

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (UNESP)
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
CAMPUS DE DRACENA**

Franco Monici Fabrino

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO AGRÔNOMICO DE
VARIEDADES DE FEIJÃO ADUBADAS COM ENXOFRE
ELEMENTAR E BIOFORTIFICADAS COM MACRO E
MICRONUTRIENTES, AVALIADAS POR MEIO DE
FENOTIPAGEM DE ALTO RENDIMENTO COM DRONE
ALIADO À METODOLOGIA DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL**

Dracena – São Paulo

2024

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (UNESP)
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
CAMPUS DE DRACENA**

Franco Monici Fabrino

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO AGRONÔMICO DE
VARIEDADES DE FEIJÃO ADUBADAS COM ENXOFRE
ELEMENTAR E BIOFORTIFICADAS COM MACRO E
MICRONUTRIENTES, AVALIADAS POR MEIO DE
FENOTIPAGEM DE ALTO RENDIMENTO COM DRONE
ALIADO À METODOLOGIA DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado à Faculdade de Ciências
Agrárias e Tecnológicas - FCAT– Unesp,
Câmpus de Dracena, como parte das
exigências para obtenção do título de
Engenheiro Agrônomo.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Simões Tomaz

Coorientador: Prof. Dr. Ronaldo Cintra Lima

Dracena – São Paulo

2024

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Dracena



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JULIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
UNESP – CÂMPUS DE DRACENA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título: "Avaliação desempenho agrônômico de variedades de feijão adubadas com enxofre elementar e biofortificadas com macro e micronutrientes, avaliadas por meio de fenotipagem de alto rendimento com drone aliado à metodologia de Inteligência Artificial"

Modalidade: Trabalho de **Atividades de pesquisa**

Autor: Franco Monici Fabrino

Orientador (a): Dr. Rafael Simões Tomaz

Co-orientador(es): Dr. Ronaldo Cintra Lima

Número de Créditos: 12

Data da aprovação e correção de acordo com as sugestões da Banca: 07/06/2024


Dr. Rafael S. Tomaz


Dr. Evandro P. Prado


Dr. Vagner do Nascimento

Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas – CCG-EA
Rod. Cmt. João Ribeiro de Barros, km 651- Bairro das Antas – CEP: 17900-000 – Dracena/SP - Brasil
Tel. (18) 3821-8200 – www.dracena.unesp.br – ccgea.dracena@unesp.br

DEDICATÓRIA

À minha família, por sua capacidade de acreditar em mim e investir em mim. Mãe, seu cuidado e dedicação foi que deram, em alguns momentos, a esperança para seguir. Pai, sua presença significou segurança e certeza de que não estou sozinho nessa caminhada. Vô, é por você que cheguei até aqui, mas infelizmente não poderei compartilhar esta vitória com o senhor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço todo o apoio, fomento e incentivo Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo - Código de Financiamento 2022/15899-8, pela concessão da bolsa de estudos para a condução da pesquisa científica.

Agradeço a Deus por sempre abençoar toda a minha família e os livrar de qualquer mal durante os anos de graduação longe de casa.

Agradeço imensamente todos os docentes, técnicos e funcionários da Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas – FCAT Unesp – Dracena-SP, por contribuírem para a minha formação Acadêmica. Em especial aos meus orientadores Prof. Dr. Rafael Simões Tomaz e Ronaldo Cintra Lima. Por sempre me incentivarem durante os anos de graduação e me incentivarem a participar de projetos de pesquisas desenvolvidos.

Aos meus amigos, sem o apoio de todos vocês durante todos esses anos, tudo seria muito mais difícil sem seus apoios.

“Prove que é competente, e vão querer lhe dar maiores responsabilidades. Prove que tem comprometimento, e vão querer investir em você. Prove que é compatível, e vão querer trabalhar ao seu lado.” (GORICK, 2022).

RESUMO

PROJETO DE PESQUISA: Avaliação desempenho agronômico de variedades de feijão adubados com enxofre elementar e biofortificados com macro e micronutrientes, avaliados por meio de fenotipagem de alto rendimento com drone aliado à metodologia de Inteligência Artificial

