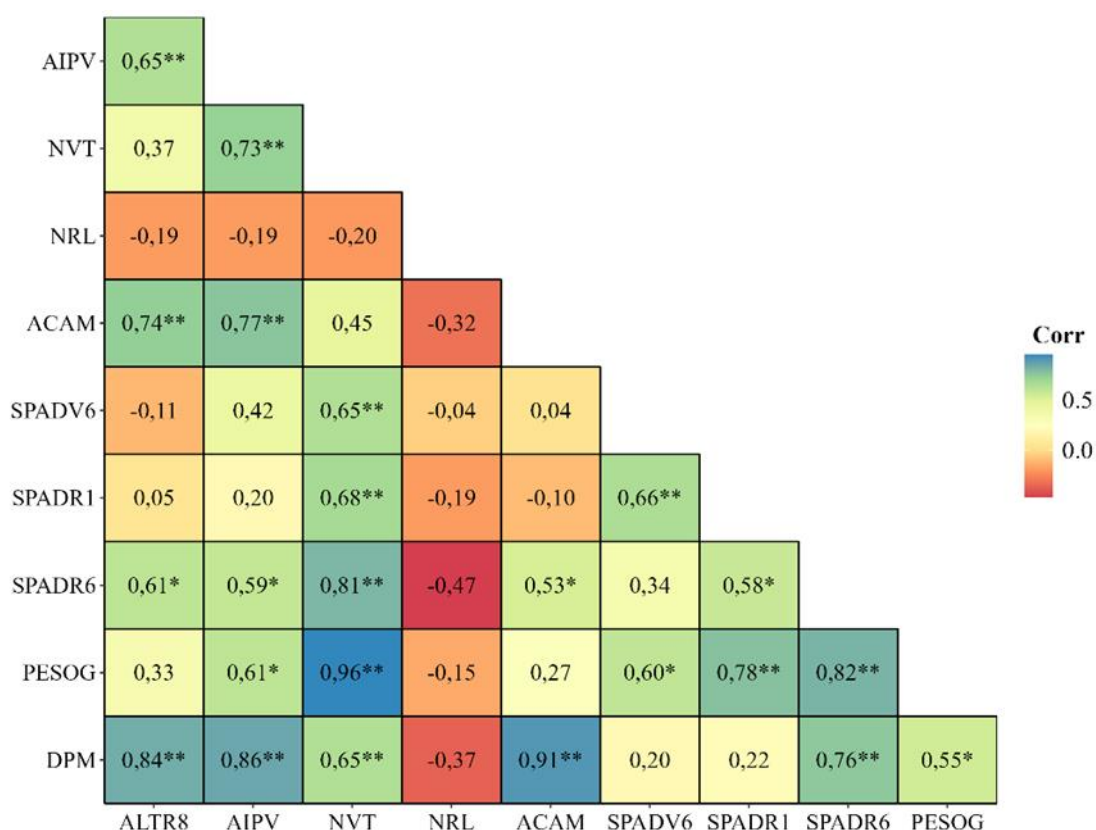
No entanto, algumas variáveis não foram significativas para interação, indicando ser variável dependente do efeito genético (cultivar) ou do manejo (épocas e fontes de boro), das quais pode-se destacar, o número de vagens com quatro grãos (NVC4), índice de acamamento (ACAM) e dias para maturação completa (DPM). Alguns autores, (Sun *et al.*, 2022), apontam que os números de grãos na vagem são de origem genética, sendo um fator de competição intrínseco na planta, no qual a planta direciona seu metabolismo para apresentar uma maior quantidade de grãos na vagem ou poucos grãos na vagem, contudo, com elevada densidade (PMG elevado) (Souza *et al.*, 2023).

4.2.1 Condições de solo de alto investimento em fertilidade do solo

Com as correlações obtidas pode-se compreender como os componentes estruturais de produção da planta se comportam quando submetidas a estresse hídrico controlado, a partir do estágio vegetativo V3 até o estágio reprodutivo de R4, nas condições de solo de alto investimento em fertilidade (Figura 10).

A altura de plantas ao final do ciclo, no estágio de R8 (ALT-R8), obteve correlação com dias para maturação (DPM) de 0,84**, índice SPAD no estágio de R6 (SPAD-R6), de 0,61*, acamamento (ACAM) de 0,74** e com altura de inserção da primeira vagem (AIPV) de 0,65**. Estas correlações confirmam os dados obtidos em campo nos dois anos agrícolas, evidenciando a confiabilidade dos dados, visto que no ambiente de casa de vegetação a temperatura, irrigação e fertilidade do solo eram controlados garantindo a máxima expressividade dos dados obtidos (Figura 10).

Figura 10 – Correlação dos caracteres agrônômicos, do experimento em casa de vegetação, com condições de alto investimento em fertilidade do solo.



**Significativo pelo teste de correlação de Pearson ($p < 0,01$); *Significativo pelo teste de correlação de Pearson ($p < 0,05$); ^{ns} Não significativo. Corr: escala de correlação de 1 a -1.

Fonte: Do autor (2024).

É possível observar também que as características estruturais como ALT-R8, DPM, SPAD-R6, ACAM e AIPV por mais que estejam submetidas ao estresse hídrico e condicionadas a solos de alta fertilidade, não alteram seu comportamento como ocorreu nos experimentos de campo, das safras 2022/23 e 2023/24 (Figura 10). Nesse sentido, pode-se aventar que quanto maior o ciclo da cultivar de soja, maior a planta, mais folhas desenvolvidas e com maior concentração de clorofila (Kezar *et al.*, 2023).

A altura de inserção da primeira vagem (AIPV) apresenta correlação com as variáveis de produção (PESOG), índice SPAD em R6 (SPAD-R6), índice de acamamento (ACAM) e número de vagens total (NVT), sendo respectivamente 0,86**; 0,61*; 0,59*; 0,77**; 0,73**. Estas correlações eram esperadas, uma vez que AIPV apresenta associação com DPM, o que justifica a correlação com PESOG. Plantas com maior DPM, tendem a ser mais produtivas, uma vez que tem mais tempo para preparar durante o desenvolvimento vegetativo, até a fase

reprodutiva, aproveitando melhor e por maior período os fatores ambientais, como fertilidade, luz, temperatura e precipitação ao seu favor (Li *et al.*, 2020).

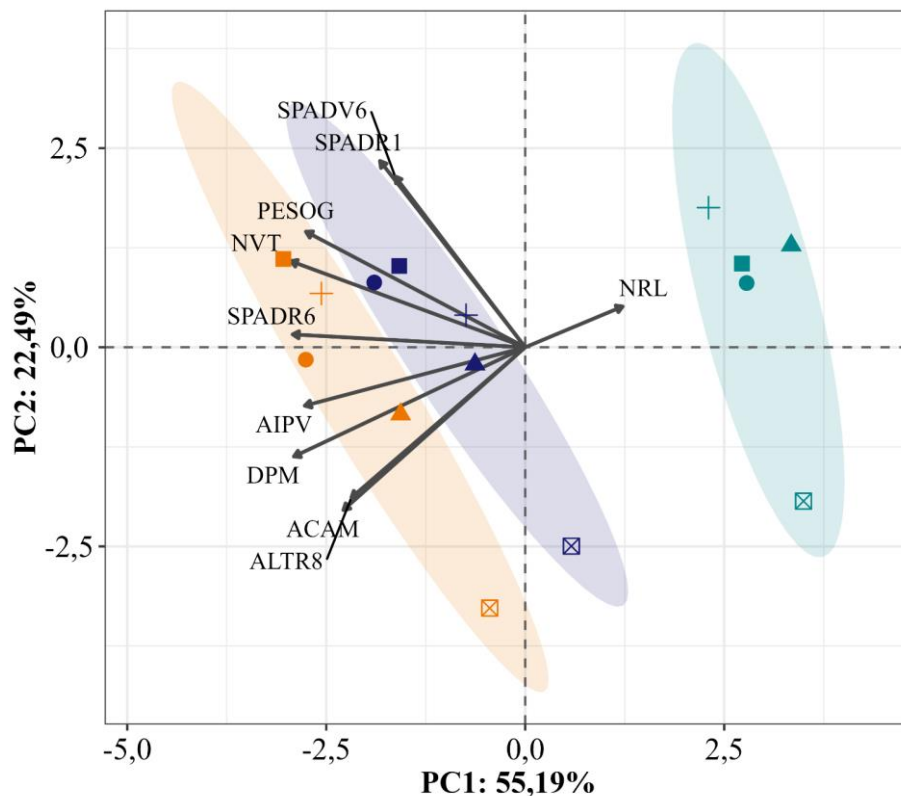
Deve-se destacar também que o número de vagens total, que é componente de produção da soja, figura-se como favorecido com o postergar do ciclo vegetativo; o índice SPAD em R6 e o índice de acamamento, também são afetados pelo efeito do ciclo da cultivar, assim, como pelas condições de fertilidade que fazem com que a soja alongue seu ciclo, devido as condições mais favoráveis de fertilidade, mesmo estando sob déficit hídrico (Bossolani *et al.*, 2021).

Na figura 10, pode-se observar também que existe correlação entre o número de vagens total (NVT), com os índices SPAD ao longo do ciclo (V6, R1 e R6), e também produção (PESOG) e dias para maturação (DPM). As maiores concentrações de clorofila propiciam um maior número de vagens nas plantas, que por seu turno, afeta diretamente o alongamento do ciclo e maior altura das plantas.

De posse das correlações definidas, procedeu-se a análise de PCA (Figura 11). Observa-se que os dois primeiros componentes principais explicaram mais de 77% da variação total observada, indicando excelente ajuste do modelo. Pode-se verificar que as cultivares de maior ciclo estão associadas a maiores produções, pois os vetores na figura 11 estão direcionados para as elipses das cultivares Pioneer® 97R50 IPRO e UFLA 6301 RR, que possuem grupo de maturidade relativo de 7.5 e 6.3, respectivamente, e que para o cultivo na região do sul de minas gerais, proporciona ciclo médio de 120 a 130 dias e 105 a 115 dias de ciclo (Di Mauro *et al.*, 2022).

Ainda sobre os o posicionamento dos vetores, pode-se observar que os mesmos estão na sua maioria voltados para os quadrantes dois e três (Figura 11). É possível formar dois grupos, isto é, conjuntos de vetores, o primeiro no segundo quadrante, com as características avaliadas, índice SPAD em V6, R1 e R6 (SAP-V6; SPAD-R1; SPAD-R6), número de vagens total (NVT) e produção (PESOG); e o segundo agrupamento no terceiro quadrante com as variáveis respostas avaliadas, altura de inserção da primeira vagem (AIPV), dias para maturação (DPM), índice de acamamento (ACAM) e altura de plantas em R8 (ALT-R8). Estes agrupamentos estão de acordo com as correlações obtidas no presente estudo (Figura 10).

Figura 11 – Análise de PCA, dos caracteres agrônômicos, do experimento em casa de vegetação, com condições de alto investimento em fertilidade do solo.



Tratamentos:

● Ácido bórico em R1; ▲ Ácido bórico em V6; ■ Boro-MEA em R1; + Boro-MEA em V6; ☒ Testemunha.

Cultivares:

■ UFLA 6301RR; ■ Pioneer 95R21E; ■ Pioneer 97R50IPRO.

Fonte: Do autor (2024).

Quanto ao efeito da aplicação com boro via foliar, pode-se observar que a maioria dos vetores estão associados com os tratamentos à base de boro, e também que os autovalores das testemunhas estão bem abaixo dos pontos a base do tratamento com boro via foliar. Neste sentido está evidente a relação direta com os caracteres de produção e também estrutural das plantas de soja (Figura 11).

Dessa mesma maneira, Galeriani *et al.* (2022) verificaram que a aplicação de boro foliar aumentou os componentes de produção de soja, assim como o número de vagens por planta e o número de grãos por planta. E também a produtividade de massa seca da parte aérea, número de vagens, grãos por vaso e peso de cem grãos foram influenciados pelas doses de boro (Dameto *et al.*, 2023). A elipsoide pequena e alongada, evidencia a variação de menor magnitude nos dados, no entanto, denota que existe diferenças quanto aos tratamentos, pois as elipses são alongadas devido à diferença no comportamento das testemunhas vs tratamentos com boro (Figura 11).

O número de ramos laterais não foi significativo devido ao efeito do boro ou cultivares. Por isso o vetor possui menor magnitude (Figura 11). Observou-se variação de quatro a cinco ramos laterais em todas as plantas do experimento. Uma possível explicação para este fato pode estar alicerçada no número de plantas por vaso. A soja é uma cultura de elevada plasticidade, isto é, efeito compensatório, ou seja, o estande de plantas por metro, faz com que uma planta tenha maior ou menor número de ramos laterais (Hussein *et al.*, 2023). Logo, como adotou-se duas plantas por vaso, não se observou variação quanto ao engalhamento das cultivares.

Os índices SPAD em V6, R1 e R6, denotam comportamento distinto. A avaliação em V6 foi significativa somente para tratamentos. Todas as cultivares apresentaram em média 35,0 a 38,0 de concentração de clorofila, não distinguindo entre si. Por outro lado, observou-se maior amplitude para os tratamentos com boro e a menor média para a testemunha. No estágio R1, obteve-se diferença significativa para cultivares e tratamentos. As cultivares com as melhores médias de concentração de clorofila foram a UFLA 6301RR (44,08) e Pioneer® 97R50 IPRO (42,52) (Figura 11). Ocorreu interação entre cultivares e tratamentos para o índice SPAD em R6. O melhor tratamento que propiciou a melhor média foi a aplicação de ácido bórico em R1 e boro-MEA em R1 nas cultivares UFLA 6301RR e Pioneer® 97R50 IPRO.

A altura de plantas no estágio de R8, foi influenciada significativamente pela interação entre as cultivares e tratamentos. A maior média obtida foi para testemunha com a cultivar Pioneer® 97R50 IPRO. Este fato evidencia que ausência do manejo adequado com o nutriente boro, que por sua vez possui função estrutural de coesão sobre os polímeros de celulose, afetou o crescimento exagerado das plantas de soja (Brdar-Jokanović, 2020).

Neste mesmo sentido, a interação de cultivares e tratamentos sendo significativa para a altura de inserção da primeira vagem, permite inferir que os melhores tratamentos foram, com ácido bórico tanto em V6 quanto na época de aplicação de R1. A menor média de altura de inserção da primeira vagem foi observada com a cultivar Pioneer® 95R21. Este fato denota que o efeito genético da cultivar, quanto a resposta do fotoperíodo da soja, predominou, perfazendo uma altura de inserção da primeira vagem de pequena variação independente do tratamento de boro (Figura 11).

Neste âmbito, pode-se aventar que o tratamento estabelecido como ideal para os padrões comerciais atendendo os requisitos de colheita mecanizada, seria o obtido com a cultivar UFLA 6301 RR com o tratamento de ácido bórico no estágio de R1. Isso ocorre porque a cultivar UFLA 6301 RR, foi desenvolvida pela Universidade Federal de Lavras, logo essa cultivar é mais adaptada a região e as condições de fotoperíodo. Assim sendo, mesmo em estresse hídrico e em ambiente controlado, como o de casa de vegetação, a cultivar é superior às demais.

Quanto ao índice de acamamento pode-se observar que o vetor ACAM, está direcionado para as cultivares de maior ciclo bem como para a testemunha e o tratamento com ácido bórico em V6. Pode-se inferir então que a cultivar que possui maior índice de acamamento é a Pioneer® 97R50 IPRO e o tratamento que mais propicia acamamento foi a testemunha. Esse resultado se deve ao fato de o boro possuir papel estrutural na planta fazendo com que as plantas de soja ao invés de crescer muito direcionem sua energia metabólica não somente para o meristema apical, mas também para a manutenção de flores, vagens e grãos (Chen *et al.*, 2020).

Considerando a maturação absoluta (DPM), observou-se significância para tratamentos e para cultivares (Figura 11). É possível verificar que as cultivares que possuem maior ciclo são a Pioneer® 97R50 IPRO, UFLA 6301 RR e a Pioneer® 95R21. Como não ocorreu interação, pode-se afirmar que o vetor da variável resposta DPM para a testemunha proporcionou as maiores médias de ciclo, e que os tratamentos com boro impactaram na redução do ciclo. Esta afirmação emerge como interessante, pois cada vez mais adota-se o sistema de produção de cultura anuais. Assim, o objetivo é produzir mais utilizando o menor ciclo possível. Deste modo, alternativas de manejo que possam estar associadas a antecipação da safra, da cultura antecessora, permitirá que a segunda safra, possa ser cultivada em condições ambientais mais favoráveis (Oligini *et al.*, 2023).

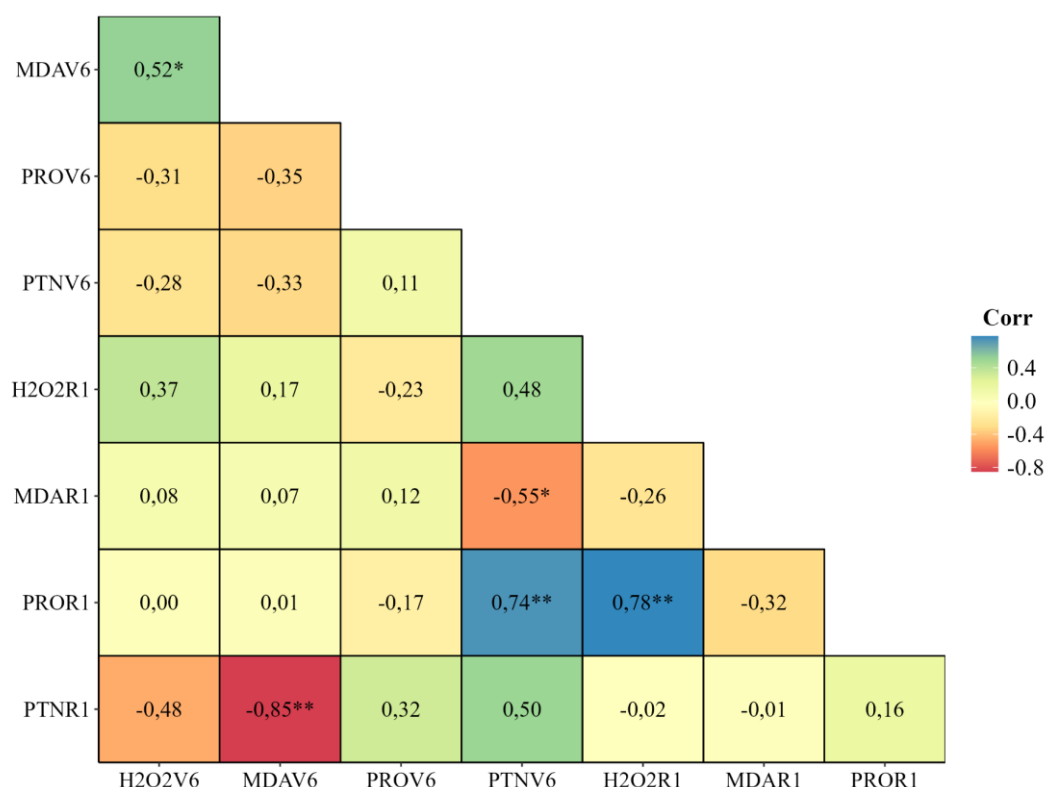
Quanto ao número de vagens total (NVT) e produção (PESOG), pode-se observar a proximidade do sentido dos vetores e sua correlação positiva. Ou seja, nas condições de casa de vegetação, com alta disponibilidade de nutrientes, mesmo com déficit hídrico, a cultivar que apresentar maior número de vagens irá apresentar maior produção (Figura 11). É possível observar também que os vetores PESOG e NVT estão na direção das cultivares Pioneer® 97R50 IPRO e UFLA 6301RR e na direção oposta da cultivar Pioneer® 95R21.

Como os caracteres de produção foram influenciados pelos tratamentos à base de boro, os efeitos podem ser melhores elucidados, através das variáveis fisiológicas, no qual aparam as rotas e os produtos obtidos ao final do metabolismo e quais os impactos na soja (Figura 12). Neste sentido, procedeu os estudos de correlação das variáveis fisiológicas do experimento de casa de vegetação, nas condições de alto investimento em fertilidade do solo, com déficit hídrico.

Sendo assim, pode-se observar que H_2O_2 no estágio de V6, possui correlação de 0,52* com Malondialdeído no estágio de V6 (MDA-V6). Isso ocorre porque em situações de estresse por déficit hídrico, as plantas têm um excesso de energia luminosa sobre a epiderme dos tilacoides do cloroplasto, que fazem com que se tenha a produção de espécies reativas de oxigênio (EROs), que reagem com a epiderme dos tilacoides, degradando-as e diminuindo a

eficiência fotossintética. Essa reação causa a produção de H_2O_2 e MDA, que são, portanto, produtos da reação de EROs com as membranas dos tilacoides (Mansoor *et al.*, 2022). Neste sentido, MDA e H_2O_2 possuem correlação, evidencia que as plantas de soja no estágio de V6 estavam em condições de muito estresse (Figura 12).

Figura 12 – Correlação dos caracteres fisiológicos, do experimento em casa de vegetação, com condições de alto investimento em fertilidade do solo.



**Significativo pelo teste de correlação de Pearson ($p < 0,01$); *Significativo pelo teste de correlação de Pearson ($p < 0,05$); ^{ns} Não significativo. Corr: escala de correlação de 1 a -1.
Fonte: Do autor (2024).

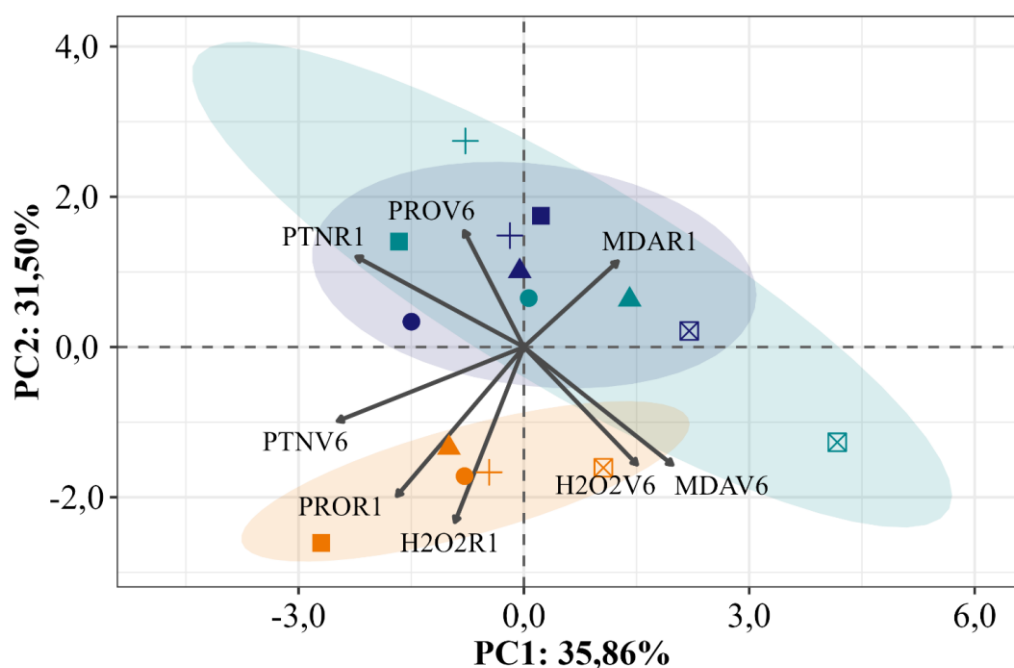
Outras correlações existentes é de Malondialdeído no estágio de V6 (MDA-V6) com proteínas no estágio de R1 (PTN-R1), de -0,85**; e Malondialdeído no estágio de R1 (MDA-R1) com proteínas no estágio de V6 (PTN-V6), de -0,55* (Figura 12). Essas correlações se devem ao fato do nível de proteínas nas folhas promoverem o aumento da concentração de substâncias que garantem resiliência ao estresse hídrico, como a prolina, que é utilizada como aminoácido antioxidante, evitando a produção de EROs nas folhas. Assim, a folha é induzida para o fechamento de estômatos o que acarreta em menor perda de água e maior fluxo do soluto para as folhas em estresse, e assim, garantindo a sobrevivência da planta nas condições desfavoráveis (Swaef *et al.*, 2022).

Neste mesmo âmbito, a correlação de prolina no estágio de R1 (PRO-R1) foi significativa com o teor de proteína no estágio de V6 (PTN-V6), de 0,74**; e com o peróxido de hidrogênio no estágio de R1 (H_2O_2 –R1) de 0,78**. Essas correlações indicam que com o aumento de peróxido de hidrogênio nas folhas, as cultivares de soja iniciaram a ativação do sistema antioxidante, e com isso, ocorreu aumento na concentração de proteína e de prolina para que se diminuísse os efeitos do estresse hídrico e a manutenção das plantas no seu estado fisiológico ótimo (Yi *et al.*, 2020).

Já na Figura 13, por seu turno, é possível observar pela análise de PCA, das variáveis fisiológicas, as correlações mencionadas anteriormente e seu comportamento quanto as cultivares e os tratamentos com boro. De acordo com a análise de PCA, os componentes um e dois explicaram 67,36% da variação total observada. É possível destacar também que os dados da cultivar Pioneer ® 95R21E, foram os mais dispersos, obtendo maior variação e com isso a elipse ocupando maior área frente as demais (Figura 13).

Os vetores de MDA-V6 e H_2O_2 -V6 possuem alta correlação e além disso, pode-se afirmar que devido a direção dos vetores de que as cultivares Pioneer® 97R50 IPRO e 95R21E, possuem maior conteúdo dessas moléculas, e devido a interação significativa entre cultivares e tratamentos, que é possível aventar que as testemunhas nas duas cultivares foram as que apresentaram maior quantidade de MDA e H_2O_2 . Por seu turno, devido a correlação negativa com proteína no estágio de R1 (PTN-R1) e prolina no estágio de V6 (PRO-V6), as testemunhas possuem menor conteúdo de compostos antioxidantes para superar o déficit hídrico. A cultivar UFLA 6301RR, foi a que apresentou menor média de produção de H_2O_2 no estágio de V6, considerando os tratamentos à base de ácido bórico em V6, boro-MEA em V6 e R1.

Figura 13 – Análise de PCA, dos caracteres fisiológicos, do experimento em casa de vegetação, com condições de alto investimento em fertilidade do solo.



Tratamentos:

● Ácido bórico em R1; ▲ Ácido bórico em V6; ■ Boro-MEA em R1; + Boro-MEA em V6; ☒ Testemunha.

Cultivares:

■ UFLA 6301RR; ▲ Pioneer 95R21E; ■ Pioneer 97R50IPRO.

Fonte: Do autor (2024).

Considerando que as variáveis respostas H_2O_2 no estágio de V6 e Malondialdeído no estágio de V6, possuem correlação negativa com proteína (PTN-R1 e PRO-V6), e que os tratamentos à base de boro estão no sentido dos vetores de PTN-R1 e PRO-V6. Emerge então, que a aplicação de boro possui efeito benéfico na expressão dessas características garantindo a resiliência da cultura da soja quando em déficit hídrico (Souza Junior *et al.*, 2023). Por outro lado, como, a interação de cultivares e tratamentos foi significativa, verifica-se que cada tratamento vai propiciar melhor desempenho de acordo com cada cultivar. Neste sentido, para a cultivar UFLA 6301RR os tratamentos com ácido bórico em V6 e boro-MEA em R1 favorecem as maiores médias de prolina em V6. Contudo, para cultivar Pioneer® 95R21E e Pioneer® 97R50 IPRO o melhor tratamento foi o boro-MEA em V6.

Outra observação em relação os vetores, que merece destaque, refletem na proteína no estágio de V6 (PTN-V6), prolina no estágio de R1 (PRO-R1) e peróxido de hidrogênio no estágio de R1 (H_2O_2 -R1). Está evidente na figura 13 que há correlação entre os vetores, e sua maior expressão emerge na cultivar Pioneer® 97R50 IPRO. Por seu turno, no quadrante oposto

tem-se o vetor de Malondialdeído no estágio de R1 (MDA-R1), denotando a correlação negativa entre as características avaliadas.