RESUMO: O feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é um dos alimentos mais utilizados culinária brasileira, muito por conta de seu alto teor de proteína contido em seus grãos, além da presença de nutrientes essenciais na sua composição. A adoção de tecnologias, a citar, o uso de variedades melhoradas, a biofortificação, a adoção da adubação sulfatada, aliado ainda a tecnologia de análise como a fenotipagem de alto rendimento por meio de drones e o uso de inteligência artificial na análise de dados tem permitido nos últimos anos um aumento na produtividade da cultura. Com o intuito de avaliar os fatores citados no desenvolvimento de produtividade da cultura do feijão, será realizado, um experimento em delineamento de blocos casualizados, com três repetições, em esquema fatorial duplo 4x4, considerando, quatro variedades e quatro níveis de aplicação de produtos na lavoura. O experimento foi implantado na área experimental irrigada do FCAT UNESP – Campus de Dracena. Foram avaliadas características agronômicas de desenvolvimento da cultura, e atributos de produtividade. Adicionalmente, foi realizada fenotipagem de alto rendimento com um drone Mavic 2 Pro. Voos periódicos foram realizados na cultura com o intuito de coletar imagens e realizar a associação destas com as características agronômicas mensuradas, fazendo uso de método de Inteligência Artificial (Redes Neurais artificiais).

Palavras-chave: *Phaseolus vulgaris* L., Inteligência Artificial, Biometria.

ABSTRACT

RESEARCH PROJECT: Assessment of agronomic performance of bean varieties fertilized with elemental sulfur and biofortified with macro and micronutrients, evaluated through high-performance phenotyping with a drone combined with Artificial Intelligence methodology

ABSTRACT: Common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) are one of the most used foods in Brazilian cuisine, largely due to their high protein content contained in their grains, in addition to the presence of essential nutrients in their composition. The adoption of technologies, such as the use of improved varieties, biofortification, the adoption of sulfate fertilization, combined with analysis technology such as high-throughput phenotyping using drones and the use of artificial intelligence in data analysis has In recent years, an increase in crop productivity has been allowed. In order to evaluate the factors mentioned in the development of bean crop productivity, an experiment will be carried out in a randomized block design, with three replications, in a 4x4 double factorial scheme, considering four varieties and four levels of application of products in the agriculture. The experiment was implemented in the irrigated experimental area of FCAT UNESP – Dracena Campus. Agronomic characteristics of crop development and productivity attributes were evaluated. Additionally, high-throughput phenotyping was carried out with a Mavic 2 Pro drone. Periodic flights were carried out in the crop with the aim of collecting images and associating them with the agronomic characteristics measured, using Artificial Intelligence method (Artificial Neural Networks).

Keywords: *Phaseolus vulgaris* L., Artificial Intelligence, Biometrics.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Dessecação da <i>Urochloa ruziziensis</i> .	26
FIGURA 2: Sementes tratadas com STANDAKTOP®, apresentando boa cobertura das sementes com o produto químico.	27
FIGURA 3: (A) Plântulas de feijão com 7 dias após a semeadura. (B) Avaliação do desenvolvimento inicial da lavoura, avaliação do stand de plantas e monitoramento de pragas, doenças e plantas daninhas.	28
FIGURA 4: Comparação visual de plantas em estágio vegetativo V4, quando submetidos a dose 1 (80Kg/ha) e dose 2 (0Kg/ha) de S.	Erro! Indicador não definido.
FIGURA 5: Aplicação do protocolo de biofortificação e controle de pragas da cultura.	30
FIGURA 6: Retirada de impurezas pós debulha dos grãos e aferição do teor de umidade.	30
FIGURA 7: Resultado do teste de comparação de médias para o fator tratamento.	33
FIGURA 8: Resultado do teste de comparação de médias para a característica MMG (g). Letras maiúsculas comparam níveis de Tratamento dentro das variedades; e letras minúsculas, Variedades dentro de um mesmo Tratamento.	35
FIGURA 9: Gráfico para as médias para a características de Massa de Mil Grãos (MMG) quando submetidas a diferentes doses de Enxofre.	37
FIGURA 10: Gráfico de médias para a características de Massa de Mil Grãos (MMG) quando submetidas ou não submetidas ao protocolo de biofortificação.	38
FIGURA 11: Resultado do teste de comparação de médias para a característica PG (kg/ha-1). Letras maiúsculas comparam níveis de Tratamento dentro das variedades; e letras minúsculas, Variedades dentro de um mesmo Tratamento.	39
FIGURA 12: Gráfico de comparação de médias da interação enxofre x biofortificação para a característica de Produtividade (Kg/ha).	41
FIGURA 13: Gráfico de comparação de médias da interação biofortificação x cultivares para a característica de Produtividade (Kg/ha).	42
FIGURA 14: Ortomosaico criado a partir de 125 fotografias obtidas de vôo realizado em 21/10/2022.	43
FIGURA 15: ANN do tipo PMC para predição da produtividade das variedades de feijão utilizadas no experimento da safra 2022.	43
FIGURA 16: Gráfico de dispersão entre as estimativas dos valores reais e os valores preditos gerados pela melhor ANN. Os pontos pretos constituem estimativas utilizadas na população de treinamento da ANN, e os vermelhos, na população de teste.	45