É possível observar também que o vetor de proteínas em V6 está na mesma direção do boro-MEA aplicado em R1 na cultivar Pioneer® 97R50 IPRO. Logo, este tratamento apresenta a maior média de proteínas nesse estágio, e menor produção de MDA no estágio seguinte em R1 (Figura 13). Torna-se evidente os ganhos com as aplicações via foliar de boro. Figura-se também, que o boro, atua no metabolismo das plantas, nas estruturas vegetativas e reprodutivas, impactando de maneira positiva e aumentando a produção mesmo em déficit hídrico com condições favoráveis de fertilidade do solo. Logo, pode-se inferir que o boro proporciona resiliência as cultivares de soja, em situação de déficit hídrico (Souza Júnior *et al.*, 2023).

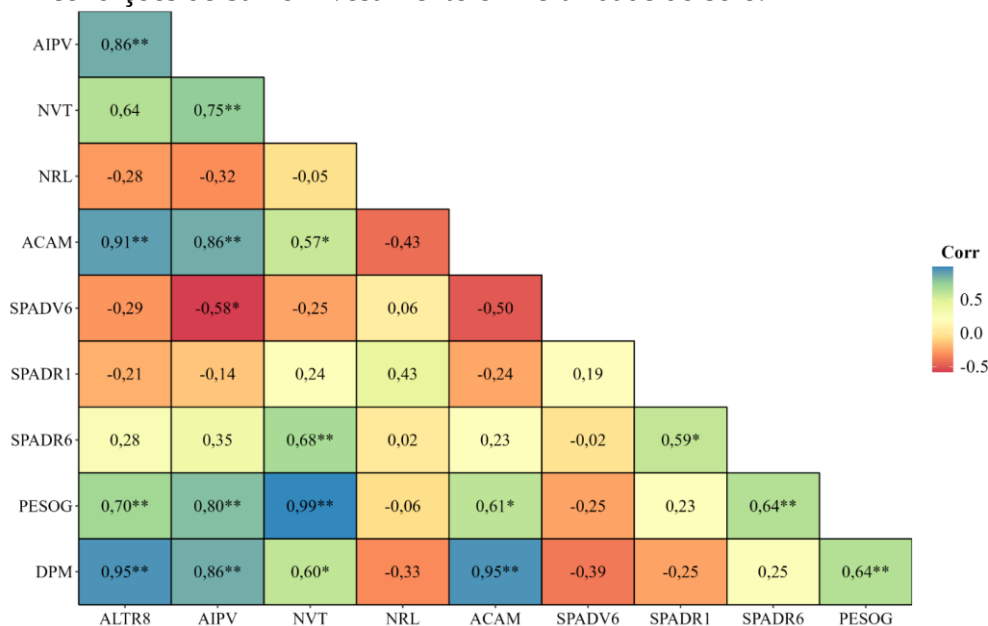
4.2.2 Condições de baixo investimento em fertilidade do solo

Após as observações e considerações realizadas para as condições de alto investimento em fertilidade do solo, foi realizado em conjunto o experimento com condições de baixo investimento em fertilidade do solo, simulando área de abertura, em que há limitada correção do solo, bem como a baixa disponibilidade de nutrientes, visando compreender os efeitos da condição do solo, em situação de déficit hídrico, e sobretudo com a presença e ausência do nutriente boro. Sendo assim, foi realizado as correlações das variáveis agrônômicas (Figura 14).

Observou-se que mesmo em condições de baixo investimento em fertilidade do solo, foi obtido plantas acamadas por excesso de crescimento. Isso porque, a variável altura de plantas no estágio de R8 (ALT-R8) obteve correlação com dias para maturação (DPM) de 0,95**;
produção (PESOG) de 0,70**;
índice de acamamento (ACAM) de 0,91** e altura de inserção da primeira vagem (AIPV) de 0,86**.

Essas correlações denotam que por mais que as condições de fertilidade e de hidratação das plantas fossem ruins, o efeito do fotoperíodo foi predominante sobre as cultivares de soja. Estes relatos estão de acordo com Wang *et al.* (2022), que apontam o efeito de horas de luz sobre a soja como chave para o desenvolvimento da cultura. Pode-se observar que a maior altura ao final do ciclo (ALT-R8), foi obtida quando os dias para maturação, ou ciclo, eram maiores, sendo essa correlação de quase 1,00 ou seja plantas de soja maiores possuem maior ciclo.

Figura 14 – Correlação dos caracteres agronômicos, do experimento em casa de vegetação, com condições de baixo investimento em fertilidade do solo.



**Significativo pelo teste de correlação de Pearson ($p < 0,01$); *Significativo pelo teste de correlação de Pearson ($p < 0,05$); ns Não significativo. Corr: escala de correlação de 1 a -1.

Fonte: Do autor (2024).

No entanto, plantas maiores irão apresentar maiores índices de acamamento e também com isso maiores alturas de inserção da primeira vagem, o que do ponto de vista operacional, seria indesejado (Erokhin *et al.*, 2022). Plantas acamadas tem dificuldade de perder umidade, pois, estão em contato com o solo, além do que, tem-se o risco de ocorrer infecção de algum patógeno na semente, aumentando assim as perdas (Jordaan *et al.*, 2019).

Merece comentário adicional que, as cultivares que possuem maior altura (ALT-R8) e ciclo (DPM), possuem a correlação de maior produção (0,64**) e número de vagens total (0,60*); isso mesmo em condições de baixo investimento em fertilidade do solo. Pode-se relatar também que no experimento conduzido em casa de vegetação e com alta fertilidade, de que essas correlações também foram observadas. Evidenciando, que o efeito da disponibilidade de nutrientes não foi limitante

Contudo, é importante destacar que para ocorrer o transporte de nutrientes para dentro da planta é necessário água. Como no experimento de casa de vegetação em ambas as condições de fertilidade foi empregado o déficit hídrico, as cultivares de soja não puderam explorar sua máxima de capacidade de absorção de nutrientes (Reichardt *et al.*, 2019).

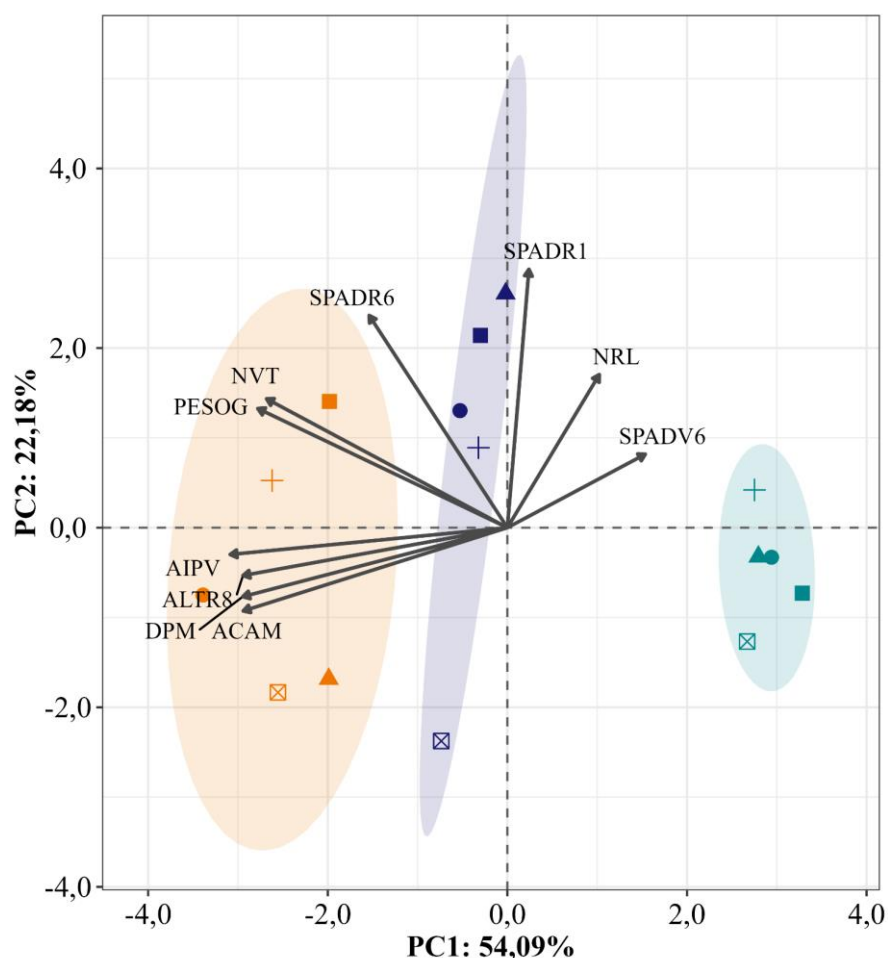
Outras correlações que merecem destaque, foram altura de inserção da primeira vagem com dias para maturação (DPM) de 0,86**, produção (PESOG) de 0,80**, índice SPAD no estágio de V6 (SPAD-V6) de -0,58*, índice de acamamento (ACAM) de 0,86** e número

de vagens total (NVT) de 0,75**. Estas correlações permitem o entendimento de que cultivares de soja com maior quantidade de vagens e maior produção, vão apresentar maior maturação absoluta. Contudo, o desenvolvimento vegetativo excessivo da cultivar pode causar acamamento e o abortamento de algumas vagens mais basais, devido a planta não possuir fonte (clorofila, que produzirá energia) suficiente para manter seus drenos (flores, vagens e grãos) (Liu *et al.*, 2019). Neste sentido, foi possível observar que a correlação de altura de inserção da primeira vagem e índice SPAD no estágio de V6/Vn foi negativa, evidenciando que no momento de pré-floração a quantidade de clorofila que existia nas folhas já era baixa para manutenção dos drenos.

Considerando em questão, os índices SPAD no estágio de R1/R2 (Pós-floração) e R6 (início da senescência), a correlação com número de vagens total (NVT) e produção (PESOG), foram positivas, denotando que após as cultivares de soja definirem quantas flores serão vagens, ou seja quantas flores foram fecundadas, ocorre abortamento das demais flores (drenos). Assim, existe um condicionamento da planta, equilibrando seu metabolismo, e permitindo assim, que a concentração de clorofila (índice SPAD) no estágio de R1/R2 e R6 garantissem a manutenção e desenvolvimento de todas as vagens e grãos que permaneceram na soja (Galeriani *et al.*, 2022).

De posse das correlações pode-se proceder a análise de componentes principais (Figura 15). De acordo com a análise, o modelo bidimensional explicou 76,27%, ou seja, apenas dois componentes explicam a quase totalidade da variação total observada no conjunto de dados agronômicos. Na figura 15, os vetores produção (PESOG) e número de vagens totais (NVT), se sobrepõem evidenciando que existe alta associação, ou seja, para a cultivar de soja ter elevada produtividade tem que se possuir muitas vagens. Destaca-se também que os vetores estão em direção da cultivar de ciclo longo Pioneer® 97R50 IPRO, e dos tratamentos com aplicação de boro-MEA nos estádios de V6 e R1. É possível observar também que a elipse da cultivar Pioneer® 95R21E está localizada no lado oposto da figura, evidenciando a menor produtividade nas condições de baixa fertilidade e déficit hídrico de V3 a R4 (Figura 15).

Figura 15 – Análise de PCA, dos caracteres agronômicos, do experimento em casa de vegetação, com condições de baixo investimento em fertilidade do solo.



Tratamentos:

● Ácido bórico em R1; ▲ Ácido bórico em V6; ■ Boro-MEA em R1; + Boro-MEA em V6; ☒ Testemunha.

Cultivares:

■ UFLA 6301RR; ■ Pioneer 95R21E; ■ Pioneer 97R50IPRO.

Fonte: Do autor (2024).

Tem em relação o número de vagens total (NVT), nota-se também efeito significativo da interação cultivares e tratamentos (Tabela 6). As melhores combinações foram observadas com o boro na cultivar Pioneer® 97R50 IPRO. Em sentido oposto tem-se o vetor tratamento testemunha na cultivar Pioneer® 95R21E, o que permite compreender, que em situações de déficit hídrico e sobretudo em áreas de baixa fertilidade, o fornecimento de boro via foliar emerge como estratégia de manejo que poderá ser adotada para superar os momentos de seca durante o ciclo da cultura (Figura 15). Desataca-se também que dentre as opções de fontes de boro que existem no mercado, boro-MEA, é o que garante maiores produções.

Dissecando ainda a análise dos componentes principais, é possível observar que os vetores de altura de inserção da primeira vagem (AIPV), altura de plantas no estágio de R8 (ALT-R8), dias para maturação (DPM) e índice de acamamento (ACAM), estão muito próximos, e na mesma direção do elipsoide (Figura 15). Os vetores convergem para a elipse da cultivar Pioneer® 97R50 IPRO (cultivar de ciclo mais tardio), e para o tratamento com ácido bórico aplicado no estágio de R1.

Por seu turno, quando se considera os vetores de dias para maturação (DPM), índice de acamamento (ACAM) e altura de inserção da primeira vagem (AIPV) observa-se a não significância para a interação de cultivares e tratamentos (Tabela 6 e Figura 15). Sendo significativo somente para a fonte de variação cultivares e com maior magnitude da média para a cultivar Pioneer® 97R50 IPRO. Ademais, quando se considera a altura de plantas no estágio de R8 (ALT-R8), observa-se interação significativa. No entanto independente da cultivar avaliada, os tratamentos com maior altura foram com aplicação de ácido bórico em R1 e a testemunha; e com menor altura ao final do ciclo, foi mensurado para a aplicação de boro-MEA no estágio de V6, R1 e ácido bórico em V6. Permitindo a interpretação de que algumas fontes de boro, podem contribuir com a regulação do crescimento das cultivares de soja (Habib *et al.*, 2023).

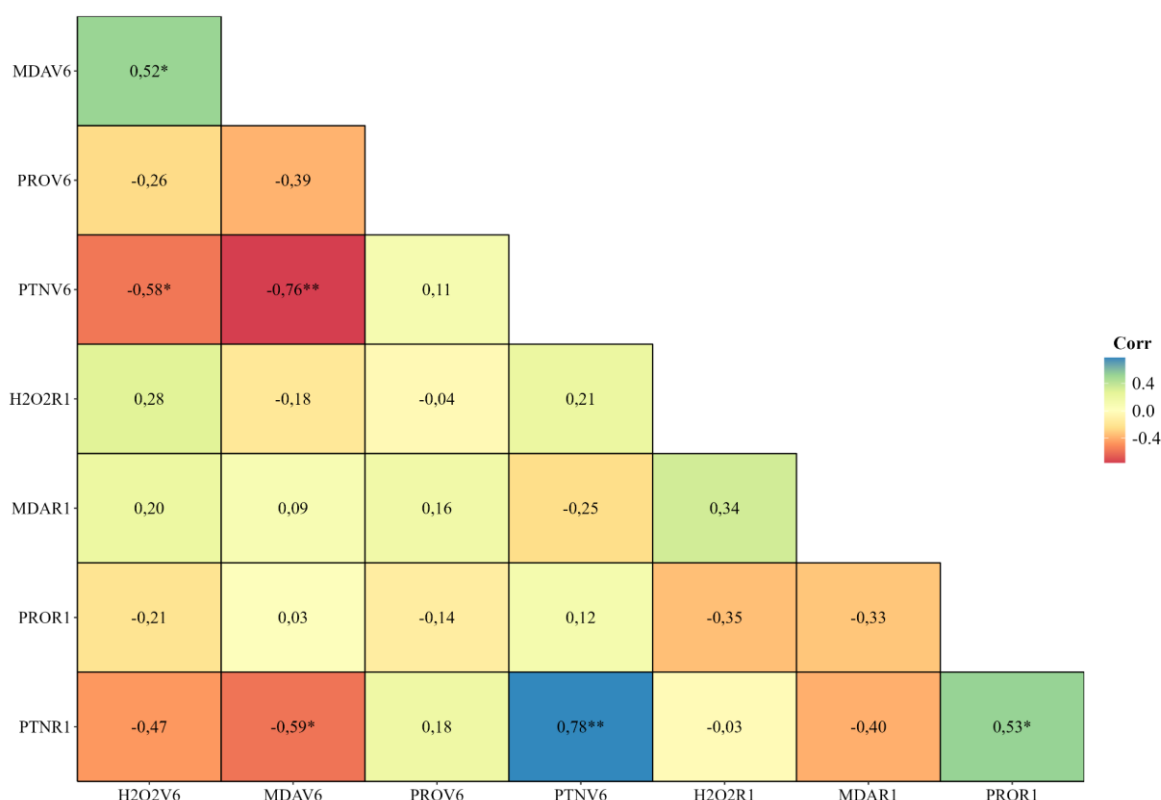
Figurando o índice SPAD no estágio de V6/Vn, observa-se que o vetor converge na direção do primeiro quadrante, no qual se identifica também a elipse da cultivar Pioneer® 95R21E. Esta, foi a que apresentou em todos os tratamentos as maiores médias de concentração de clorofila nas folhas. Por seu turno, a cultivar UFLA 6301 RR sem aplicação de boro foliar (testemunha), denotou menor índice SPAD em V6/Vn (Figura 15).

Tendo em relação o vetor do índice SPAD em na fase reprodutiva, observa-se que o tratamento com ácido bórico, garante a maior concentração de clorofila nas folhas, para o sentido das cultivares UFLA 6301RR e Pioneer® 97R50 IPRO, evienciando que as cultivares maior ciclo possuem maior concentração de clorofila nesse estágio fenológico (Adsul *et al.*, 2020).

Com o objetivo de dissecar as variáveis fisiológicas, procedeu-se o estudo das correlações (Figura 16). Observa-se que a produção de H_2O_2 no estágio de V6 possui correlação com proteínas e MDA também no estágio de V6, de -0,58* e 0,52* respectivamente. E MDA no estágio de V6, possui correlação com proteínas no estágio de V6 e R1, de -0,76** e -0,59* respectivamente. Essas correlações confirmam ainda mais o comportamento da rota do metabolismo antioxidante, no qual o peróxido de hidrogênio e malondialdeído são produtos da degradação da membrana, e que em situações de estresse as plantas aumentam a concentração

destes, para evitar espécies reativas de oxigênio (EROs), como proteínas e aminoácidos, que conseguem proteger e inibir a degradação da membrana (Iqbal *et al.*, 2019; Alharby *et al.*, 2021).

Figura 16 – Correlação dos caracteres fisiológicos, do experimento em casa de vegetação, com condições de baixo investimento em fertilidade do solo.



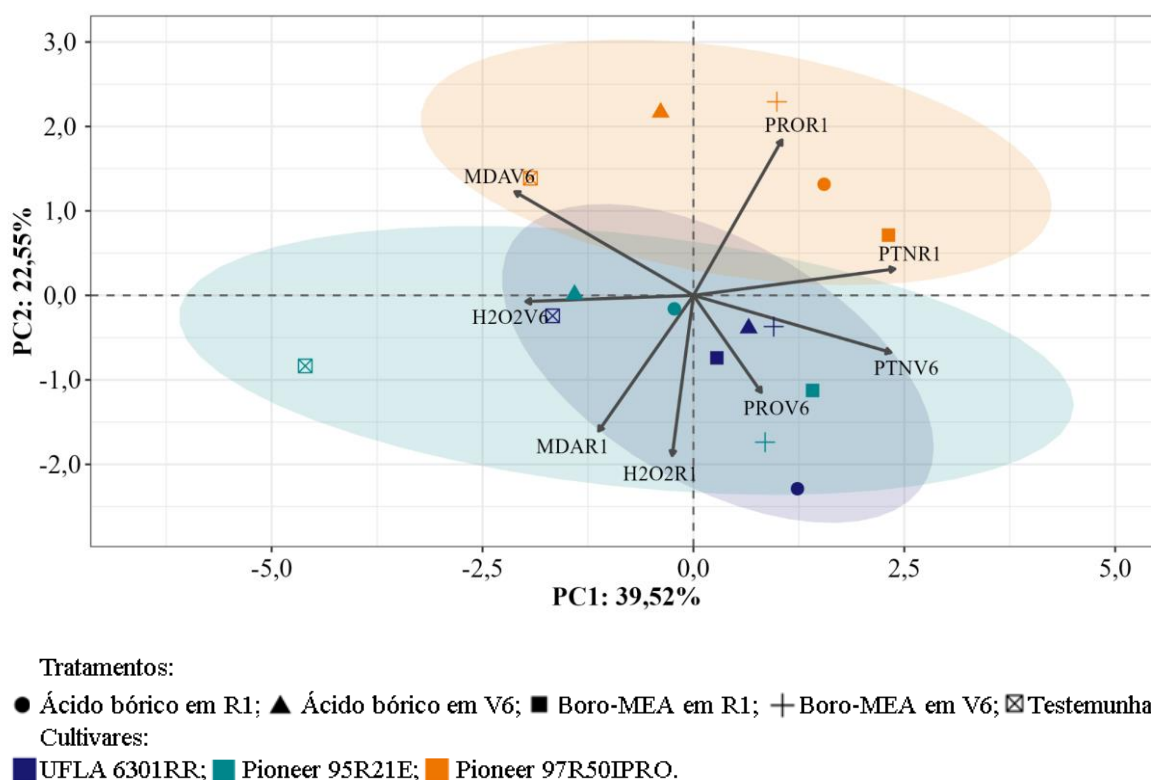
**Significativo pelo teste de correlação de Pearson ($p < 0,01$); *Significativo pelo teste de correlação de Pearson ($p < 0,05$); ^{ns} Não significativo. Corr: escala de correlação de 1 a -1.
Fonte: Do autor (2024).

Neste mesmo sentido, pode-se explicar, a correlação de proteínas no estágio de V6 e R1, pois como as cultivares de soja estão sob estresse hídrico desde de V3, e com baixa disponibilidade de nutrientes, espera-se correlação positiva entre estas variáveis, fato este observado no presente estudo. Depreende-se então, que ao longo do ciclo as proteínas estão atuando de forma ativa para reduzir o estresse das cultivares de soja. Esta mesma observação pode ser corroborada pela correlação de prolina no estágio de R1 (PRO-R1), com proteínas no estágio de R1, ou seja, o aumento da concentração de proteínas favorece o aumento de concentração de prolina nas folhas (Figura 16).

Neste mesmo âmbito, e com objetivo de compreender as correlações e qual dos fatores, cultivares, tratamentos com boro ou a interação dos dois atuaram sobre a variáveis fisiológicas,

realizou-se a análise de PCA (Figura 17). O modelo obtido de dois componentes, explica 62,07% da variação observada nos tratamentos para as variáveis fisiológicas e denota adequado acurácia do mesmo.

Figura 17 – Análise de PCA, dos caracteres fisiológicos, do experimento em casa de vegetação, sob condições de baixo investimento em fertilidade do solo.



Fonte: Do autor (2024).

É possível observar ainda que nos estádios de V6/Vn e R1/R2 as variáveis MDA e H_2O_2 , convergem para o mesmo sentido, evidenciando a correlação mencionada anteriormente (Figura 16), e que prolina no estágio de R1 (PRO-R1), proteínas no estágio de R1 (PTN-R1), assim como prolina e proteínas no estágio de V6, estão na direção oposta dos vetores de MDA e H_2O_2 em ambos os estádios fenológicos (Figura 17).

Depreende-se ainda, sobre as variáveis de oxidação da membrana, que é possível observar que os vetores apontam para a direção do tratamento testemunha, evidenciando que na ausência da aplicação foliar de boro, as plantas irão passar por mais estresse e com isso produzir mais compostos de degradação da membrana quando comparados com os tratamentos os quais aplicaram boro foliar, independente do estágio fenológico (Figura 17).

De acordo com a direção do vetor de prolina em V6 (PRO-V6), pode-se afirmar que o tratamento boro-MEA aplicado via foliar no estágio de V6/Vn e boro-MEA em R1/R2,

propiciou a maior concentração desse aminoácido nas folhas (Figura 17). Por seu turno, no estágio de R1, a maior concentração de prolina foi observada quando se aplicou o boro-MEA. Neste sentido é possível inferir que na situação de déficit hídrico e sobretudo em solos de baixo investimento em fertilidade do solo, visando respostas imediatas, a melhor decisão se perfaz na aplicação de tetraborato ou quelatos de boro (boro-MEA), via foliar, no estágio fenológico em que a planta se encontra, ou seja, de imediato (DELL, HUANG, 1997; YAN *et al.*, 2021).

Tem em questão a concentração de proteínas no estágio de V6 (PTN-V6), verifica-se as maiores concentrações na quase totalidade dos tratamentos, os quais receberam aplicação foliar de boro. Este mesmo cenário, se mantém no estágio fenológico de R1. Isto é, todos os tratamentos com boro via foliar em qualquer época de aplicação foram superiores as testemunhas, independente da cultivar estudada (Figura 17). Sendo assim, emerge que o comportamento das cultivares, tanto para variáveis agronômicas quanto fisiológica ou até mesmo bioquímicas, foi dependente da aplicação de boro foliar, aumentando assim a plasticidade das cultivares de soja e sobretudo propiciando uma maior resiliência em situações de déficit hídrico e baixa fertilidade do solo.

5 CONCLUSÕES

A aplicação de boro foliar nos estádios de V6/Vn e R1/R2 figura-se como alternativa promissora para alterar a os caracteres fenotípicos da cultura da soja, como os componentes de produção e por consonância, propiciar ganhos na produtividade de grãos na cultura da soja.

A aplicação de boro em pré-florescimento e florescimento, permite que as cultivares de soja com grupos de maturação distintos, obtenham resiliência à condições de déficit hídrico.

As condições de fertilidade do solo, interferem no desenvolvimento das cultivares de soja em déficit hídrico, mesmo com a suplementação foliar de boro.

O boro, propicia a maior produção de prolina e proteínas nas folhas, que contribuem sobremaneira para a redução do estresse da planta de soja.

6 REFERÊNCIAS

ALHARBY, H.F. *et al.* Enhancing salt tolerance in soybean by exogenous boron: Intrinsic study of the ascorbate-glutathione and glyoxalase pathways. **Plants**, v. 10, n. 10, p. 2085, 2021. <https://doi.org/10.3390/plants10102085>.

ARTUZO, F.D. **Análise da eficiência técnica e econômica da agricultura de precisão a taxa variável de fertilizantes na cultura da soja no RS**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2015. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/129445>

ALVAREZ, V.V.H. *et al.* Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARAES, P.T.G. Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5º Aproximação. Viçosa: **Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais**. p. 323-324, 1999.

ALVES, G.H.T.; BELLETTINI, S. Diferentes níveis de desfolha artificial nos componentes de produção da soja. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 9, p. 64799-64815, 2020.

AMARILLA, D. *et al.* Comportamento do cultivo da soja (*Glycine max* L.) com aplicação foliar de molibdênio, cobalto e boro. **Jornal Internacional de Biociências**, v.14, n.1, p. 437-443, 2019.

ANDIRMAN, M., BARAN, N. Some Soybean [*Glycine max*. L. (Merill)] Varieties Determination of Cultivation Possibilities of as Main Crop. **Black Sea Journal of Agriculture**, v. 6, n. 4, p. 373-379, 2023. <https://doi.org/10.47115/bsagriculture.1298590>.

ÁVILA, V.S. **Balanço hídrico do solo e partição da evapotranspiração de soja, milho e feijão submetidos a irrigação deficitária no sul do Brasil**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, p. 89, 2016.

BARBIERI, J.D. **Estratégias de manejo no cultivo da soja e milho e o impacto na demanda de água**. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Maringá, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Maringá.p. 117, 2020.

BARBIERI, M., *et al.* Ensaio sobre a bioatividade do solo sob plantio direto em sucessão e rotação de culturas de inverno e verão. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, n.1, p.122-134. 2019. <https://doi.org/10.19084/RCA17068>

BARBOSA, M. C., *et al.* Desempenho agrônômico e componentes da produção de cultivares de soja em duas épocas de semeadura no arenito caiua. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v.34, n.3, p.945-960, 2013.

BARCELOS, G. F. **Efeito da utilização de prolina na tolerância ao estresse hídrico na cultura de soja** (Doctoral dissertation), Universidade de São Paulo, 2022.

BÃRDAŞ, M. *et al.* Impacto da adubação foliar nos parâmetros fisiológicos, produtividade e índices de qualidade da cultura da soja. **Agronomia**, v.13, n.5, p.1287, 2023.

BARROS, H.B., *et al.* Desfolha na produção de soja (*Glycine max* ‘M-SOY 109’), cultivada no cerrado, em Gurupi-TO, Brasil. **Biosei Journal**, v.8, n.2, p.5-10, 2002.

BATES, D.; MAECHLER, M.; BOLKER, B.; WALKER, S.; CHRISTENSEN, R. H. B.; SINGMANN, H.; DAI, B.; SCHEIPL, F.; GROTHENDIECK, G.; GREEN, P.; FOX, J.; BAUER, A.; KRIVITSKY, P. N.; TANAKA, E.; JAGAN, M. Lme4: Linear Mixed-Effects Models using 'Eigen' and S4. 2024. Disponível em: <https://github.com/lme4/lme4/>.

BATISTA, P., *et al.* Biochemical and physiological impacts of zinc sulphate, potassium phosphite and hydrogen sulphide in mitigating stress conditions in soybean. **Physiologia plantarum**, v. 168, n.2, p. 456-472, 2019. <https://doi.org/10.1111/ppl.13034>.

BECHTAOUI, N., *et al.* Phosphate-Dependent Regulation of Growth and Stresses Management in Plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 679916, 2021. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.679916>.

BEN, J.R.; POTTKER, D.; MEDEIROS, L.A. Avaliação de fertilizantes foliares para a soja. In: Reunião de Pesquisa de Soja da região Sul, Santa Rosa: Cooperativa Mista Missões.p. 199 (Embrapa- CNPT. Documentos, 9), 1993.

BERNARD, R.L.; CHAMBERLAIN, D.W.; LAWRENCE, R.E. **Results of the cooperative uniform soybean tests**. Washington: USDA, p. 134. 1965.

BEVILAQUA, G.A.P.; SILVA FILHO, P.M.; POSSENTI, J.C. Aplicação foliar de cálcio e boro e componentes de rendimento e qualidade de sementes de soja. **Ciência Rural**, v. 32, n.1, p. 31-34, 2002. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782002000100006>

BIEMELT S.; KEETMAN U.; ALBRECHT G. Re-aeration following hypoxia or anoxia leads to activation of the antioxidative defense system in roots of wheat seedlings. **Plant Physiology**. v. 116, n. 2, p. 651-658, 1998. <https://doi.org/10.1104/pp.116.2.651>

BHATLA, S.C., LAL, M.A. Source-to-Sink Translocation of Photoassimilates. In *Plant Physiology, Development and Metabolism*. Singapore: **Springer Nature Singapore**, v. 6, n. 2, p. 155-171, 2023. https://doi.org/10.1007/978-981-99-5736-1_6

BHATLA, S.C., *et al.* Translocação fotoassimilada. *Fisiologia vegetal, desenvolvimento e metabolismo*, v. 13, n.1, p. 227-251, 2018. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2023-1_6

BLAGORODOVA, E., *et al.* Efficiency of nutrient solutions with different concentration in the cultivation of white cabbage seedlings. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 18, n. 1, p. 845, 2021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/845/1/012051>.

BOANARES, D., *et al.* The Neglected Reverse Water Pathway: Atmosphere-Plant-Soil Continuum. **Trends in plant science**, v. 25, n. 11, p. 1073-1075, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2020.07.012>.

BORGHI, E., *et al.* Avaliação agronômica de plantas de cobertura para o sistema plantio direto de soja na região Central de Minas Gerais. **Embrapa Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, p. 26, 2021. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/226248/1/Bol-229-Avaliacao-agronomica-plantas-cobertura-plantio-direto.pdf>>

BRADFORD, M.M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry**, v. 72, n. 2, p. 248-254, 1976. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)

BRDAR-JOKANOVIĆ, M. Boron Toxicity and Deficiency in Agricultural Plants. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 21, n. 4, p. 1424, 2020. <https://doi.org/10.3390/ijms21041424>.

BUENO, J.B.; RODRIGUES, G.A. Palha sobre o solo no crescimento da cultura do nabo forrageiro em área degradada. **Revista Interface Tecnológica**, v. 16, n. 1, p. 370-377, 2019. Disponível em: <https://revista.fatectq.edu.br/interfacetecnologica/article/view/548>. Acesso em: 22 mar. 2024.

CALONEGO, J.C. Adubação boratada foliar na cultura da soja. **Colloquium Agrariae**, v. 6, n.2, p. 20-26, 2010. <http://dx.doi.org/10.5747/ca.2010.v06.n2.a054>

CAMPOS, B. de P., *et al.* Classificação para coeficiente de variação em atributos físicos de mudas de café arábica. **Brazilian Journal of Production Engineering**, v.10, n.2, p. 410–420, 2024. <https://doi.org/10.47456/bjpe.v10i2.43765>

CAVALCANTE, A.C.R.; CAVALLINI M.C.; LIMAR, N.R.C.B. Estresse por déficit hídrico em plantas forrageiras. **Documentos/Embrapa Caprinos**, Sobral-CE. p. 50, 2009. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPC-2010/23051/1/doc89.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2024.

CERUTTI, P.H.; WILLE, C.L. Adubação foliar com boro em sistema de plantio direto na cultura da soja. **Revista Científica Rural**, v. 27, n.1, p. 1-11, 2019. <http://dx.doi.org/10.30945/rcr-v21i1.346>

CHEN, L., *et al.* Metabolomic analyses of alfalfa (*Medicago sativa* L. cv. 'Aohan') reproductive organs under boron deficiency and surplus conditions. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 202, n.1, p. 111011, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111011>.

COELHO, M., FERRARI, G., RAMOS JUNIOR, E.U. Competição de cultivares e linhagens de soja convencional, em Sinop, MT, p. 143-145, 2023. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1156513>. Acesso em: 12 mar. 2024.

BERTI, D.S.M.P., *et al.* Doses e épocas de aplicação de boro na qualidade de sementes de soja. **Revista Cultura Agronômica**, v. 28, n. 2, p. 123-137, 2019. <https://doi.org/10.32929/2446-8355.2019v28n2p123-137>

GOMES, D.S.I., *et al.* Boron fertilization affects the physiological quality of conventional and transgenic soybean seeds. **Australian Journal of Crop Science**, v.14, n.1, p. 92-97, 2020.

DAMETO, L., MORAES, L., MOREIRA, A. Effects of boron sources and rates on grain yield, yield components, nutritional status, and changes in the soil chemical attributes of soybean. **Journal of Plant Nutrition**, v. 46, n. 9, p. 2077–2088, 2022. <https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2118611>.

DAMETO, L.S., *et al.* Sources and doses of boron in the physiological quality of soybean seeds and in the volume of the root system. **Journal of Seed Science**, v. 45, n. 2, p. e202345019, 2023. <https://doi.org/10.1590/2317-1545v45262849>

DAS, S., *et al.* Response of soybean growth and yield to sulfur and boron application. **Journal of Bangladesh Agricultural University**, v. 20, n. 1, p.12-19, 2022. <https://doi.org/10.5455/JBAU.100644>

DASS, A., *et al.* Foliar Application of Macro- and Micronutrients Improves the Productivity, Economic Returns, and Resource-Use Efficiency of Soybean in a Semiarid Climate. **Sustainability**, v. 14, n. 10, p. 5825, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14105825>.

DE ARAUJO, W. O., COELHO, C. J. Análise de componentes principais (PCA). **University Center of Anápolis**, Annapolis, 2009.

DAY, S., AASIM, M. Role of boron in plant growth and development: Perspective of deficiency and toxicity. **Plant micronutrients: deficiency and toxicity management**, v. 19, p. 435-453, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49856-6_19

DE CASTRO, T.A.V.T., *et al.* Humic acids induce a eustress state via photosynthesis and nitrogen metabolism leading to a root growth improvement in rice plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.162, p. 171-184, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.02.043>

DE SOUZA , E.S., *et al.* Does the application of boron in different stages of soy crop affect its productivity?. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 21, n. 4, p. 395–401, 2022. <https://doi.org/10.5965/223811712142022395>

DE SOUZA, R.G., *et al.* Desempenho agrônômico de soja, sob interferência de plantas infestantes. **Revista Cultura Agronômica**, v. 28, n. 2, p. 194-203, 2019. <http://dx.doi.org/10.32929/2446-8355.2019v28n2p194-203>.

DELL, B., HUANG, L. Resposta fisiológica das plantas ao baixo teor de boro. **Planta e Solo**, v.193, p. 103-120, 1997. <https://doi.org/10.1023/A:1004264009230>.

DESHMUKH, R., TRIPATHI, D.K., GUERRIERO, G. **A Importância do Boro na Nutrição das Plantas**, v. 20, p. 489-500, 2020. <https://doi.org/10.1002/9781119487210.ch20>

SILVA, D.D.R.C., *et al.* Doses, métodos e épocas de aplicação de boro na soja em condições de campo. **Revista de Biociências**, v. 36, n. 6, p. 1999-2006, 2020. <http://dx.doi.org/10.14393/BJ-v36n6a2020-48015>

DI MAURO, G., *et al.* Definindo opções de grupos de maturidade de soja para cenários climáticos contrastantes no Cone Sul Americano. **Pesquisa de culturas de campo**, v. 287, n. 1, p. 108676, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108676>

DISCHE, Z. General color reactions. In: WHISTLER, R. L.; WOLFRAM, M. L. (Eds.). **Carbohydrate in carbohydrate chemistry**. New York: **Academic**, v. 1, p. 478-512, 1962.

DOMINGOS, C.D.S., *et al.* A aplicação foliar de cálcio e boro pode aumentar o rendimento da soja e a qualidade das sementes?. **Acta Agriculturae Scandinavica**, Seção B — Ciência do

Solo e Plantas, v. 71, n. 3, p. 171-181, 2021. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782002000100006>

DOS SANTOS, C. V., *et al.* Fenotipagem de raízes de milho visando tolerância à seca: uma revisão, v. 10, n. 8, p. e24119817265, 2021. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i8.17265>

DUPAS, E. **Nitrogênio, potássio e boro: aspectos produtivos, morfológicos, nutricionais e frações fibrosas e proteicas do capim-tanzânia.** 2012. 89f. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2012.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Tecnologias de produção de soja: região central do Brasil 2020. Londrina: **Embrapa Soja**, p. 347, 2020.

EROKHIN, G., KONOVSKIY, V., PERCHIN, I. **Quality of soybean harvesting with grain harvesters. science in the central Russia**, v. 57, n. 3, p. 7-13, 2022. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2022-3-7-13>.

FARINELLI, R., *et al.* Características agronômicas e qualidade fisiológica de sementes de cultivares de feijão adubados via foliar com cálcio e boro. **Científica**, v. 34, n. 1, p. 59-65, 2006.

FERNANDEZ, V.; SOTIROPOULOS, T.; BROWN, P. **Adubação Foliar – Fundamentos Científicos e Técnicas de Campo.** 1º ed. São Paulo, SP: Abisolo, 2015.

FILHO, J., *et al.* Genetic parameters and selection strategies for soybean progenies aiming at precocity and grain productivity. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 46, p. e0004322, 2022. <https://doi.org/10.1590/1413-7054202246004322>.

FOX, J., WEISBERG, S. **An R Companion to Applied Regression.** 3. ed. Sage, p. 608, 2019.

FUJIYAMA, B., *et al.* Boron fertilization enhances photosynthesis and water use efficiency in soybean at vegetative growth stage. **Journal of Plant Nutrition**, v. 42, n. 19, p. 2498 – 2506, 2019. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1659326>.

GABRIEL, K.R. The biplot graphic display of matrices with application to principal component analysis. **Biometrika**, v. 58, n. 3, p. 453-467, 1971. <https://doi.org/10.1093/biomet/58.3.453>

GALERIANI, T., *et al.* A fertilização com cálcio e boro melhora a eficiência fotossintética e o rendimento de grãos da soja. **Plants**, v. 11, n. 21, p. 2937, 2022. <https://doi.org/10.3390/plants11212937>.

GAVA, R., *et al.* Estratégias de manejo de déficit hídrico na irrigação da cultura da soja. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, Tupã, v. 10, n. 3, p. 305-315, 2016. <http://dx.doi.org/10.18011/bioeng2016v10n3p305-315>

GEBRE, M., RAJCAN, I., EARL, H. Genetic variation for effects of drought stress on yield formation traits among commercial soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) cultivars adapted to Ontario, Canada. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 1020944, 2022. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1020944>.

GESTEIRA, G. de S., *et al.* “Seleção fenotípica de cultivares de soja precoce para a região Sul de Minas Gerais”, **Revista Agrogeoambiental**, v. 7, n. 3, p. 79-88, 2015. <http://dx.doi.org/10.18406/2316-1817v7n32015730>

GIANNOPOLITS, O.; RIES, S.K. Superoxide dismutase: I. Occurrence in higher plants. **Plant Physiology**, v. 59, n. 2, p. 309-314, 1977. <https://doi.org/10.1104/pp.59.2.309>

GODINHO, M. D. S., *et al.* Classificação de refrigerantes através de análise de imagens e análise de componentes principais (PCA). **Química Nova**, v. 31, n. 6, p. 1485-1489, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422008000600039>

GOMES, I. S. Boron fertilization at different phenological stages of soybean. **Australian Journal of Crop Science**, v. 11, n. 8, p. 1026-1032, 2017.

HABIB, J., ALI, O., ALSAJRI, F. Response of Soybean Cultivars to Foliar Fertilizers Using Iron and Boron in Gypsum Soil. **Série de conférences IOP: Earth and Environmental Science**, v. 1262, p. 1-8, 2023. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1262/5/052011>.

HAMURCU, M., ARSLAN, D., HAKKI, E.E., OZCAN, M.M., PANDEY, A., KHAN, M.K., GEZGIN, S. Aplicação de boro afetando o rendimento e a composição de ácidos graxos de genótipos de soja. **Planta, Solo e Meio Ambiente**, Praga, v.65, n.5, p.238–243, 2019. <https://doi.org/10.17221/679/2018-PSE>

HANSEL, F.D., OLIVEIRA, M.L. Importância dos micronutrientes na cultura da soja no Brasil. **Informações Agronômicas**, v.1, n. 153, p. 1-8, 2016.

HARGER, N., FIORETTO, R., RALISCH, R. Avaliação nutricional da cultura da soja pelos métodos DRIS e níveis de suficiência. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 24, n. 2, p. 219–224, 2003. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2003v24n2p219>

HARTLEY, H.O. The maximum F-ratio as a short-cut test for heterogeneity of variances. **Biometrika**, v. 37, n. 3/4, p. 308-312. 1950. <https://doi.org/10.1093/biomet/37.3-4.308>

HAQ, S., *et al.* Heat Shock Proteins: Dynamic Biomolecules to Counter Plant Biotic and Abiotic Stresses. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 20, n. 21, p. 5321, 2019. <https://doi.org/10.3390/ijms20215321>.

HAVIR, E.A., MCHALE, N.A. Biochemical and development characterization of multiples forms of catalase in tobacco leaves. **Plant Physiology**, v. 84, n. 2, p. 450-455, 1987. <https://doi.org/10.1104/pp.84.2.450>.

HUSSAIN, S., *et al.* Weak stem under shade reveals the lignin reduction behavior. **Journal of Integrative Agriculture**, v.18, n. 3, p. 496-505, 2019. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)62111-2](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)62111-2).

HUSSEIN, M., SARHAN, I. The Effect of Planting Distances and Foliar Fertilization with Zinc on the Vegetative Growth Characteristics of Soybean Crop. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 1213, n. 1, p. 012009, 2023. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1213/1/012009>.

INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE - IPNI. **Informação agrônômica sobre nutrientes para as plantas**, 2018.

IQBAL, N., *et al.* Tolerância à seca da soja (*Glycine max* (L.) Merr.) por características fotossintéticas melhoradas e atividades enzimáticas antioxidantes eficientes sob um sistema de raiz dividida. **Fronteiras em Fisiologia**, v. 10, n. 1, p. 786, 2019. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00786>.

JORDAAN, E., WAALS, J., MCLAREN, N. Efeito da irrigação na severidade da podridão do carvão, na perda de produtividade e na colonização da soja e do girassol. **Proteção de Cultivos**, v. 122, n. 1, p. 63-69, 2019. <https://doi.org/10.1016/J.CROPRO.2019.04.026>.

KANG, B., *et al.* Genetic and Environmental Variation of First Pod Height in Soybean (*Glycine max* (L.) Merr). **Plant breeding and biotechnology**, v. 5, n. 12, p. 36-44, 2017. <https://doi.org/10.9787/PBB.2017.5.1.36>.

KAPPES, C., GOLO, A. L., CARVALHO, M. A C. Doses e épocas de aplicação foliar de boro nas características agrônômicas e na qualidade de sementes de Soja. **Ciência Agrária**, Curitiba, v. 9, n. 3, p. 291-297, 2008. <http://dx.doi.org/10.5380/rsa.v9i3.11563>.

KOHLI, S.K., *et al.* Boron in plants: Uptake, deficiency and biological potential. **Plant Growth Regulation**, v. 100, n. 2, p. 267-282, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10725-022-00844-7>

KORADDI, S., BASAVARAJA, G.T. Estudos de variabilidade genética na produtividade e características dos componentes de produção da soja. **Jornal Internacional de Microbiologia Atual e Ciências Aplicadas**, v. 8, n. 2, p. 1269-1274, 2019. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.802.148>

KOVALENKO, O., *et al.* Influence of planting density on productivity of soybean varieties of different maturity groups in the northern steppe zone of the Mykolaiv region. **Grail of Science**, n. 29, p. 150-155, 2023. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.07.07.2023.023>.

KUHLGERT, S., *et al.* MultispeQ Beta: uma ferramenta para fenotipagem de plantas em larga escala conectada à rede aberta PhotosynQ. **Ciência aberta da Royal Society**. v. 3, n. 10, p. 160592, 2016. <https://doi.org/10.1098/rsos.160592>

KUMAR, S., KUMAR, S., MOHAPATRA, T. Interaction Between Macro- and Micro-Nutrients in Plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 12; n. 1, p. 665583, 2021. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.665583>.

KUMAR, S.; PHOGAT, M.; LAL, M. Response of pulse and oilseed crops to boron application: a review. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, Kancheepuram, v. 7, n. 3, p. 669-675, 2018. <http://dx.doi.org/10.20546/ijcmas.2018.703.078>

KURAOKA, A.E.; BELOTO, N.C. **Adubação foliar e rotação de cultura na produtividade da soja em plantio direto**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, MS, 2022.

LANDI, M., MARGARITOPOULOU, T., PAPADAKIS, I.E. *et al.* Boron toxicity in higher plants: an update. **Plants**, v. 250, n. 4, p. 1011 – 1032, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00425-019-03220-4>.

LEITE, R.F.C., *et al.* Rendimento e qualidade de sementes de arroz irrigado em função da adubação com boro. **Revista brasileira de sementes**, v. 33, n. 4, p. 785-791, 2011.

LI, F., *et al.* Integrating transcriptome and metabolome analyses of the response to cold stress in pumpkin (*Cucurbita maxima*). PLoS ONE, v. 16, n. 5, p. e0249108, 2021. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249108>.

LI, M., *et al.* Identification of Traits Contributing to High and Stable Yields in Different Soybean Varieties Across Three Chinese Latitudes. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, n. 1, p. 1642, 2020. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01642>.

LIMA, M.L., *et al.* Fontes e doses de boro na qualidade de sementes de feijão-comum e mamona sob consórcio. **Revista Caatinga**, v. 26, n. 4, p. 31-38, 2013. <http://periodicos.ufersa.edu.br/index.php/sistema>

LINDOO, S.J., NOODÉN, L.D. Estudos sobre o comportamento do sinal de senescência em soja Anoka. **Fisiologia Vegetal**, v. 59, n. 6, p. 1136-1140, 1977. <https://doi.org/10.1104/pp.59.6.1136>

LIN, X., *et al.* Molecular mechanisms for the photoperiodic regulation of flowering in soybean. **Journal of integrative plant biology**, v. 63, n. 6, p. 981-994, 2020. <https://doi.org/10.1111/jipb.13021>.

LIU, J., LU, Y., HUA, W., LAST, R. Uma nova luz sobre a manutenção do fotossistema II na fotossíntese oxigênica. **Fronteiras na Ciência Vegetal**, v. 10, n. 1, p. 975, 2019. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00975>.

LONG, Y., PENG, J. Interaction between Boron and Other Elements in Plants. **Genes**, v. 14, n. 1, p. 130, 2013. <https://doi.org/10.3390/genes14010130>.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2. ed. Piracicaba: **Associação Brasileira de Potassa e do Fósforo**, p. 319, 1997.

MANSOOR, S., *et al.* Reactive Oxygen Species in Plants: From Source to Sink. **Antioxidants**, v. 11, n. 2, p. 225, 2022. <https://doi.org/10.3390/antiox11020225>.

MARCHETTI, M.E., MOTOMYA, W.R., FABRÍCIO, A.C., NOVELINO, J.O. Resposta do girassol, *Helianthus annuus*, a fontes e níveis de boro. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 23, n. 5, p. 1107-1110, 2008. <http://dx.doi.org/10.4025/actasciagron.v23i0.2566>

MARQUARIDT, D. W. Generalized Inverses, Ridge Regression, Biased Linear Estimation, and Nonlinear Estimation. **Technometrics**, v. 3, n. 12, p. 591–612, 1970. <https://doi.org/10.1080/00401706.1970.10488699>

MARQUES, S.C. **Aplicação foliar de boro, cobre, zinco e extrato de algas nos componentes de produção e qualidade fisiológica de sementes de trigo na região de Cerrado**. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. Área de conhecimento: Sistemas de Produção, s.n., p. 1-51, 2019.

MASCARENHAS, H.A.A.; ESTEVES, J.A.S.; WUTKE, E.B.; GALLO, P.B. Micronutrientes em soja no estado de São Paulo. **Nucleus**, v. 11, n. 1, p. 323-343, 2014. <https://doi.org/10.3738/1982.2278.1102>

MATZENAUER, R.; BARNI, N.A.; MALUF, J.R.T. Estimativa do consumo relativo de água para a cultura da soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.33, n.6, p.1013-1019, 2003. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782003000600004>

MILLER, G.L. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. **Analytical Chemistry**, Washington, v. 31, n. 3, p. 426-428, 1959. <https://doi.org/10.1021/ac60147a030>

MIRANDA, R., *et al.* Selection of Soybean and Cowpea Cultivars with Superior Performance under Drought Using Growth and Biochemical Aspects. **Plants**, v. 12, n. 17, p. 3134, 2023. <https://doi.org/10.3390/plants12173134>.

MORAIS, A.W. *et al.* Produtividade do feijão-comum fertirrigado com zinco e boro em latossolo vermelho de Cerrado. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada-RBAI**, v.1, n.5, p. 4240-4247, 2020. <http://dx.doi.org/10.7127/rbai.v14n501209>

MONTGOMERY, D.C.; PECK, E.A. **Introduction to linear regression analysis**. New York: J. Wiley, 1981. 504p.

MOREIRA, S. G., *et al.* Circular agriculture increases food production and can reduce N fertilizer use of commercial farms for tropical environments. **Science of the Total Environment**, v. 879, p. 163031, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163031>

NAKAMURA, M., NISHIMURA, T., MORITA, M. Input and signal conversion of gravity in plant gravitropism. *Journal of experimental botany*, v. 70, n. 14, p. 3495–3506, 2019. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz158>.

NAKANO, Y.; ASADA, K. Hydrogen peroxide scavenged by ascorbate specific peroxidase in spinach chloroplasts. **Plant and Cell Physiology**, v. 22, n. 5, p. 867-880, 1981. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.pcp.a076232>

NASCIMENTO CINTRA, P. H.; PEREIRA DE MELO, O. F.; SILVA DE MENEZES, J.O. Produção agrícola: uma revisão bibliográfica sobre as mudanças climáticas e produtividade de plantas graníferas no Brasil. **Revista Agrotecnologia**, v. 11, n. 1, p. 87-94, 2020.

NASSER, M.D., *et al.* Atributos químicos de solos manejados por usina sucroalcooleira situada na Nova Alta Paulista. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 3, p. e6510313053-e6510313053, 2021. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i3.13053>

NIU, J., *et al.* Effects of Foliar Fertilization: a Review of Current Status and Future Perspectives. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 21 , p. 104-118, 2021. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00346-3>

ÖKTEM A.G. Effects of different boron applications on seed yield and some agronomical characteristics of red lentil. **Turkish Journal of Field Crops**, 14.ed, v. 35, n. 1, p. 2145-2155, 2012. <http://dx.doi.org/10.17557/tjfc.1106779>

OLIGINI, K., *et al.* Sowing date and soybean maturity group effects on soybean-corn succession. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 16, n. 2, p. e10012, 2023. <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2023v16n2e10012>.

OLIVEIRA, S.L., *et al.* A fertilização foliar com molibdênio melhora o metabolismo fotossintético e a produtividade de grãos de soja e milho cultivados no campo. **Fronteiras na ciência das plantas**, v. 13, p. 887682, 2022.

OLIVEIRA, Z.B., *et al.* Estimativa da demanda hídrica da soja utilizando modelo de balanço hídrico do solo e dados da previsão do tempo. **Irriga**, v. 25, n. 3, p. 492–507, 2020.

PAWLOWSKI, M.L., HELFENSTEIN, J., FROSSARD, E., HARTMAN, G. Boron and zinc deficiencies and toxicities and their interactions with other nutrients in soybean roots, leaves, and seeds. **Journal of Plant Nutrition**, v. 42, n. 6, p. 634–649, 2019. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1567782>.

ADSUL P.B., PATIL V.D., SHINDE S.E. Effect of soil application of sulfur and zinc and foliar application of KNO₃, Borax, NAA and GA on chlorophyll, carotenoids and quality parameters of soybean (*Glycine max* L. Merrill). **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v. 9, p. 494-497, 2020.

PELEKH, L. Influence of cultivation technology elements on the formation of soybean productivity in the conditions of the right-bank forest-steppe. **Agriculture and Forestry**, v. 21, n. 2, p. 109-119, 2021. <https://doi.org/10.37128/2707-5826-2021-2-9>.

R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, **Austria**, 2020. URL <https://www.R-project.org/>.

REICHARDT, K., TIMM, L. Como as plantas absorvem os nutrientes do solo. **Solo, Planta e Atmosfera**, v. 5, n.1, p. 313-330, 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-030-19322-5_16.

RAGGIABDALLAH, P.; MACIEL, T. J. L.; TEIXEIRA, E. C. O impacto inflacionário sobre os preços agrícolas. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 28, n. 3, p. 45-56, 2020.

RAIMUNDI, D.L.; MOREIRA, G.C.; TURRI, L.T. Modos de aplicação de boro na cultura da soja. **Cultivando o Saber**, Cascavel, v. 6, n. 2, p. 1-5, 2013.

RAUF, S., SHEHZAD, M., FATIMA, S., WARBURTON, M., MALINOWSKI, P. Genetic enhancement of soybean (*Glycine max* L.) germplasm for adaptability and productivity. **Sabao Journal of Breeding and Genetics**, v. 55, n. 5, p. 1451-1462, 2023. <https://doi.org/10.54910/sabao2023.55.5.1>.

RANI, R., RAZA, G., ASHFAQ, H., RIZWAN, M., SHIMELIS, H., TUNG, M., ARIF, M. Analysis of genotype $\times$ environment interactions for agronomic traits of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) using association mapping. **Frontiers in Genetics**, v. 13, p. 1090994, 2023. <https://doi.org/10.3389/fgene.2022.1090994>.

REHMAN, A., KHAN, A., ALI, M.A., KHAN, M.U., KHAN, S.U., ALI, L. Análise de desempenho de algoritmos pca, pca esparso, kernel pca e pca incremental para predição de insuficiência cardíaca. Em 2020, **Conferência Internacional sobre Engenharia Elétrica, Comunicação e Computação (ICECCE)** (pp. 1-5). IEEE, 2020.

RERKASEM, B., JAMJOD, S., PUSADEE, T. Productivity limiting impacts of boron deficiency, a review. **Plant Soil**, v. 455, n. 1, p. 23-40, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04676-0>

RESENDE, M. D. V. D.; DUARTE, J. B. Precision and Quality Control in Variety Trials. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 37, n. 3, p. 182-194, 2007. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/pat/article/view/1867>. Acesso em: 22 mar. 2024.

RIOS, C.V.; SOUZA, G.V.D.; DE BRITO, E.P.; PAGLIOSA, M.; DA SILVA, C.P. Efeito do cálcio, boro e potássio no crescimento inicial de hortelã-verde (*Mentha spicata* L.) em solução nutritiva. **Cientific@-Multidisciplinary Journal**, v. 9, n. 1, p. 1-11, 2022. <http://dx.doi.org/10.37951/2358-260X.2022v9i1.5945>

ROSOLEM, C.A.; BOARETTO, A. E. A adubação foliar em soja. In: BOARETTO, A. E.; ROSOLEM, C. A. **Adubação foliar**. Campinas, SP: Fundação Cargill, p. 500, 1989.

ROSOLEM, C.A.; ZANCANARO, L.; BÍSCARO, T. Boro disponível e resposta da soja em latossolo vermelho-amarelo do Mato Grosso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2375-2383, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000600016>.

ROSS, J.R.; SLATON, N.A.; BRIE, K.R.; DELONG, R.E. Influências da Fertilização com Boro no Rendimento da Soja e nas Concentrações de Boro nas Folhas e Sementes. **Agronomy Journal**, v. 98, p. 198–205, 2006.

SALEEM, M.A., TAHIR, M., AHMAD, T., TAHIR, M.N. Foliar application of boron improved wheat (*Triticum aestivum* L.) yield and quality in limestone field. **Soil and Environment**, v. 39, n. 1, p. 103, 2020.

SALIM, M., *et al.* Screening of Soybean Genotypes Based on Root Morphology and Shoot Traits Using the Semi-Hydroponic Phenotyping Platform and Rhizobox Technique. **Agronomy**, v. 12, n. 1, p. 56, 2021. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010056>.

SALOMÃO, P.E.A., *et al.* importância do sistema de plantio direto na palha para reestruturação do solo e restauração da matéria orgânica. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 1, p. e154911870-e154911870, 2020. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i1.1870>

SCHANOSKI DE SOUZA, E., *et al.* A aplicação de boro nas diferentes fases da cultura da soja afeta sua produtividade?. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 21, n. 4, p. 395- 401, 2022. <http://dx.doi.org/10.5965/223811712142022395>

SCHÖN, M.K.; BLEVINS, D.G. Foliar Applications of Boron Increase Final Branch and Pod Number in Field-Grown Soybean Plants. **Plant Physiologic**, v. 92, n. 3, p. 602–607, 1990.

SCOTT, A.J.; KNOTT, M.A. A cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance. **Biometrics**, Raleigh, v.30, n.3, p.507-512. 1974.

SESTAK, Z., J. CATSKY, AND P. JARVIS. 1971. **Plant photosynthetic production: Manual of methods**. W. Junk, The Hague, Netherlands, 1971.

SHABBIR, Z., *et al.* Copper uptake, essentiality, toxicity, detoxification and risk assessment in soil-plant environment. **Chemosphere**, v. 259, p. 127436, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127436>

SHAN, F., *et al.* Effects of Shading on the Internode Critical for Soybean (Glycine Max) Lodging. **Agronomy**, v. 12, n. 2, p. 492, 2022. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020492>.

SHAPIRO, A.S.S.; WILK, M.B. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). **Biometrika**, v. 52, n. 3/4, p. 591–611, 1965. <https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591>

SHEN, S.Y., WU, Y.X., ZHENG, Y.S. Review of drought response in plants, from phenotype to molecular. **Curr. Biotechnologia**, v. 7, p. 169–176, 2017.

SILVA, R.C.D., *et al.* Nutrição com boro na soja em função da disponibilidade de água no solo. **Scientia Agraria**, v. 18, n. 4, p. 155-165, 2017.

SOMAVILA, J.; DALASTRA, G.M.; COUTINHO, P.W.R.; SOUTO, M.S.; PEREIRA, C. Influência da aplicação de boro em sulco de plantio na cultura da soja Influence of boron application in planting furrow in soybean crop. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 3, p. 21950-21960, 2022.

JÚNIOR, P. C., *et al.* Boron foliar supplementation as a strategy to attenuate drought stress in soybean. **Annals of Applied Biology**, v. 183, n. 3, p. 220-230, 2023. <https://doi.org/10.1111/aab.12848>

SOUZA, L.C.D. **Efeito da aplicação de fertilizante mineral via foliar sobre a produção e qualidade fisiológica de sementes de soja**. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Produção), Universidade Estadual Paulista (Faculdade de Engenharia), Ilha Solteira, p. 51, 2007.

SOUZA, V.A.P. de. **Seleção indireta para o número de grãos por vagem e tamanho dos grãos visando a produtividade em soja**. 53 p. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas) –Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2023. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/58483>, 2023.

STOUT, L.A. **Adubação foliar com nutrientes na cultura da soja**, 2016. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/47969/1/09.htm>. Acesso em: 20 de abril 2024.

SUN, X., *et al.* Identification and Fine Mapping of a Quantitative Trait Locus Controlling the Total Flower and Pod Numbers in Soybean. **Agronomy**, v. 12, n. 4, p. 790, 2022. <https://doi.org/10.3390/agronomy12040790>.

SURESHRAO, S.S., SINGH, V.J., GAMPALA, S., RANGARE, N.R. Assessment of genetic variability of the main yield related characters in soybean. **International Journal of Food, Agriculture and Veterinary Sciences**, v. 4, n. 2, p. 69-74, 2014.

SWAEF, T., *et al.* On the pivotal role of water potential to model plant physiological processes. **in silico Plants**, v. 4, n. 1, p. 1-28, 2022. <https://doi.org/10.1093/insilicoplants/diab038>.

TARIQ, M., *et al.* Improving boron use efficiency via different application techniques for optimum production of good quality potato (*Solanum tuberosum* L.) in alkaline soil. **PLoS ONE**, v. 17, n. 1, p. e0259403, 2022. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0259403>.

TEIXEIRA ALVES, G.H.; BELLETTINI, S. Diferentes níveis de desfolha artificial nos componentes de produção da soja / Diferentes níveis de desfolha artificial em componentes de produção de soja. **Brazilian Journal of Development**, v.6, n.9, 64799–64815, 2020.

TEIXEIRA, G.C.M., *et al.* Silício na mitigação dos estresses por deficiência de manganês e pelo déficit hídrico em mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar. **Científica**, v. 48, n. 2, p. 170-187, 2020. <http://dx.doi.org/10.15361/1984-5529.2020v48n2p170-187>

TENELLI, S., *et al.* How do nitrogen fertilization and cover crop influence soil C-N stocks and subsequent yields of sugarcane?. **Soil and Tillage Research**, v. 211, n. 1, p. 104999, 2021. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2021.104999>.

TOMICIOLI, R.M.; LEAL, F.T.; COELHO, A.P. Limitação da produtividade pela deficiência de boro nas culturas da soja, milho, feijão e café. **South American Sciences**, v. 2, n. 1, p. 21100-21100, 2021. <https://doi.org/10.17648/sas.v2i1.100>

TRAUTMANN, R. R., *et al.* Potencial de água do solo e adubação com boro no crescimento e absorção do nutriente pela cultura da soja. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 38, n. 1, p. 240-251, 2014.

VANI, I.R.; WESTPHALEN, F. **Resposta da soja a Aplicação de Boro**. Universidade Federal de Santa Maria campus Frederico Westphalen-RS, curso de graduação em Agronomia, p. 1-21, 2022.

VARGAS, N. B. *et al.* **Desempenho agrônômico da soja e qualidade do solo sob rotação e sucessão de culturas em plantio direto**. 2023.

VIEIRA, C., *et al.* Canonical Correlation Analysis Between Growth and Nutrition in Teak Seedlings. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 2, p. 1-9, 2019. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.081417>.

VORIES, E., SUDDUTH, K. Determining sensor-based field capacity for irrigation scheduling. **Agricultural Water Management**, v. 250, n. 1, p. 106860, 2021. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2021.106860>.

WANG, L., *et al.* Redundantly determine photoperiodic flowering and yield in soybean. **Journal of integrative plant biology**, v. 65, n. 1, p. 188-202, 2022. <https://doi.org/10.1111/jipb.13398>.

WANG, X., *et al.* Physiological Response of Soybean Plants to Water Deficit. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, n. 1, p. 809692, 2022. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.809692>.

WERNER, F., *et al.* Índices de área foliar e SPAD da soja em função de épocas de dessecação de pastagem de braquiária. In: **Congresso brasileiro de soja**, 8., 2018, Goiânia. Inovação, tecnologias digitais e sustentabilidade da soja: anais. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

WICKHAM, H. *et al.* Welcome to the Tidyverse. **Journal Of Open Source Software**, v. 4, n. 43, p. 1686, 2019.

YANG, W., *et al.* Critical Photoperiod Measurement of Soybean Genotypes in Different Maturity Groups. **Crop Science**, v. 59, n. 5, p. 2055-2061, 2019. <https://doi.org/10.2135/CROPSCI2019.03.0170>.

YAN, L., *et al.* Boron mitigates citrus root injuries by regulating intracellular pH and reactive oxygen species to resist H⁺-toxicity. **Environmental pollution**, v. 255, n. 2, p. 113254, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113254>.

YAN, L., *et al.* Proline metabolism and biosynthesis behave differently in response to boron deficiency and toxicity in Brassica napus. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 167, p. 529-540, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.08.029>

YEMM, E.W.; COCKING, E.C.; RICKETTS, R.E. The Determination of Amino Acids with Ninhydrin. **Analyst**, v. 80, p. 209-214, 1955. <http://dx.doi.org/10.1039/an9558000209>

YI, G., *et al.* Effect of soybean peptides against hydrogen peroxide induced oxidative stress in HepG2 cells via Nrf2 signaling. **Food and function**, v. 11, n. 3, p. 2725-2737, 2020. <https://doi.org/10.1039/c9fo01466g>.

ZANANDREA, I., *et al.* Tolerance of Sesbania virgata plants to flooding. **Australian Journal of Botany**, v. 57, n. 8, p. 661-669, 2010. <http://dx.doi.org/10.1071/BT09144>

ZANON, A.J., *et al.* **Ecofisiologia da soja-Visando altas produtividades**, Santa Maria, v. 1, n.s., p. 136, 2018.

ZHANG, K., *et al.* A comprehensive assessment framework to quantify climate and anthropogenic contributions to streamflow changes: a case study in a typical semi-arid basin of North China. **Meio Ambiente. Modelo. Suave**, v. 128, p. 104704, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104704>

ZHANG, Q., HU, J., BAI, Z. Invariant test based on the modified correction to LRT for the equality of two high-dimensional covariance matrices. **Electronic Journal of Statistics**, v. 13, n. 1, p. 850-881, 2019. <https://doi.org/10.1214/19-EJS1542>.

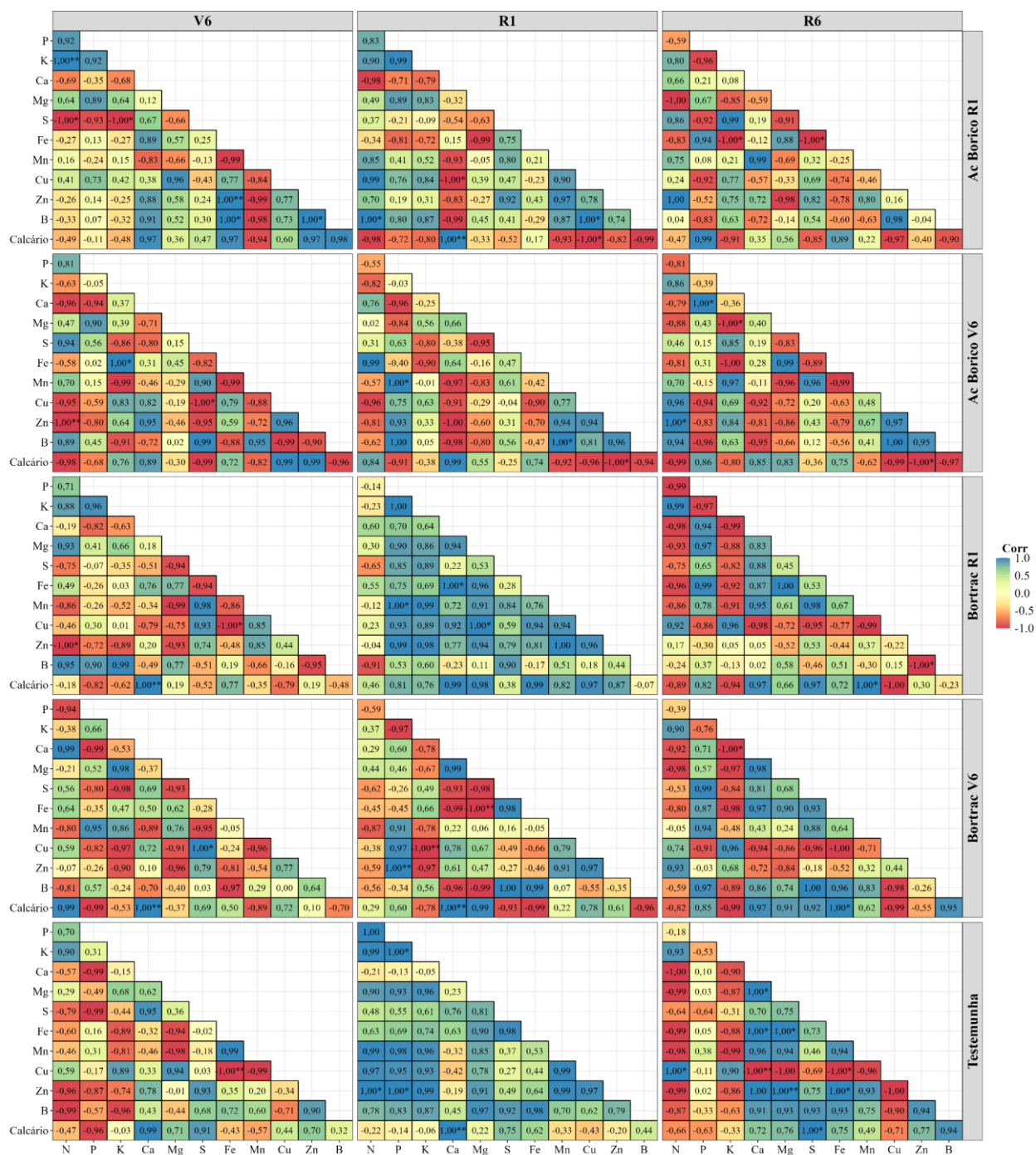
ZIPPER, S.C.; QIU, J.; KUCHARIK, C.J. Drought effects on US maize and soybean production: spatiotemporal patterns and historical changes. **Environmental Research**

Letters, United Kingdom, v.11, n.9, p.1-12, 2016. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/11/9/094021>

ZOU, J.N. et al. Effects of exogenous melatonin on soybean physiology and productivity during the seed filling phase under water stress. **Acta Agron**, v. 46, p. 745–75, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.smr.2004.06.004>

APÊNCIDE

Figura 1A – Correlação dos caracteres nutricionais do experimento de campo da safra de 2022/23.



**Significativo pelo teste de correlação de Pearson ($p < 0,01$); *Significativo pelo teste de correlação de Pearson ($p < 0,05$); ns Não significativo. Corr: escala de correlação de 1,00 a -1,00.
Fonte: Do autor (2024).

Tabela 1A - Resumo da análise de variância (ANAVA) individuais dos experimentos em campo, realizados no município de Ijaci-MG, nos anos agrícolas de 2022/23 e 2023/24.

Variável	Safra	F Cult	F Trat	F CT	AC Cult	AC Trat	Média	CV
ALTR8	1	4305,27**	78,53**	9,81**	1,00	0,99	98,79	2,19
ALTR8	2	197,19**	9,95**	3,63**	1,00	0,95	114,04	5,35
AIPV	1	117,84**	1,26	2,88*	1,00	0,45	12,83	12,99
AIPV	2	27,56**	1,26	0,62	0,98	0,45	15,52	16,16
NVC4	1	10,65**	6,28**	8,08**	0,95	0,92	0,87	48,93
NVC4	2	38,89**	12,75**	2,13	0,99	0,96	2,13	30,46
NVC3	1	24,54**	0,58	1,31	0,98	0,00	24,11	20,23
NVC3	2	37,64**	9,07**	5,05**	0,99	0,94	31,84	15,69
NVC2	1	94,45**	10,95**	13,81**	0,99	0,95	15,79	13,25
NVC2	2	142,2**	3,48*	4,65**	1,00	0,84	20,15	15,21
NVC1	1	13,97**	6,81**	2,44*	0,96	0,92	4,37	35,38
NVC1	2	7,02**	2,04	1,08	0,93	0,71	3,46	50,85
NVT	1	57,17**	1,22	2,32*	0,99	0,42	45,28	14,64
NVT	2	90,84**	7,69**	3,69**	0,99	0,93	57,58	12,40
NRL	1	28,34**	0,53	2,28	0,98	0,00	2,50	30,97
NRL	2	25,8**	5,73**	1,54	0,98	0,91	2,04	39,11
ACAM	1	491,49**	20,54**	3,27**	1,00	0,98	2,91	9,61
ACAM	2	37,95**	9,46**	4,83**	0,99	0,95	3,33	16,35
H ₂ O ₂ V6	1	34,05**	38,61**	15,63**	0,99	0,99	3,64	12,17
H ₂ O ₂ V6	2	15,19**	8,49**	2,06	0,97	0,94	2,66	9,67
MDAV6	1	16,43**	47,31**	14,7**	0,97	0,99	39,50	4,27
MDAV6	2	20,6**	5,06**	2,92*	0,98	0,90	26,71	9,71
PROV6	1	275,1**	188,56**	171,37**	1,00	1,00	24,17	8,33
PROV6	2	84,01**	9,4**	4,33**	0,99	0,95	15,63	5,31
PTNV6	1	1,22	1,68	1,00	0,43	0,64	69332,69	18,57
PTNV6	2	5,51**	6,24**	1,22	0,90	0,92	80056,20	14,09
H ₂ O ₂ R1	1	0,92	2,6	2,12	0,00	0,78	2,34	12,55
H ₂ O ₂ R1	2	15,82**	3,26*	1,07	0,97	0,83	2,52	10,70
MDAR1	1	62,53**	3,46*	27,46**	0,99	0,84	35,75	6,39
MDAR1	2	27,69**	3,32*	3,1*	0,98	0,84	25,96	10,98
PROR1	1	500,82**	40,46**	23,79**	1,00	0,99	62,16	8,57
PROR1	2	45,11**	8,01**	5,59**	0,99	0,94	5,51	13,59
PTNR1	1	0,31	2,9*	0,99	0,00	0,81	68191,91	17,94
PTNR1	2	1,37	5,95**	0,78	0,52	0,91	80758,57	17,59
ALTV6	1	24,54**	0,22	0,4	0,98	0,00	25,39	8,91
ALTV6	2	3,83*	0,39	1,39	0,86	0,00	25,62	6,10
ALTR1	1	5,27*	0,11	0,85	0,90	0,00	44,86	11,48
ALTR1	2	3,97*	0,23	0,88	0,87	0,00	70,25	7,22
ALTR6	1	1965,75**	8,15**	2,5*	1,00	0,94	102,28	3,29
ALTR6	2	366,71**	3,86*	4,32**	1,00	0,86	116,52	3,66
SPADV6	1	9,28**	0,13	0,46	0,94	0,00	31,16	8,21

SPADV6	2	4,31*	1,37	0,48	0,88	0,52	35,57	6,15
SPADR1	1	42,22**	3,87*	2,11	0,99	0,86	41,54	5,40
SPADR1	2	7,34**	4,33**	1,84	0,93	0,88	38,78	4,74
SPADR6	1	79,93**	0,4	0,76	0,99	0,00	46,80	4,60
SPADR6	2	58,11**	54,78**	2,25	0,99	0,99	46,31	2,70
MFFV6	1	14,82**	6,15**	1,42	0,97	0,92	78,58	12,87
MFFV6	2	9,72**	0,94	1,72	0,95	0,00	77,79	31,24
MFRV6	1	2,64	1,48	0,96	0,79	0,57	20,18	8,17
MFRV6	2	0,80	1,38	1,28	0,00	0,52	10,10	66,20
MSFV6	1	7,72**	2,30	0,85	0,93	0,75	23,28	9,81
MSFV6	2	2,06	0,92	1,67	0,72	0,00	47,52	18,09
MSRV6	1	2,67	1,49	0,37	0,79	0,57	13,26	4,39
MSRV6	2	11,16**	1,33	1,23	0,95	0,50	26,84	14,13
MFFR1	1	0,78	8,19**	8,42**	0,00	0,94	185,65	12,21
MFFR1	2	0,90	3,65*	1,00	0,00	0,85	312,25	27,18
MFRR1	1	6,03**	0,9	2,08	0,91	0,00	24,27	24,68
MFRR1	2	15,37**	0,56	0,58	0,97	0,00	39,25	24,05
MSFR1	1	1,34	1,3	0,74	0,50	0,48	45,37	23,69
MSFR1	2	0,09	2,59	1,96	0,00	0,78	54,74	18,52
MSRR1	1	1,29	0,52	1,42	0,47	0,00	14,76	12,83
MSRR1	2	11,45**	1,58	0,95	0,96	0,61	22,32	8,03
MFFR6	1	27,94**	12,02**	10,88**	0,98	0,96	337,70	22,53
MFFR6	2	24,66**	2,37	0,76	0,98	0,76	597,44	20,82
MFRR6	1	23,11**	15,67**	20,9**	0,98	0,97	39,34	18,98
MFRR6	2	9,29**	0,95	0,61	0,94	0,00	50,27	25,18
MSFR6	1	3,85*	2,98*	5,2**	0,86	0,81	97,26	30,14
MSFR6	2	14,07**	2,26	1,07	0,96	0,75	160,79	22,03
MSRR6	1	6,33**	1,39	1,38	0,92	0,53	21,60	21,70
MSRR6	2	5,86**	1,03	0,41	0,91	0,17	28,00	19,16
PROD	1	84,59**	35,06**	2,16	0,99	0,99	4391,62	8,05
PROD	2	1,80	10,7**	1,87	0,67	0,95	6347,32	6,81
PMG	1	3,35*	49,36**	1,95	0,84	0,99	179,38	3,24
PMG	2	49,28**	14,38**	4,19**	0,99	0,96	200,89	6,46
DPM	1	940,25**	0,07	1,18	1,00	0,00	120,73	1,18
DPM	2	1759,63**	5,79**	0,24	1,00	0,91	117,02	0,93

**Significativo pelo teste scott-Knott ($p < 0,01$); *Significativo pelo teste scott-Knott ($p < 0,05$); ^{ns} Não significativo.

Safras de cultivo: (1) 2022/23; (2) 2023/24.

F cult: F calculado de cultivar; F Trat: F calculado dos tratamentos; F CT: F calculado da interação de cultivares de tratamentos; AC Cult: Acurácia de cultivar; AC Trat: Acurácia de tratamento; Média: média dos das variáveis respostas; CV: Coeficiente de variação.

Fonte: Do autor (2024).

Tabela 2A - Resumo da análise de variância (ANAVA) individuais do experimento de casa de vegetação, realizados no município de Lavras-MG, no ano agrícola de 2022/23.

Variável	Solo	F Cult	F Trat	F CT	AC Cult	AC Trat	Média	CV
ALTR8	Baixa	277,64**	20,99**	3,41**	1,00	0,98	94,11	9,17
ALTR8	Alta	139,25**	21,51**	3,82**	1,00	0,98	58,03	12,09
AIPV	Baixa	55,56**	1,70	1,44	0,99	0,64	14,80	33,32
AIPV	Alta	96,15**	5,2**	3,07**	0,99	0,90	14,26	24,75
NVC4	Baixa	1,60	5,61**	0,69	0,61	0,91	0,79	118,98
NVC4	Alta	20,62**	0,83	0,92	0,98	0,00	1,96	93,57
NVC3	Baixa	74,68**	7,13**	4,06**	0,99	0,93	24,51	22,30
NVC3	Alta	99,26**	29,82**	7,4**	0,99	0,98	27,46	18,01
NVC2	Baixa	91,7**	14,07**	5,46**	0,99	0,96	20,29	23,13
NVC2	Alta	46,04**	11,74**	4,34**	0,99	0,96	19,54	25,61
NVC1	Baixa	0,75	2,64*	1,95	0,00	0,79	2,67	106,78
NVC1	Alta	24,23**	3,67**	3,1**	0,98	0,85	2,24	82,81
NVT	Baixa	175,81**	25,11**	4,5**	1,00	0,98	48,26	14,24
NVT	Alta	138,22**	42,9**	8,6**	1,00	0,99	51,20	14,03
NRL	Baixa	1,02	0,71	1,02	0,15	0,00	4,72	25,46
NRL	Alta	1,82	0,72	2,09*	0,67	0,00	4,71	21,77
ACAM	Baixa	306,88**	26,92**	1,96	1,00	0,98	2,87	15,62
ACAM	Alta	257,79**	24,74**	1,37	1,00	0,98	3,00	16,20
H2O2V6	Baixa	27,96**	47,23**	21,03**	0,98	0,99	3,83	14,65
H2O2V6	Alta	39,98**	47,08**	20,96**	0,99	0,99	3,53	15,92
MDAV6	Baixa	30,26**	93,55**	27,39**	0,98	0,99	39,50	4,46
MDAV6	Alta	45,97**	72,75**	37,51**	0,99	0,99	39,19	4,50
PROV6	Baixa	668,05**	502,95**	432,06**	1,00	1,00	24,44	7,29
PROV6	Alta	627,6**	495,35**	425,53**	1,00	1,00	24,13	7,44
PTNV6	Baixa	21,63**	27,19**	2,27*	0,98	0,98	4248,44	20,87
PTNV6	Alta	32,01**	27,77**	2,3*	0,98	0,98	4549,52	19,61
H2O2R1	Baixa	3,68*	1,43	2,31*	0,85	0,55	2,57	17,92
H2O2R1	Alta	12,47**	1,36	2,2*	0,96	0,51	2,26	20,86
MDAR1	Baixa	121,68**	4,95**	47,7**	1,00	0,89	36,09	6,69
MDAR1	Alta	99,36**	2,42	47,25**	0,99	0,77	35,79	6,87
PROR1	Baixa	418,27**	38,9**	17,36**	1,00	0,99	63,42	12,33
PROR1	Alta	402,43**	42,53**	12,49**	1,00	0,99	62,94	12,92
PTNR1	Baixa	7,75**	24,3**	2,22*	0,93	0,98	4685,18	19,19
PTNR1	Alta	1,56	15,08**	4,4**	0,60	0,97	5411,78	16,35
ALTV6	Baixa	42,98**	5,19**	3,11**	0,99	0,90	56,72	22,34
ALTV6	Alta	14,68**	3,35*	0,94	0,97	0,84	36,14	11,16
ALTR1	Baixa	22,27**	5,64**	2,69*	0,98	0,91	82,22	27,79
ALTR1	Alta	67,66**	19,27**	1,77	0,99	0,97	57,94	13,66
ALTR6	Baixa	25,34**	3,13*	1,24	0,98	0,83	87,59	28,68
ALTR6	Alta	110,55**	15,15**	3,2**	1,00	0,97	61,01	11,99
SPADV6	Baixa	38,79**	11,76**	6,75**	0,99	0,96	37,06	4,34

SPADV6	Alta	7,09**	10,99**	1,18	0,93	0,95	35,98	7,36
SPADR1	Baixa	8,52**	4,4**	4,01**	0,94	0,88	42,15	8,13
SPADR1	Alta	10,79**	21,65**	1,95	0,95	0,98	42,25	7,82
SPADR6	Baixa	23,1**	7,5**	5,2**	0,98	0,93	36,29	10,41
SPADR6	Alta	79,62**	5,26**	3,85**	0,99	0,90	35,99	12,37
PESOG	Baixa	144,49**	16,92**	3,33**	1,00	0,97	18,70	15,91
PESOG	Alta	101,31**	50,51**	8,08**	1,00	0,99	23,72	13,16
DPM	Baixa	357,36**	13,67**	1,17	1,00	0,96	123,18	1,28
DPM	Alta	2272,51**	18,04**	0,35	1,00	0,97	108,44	1,53

**Significativo pelo teste scott-Knott ($p < 0,01$); *Significativo pelo teste scott-Knott ($p < 0,05$); ^{ns} Não significativo.

Condições de fertilidade do solo: Alta fertilidade e Baixa fertilidade.

F cult: F calculado de cultivar; F Trat: F calculado dos tratamentos; F CT: F calculado da interação de cultivares de tratamentos; AC Cult: Acurácia de cultivar; AC Trat: Acurácia de tratamento; Média: média dos das variáveis respostas; CV: Coeficiente de variação.

Fonte: Do autor (2024).