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: <i>Análise química do solo (macronutrientes)</i>	24
TABELA 2: <i>Análise química do solo (micronutrientes)</i>	24
TABELA 3: <i>Resumo das concentrações de nutrientes envolvidos na biofortificação</i>	29
TABELA 4: <i>Resumo das concentrações de nutrientes envolvidos na biofortificação</i>	29
TABELA 5: <i>Resumo das concentrações de nutrientes envolvidos na biofortificação</i>	29
TABELA 6: <i>Resumo da ANOVA para as características avaliadas para considerando dos fatores Tratamento Foliar e o fator Variedade de feijão comum</i>	33
TABELA 7: <i>Métricas das etapas de treinamento da melhor ANN construída para predição da produtividade</i>	44

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	14
2.1. <i>A cultura do feijoeiro</i>	14
2.2. <i>Adubação sulfatada com enxofre elementar na cultura do feijoeiro</i>	16
2.3. <i>Biofortificação na cultura do feijoeiro</i>	19
2.4. <i>Fenotipagem de alto rendimento com Drone no feijoeiro</i>	20
2.5. <i>Redes Neurais Artificiais (ANN)</i>	21
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	24
3.1.1. <i>Área experimental, material genético e características avaliadas</i>	24
3.1.2. <i>Predição de Valor Genético – Método REML-BLUP</i>	31
3.1.3. <i>Fenotipagem de alto Rendimento e análise por ANN</i>	31
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1. <i>Safra de inverno – ano de 2022</i>	33
4.2. <i>Fenotipagem de alto rendimento</i>	42
5. CONCLUSÕES	46
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47

1. INTRODUÇÃO

A cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) é um alimento muito utilizado na culinária brasileira, muito por conta de seu alto teor de proteína contido em seus grãos, além de outros importantes nutrientes essenciais. O feijão uma planta dicotiledônea, pertence à família das Fabaceas, autógama e anual, tendo origem no continente americano (PEREIRA et al., 2020; SILVA e COSTA, 2003). Presente em todas as regiões do país devido sua boa adaptação ao clima brasileiro, o cultivo de várias espécies em climas tropicais promove uma combinação ideal para o estabelecimento e produção agrícola. O ciclo de vida do feijoeiro pode variar de 70 a 110 dias (ALBUQUERQUE & SILVA, 2008; HARVEY et al., 2013; FRASCA, 2019).

O Brasil possui três épocas distintas de plantio de feijão, favorecendo assim uma oferta constante do produto ao longo do ano. Dessa forma, tem-se o feijão de primeira safra, semeado entre agosto e dezembro, o de segunda safra, cultivado entre janeiro e abril, e o de terceira safra, semeado de maio a julho (CONAB, 2024).

Segundo dados da Conab, (2024) o Brasil é um dos maiores produtores e consumidores de feijão, apresentando cerca de 2.866,5 mil ha ocupados com a cultura do feijão, com produção de 3.325,7 mil toneladas e produtividade média de 1.160 Kg/ha.

A baixa adoção de tecnologias nas lavouras de feijão está diretamente aliada a baixa produtividade. Uma das tecnologias que devem ser mais exploradas para a cultura é o uso da adubação sulfatada e a biofortificação. Plantas que apresentam deficiência nutricional de enxofre, demonstram efeitos deletérios em seu metabolismo, podendo ocasionar a quebra da síntese de proteína uma vez que este elemento faz parte de dois aminoácidos essenciais sendo eles a cistina e a metionina, são responsáveis pela formação das pontes de enxofre contribuindo para a formação da estrutura terciária das proteínas, quando ocorre a quebra desta síntese de proteínas pode ocorrer um menor crescimento radicular destas plantas afetadas na qual irá diminuir a exploração das raízes no solo, além de diminuir os teores de clorofila afetando o processo fotossintético (RAIJ, 2011; MALAVOLTA; MORAES, 2007).

Segundo Vitti, Otto e Savieto (2015) o enxofre também podem exercer funções essenciais no desenvolvimento e na qualidade das plantas, no controle

hormonal, fotossíntese e mecanismos de defesa da planta contra patógenos. Para uma boa produtividade do feijoeiro é de extrema importância um bom entendimento e manejo da relação solo-planta, uma vez que se não ocorrer um manejo adequado pode acarretar no comprometimento do rendimento de grãos da cultura. Visando alcançar o teto produtivo uma das técnicas que devem ser empregadas é uma boa nutrição de plantas em especial a adoção da biofortificação destas plantas.

A biofortificação é uma técnica que induz o enriquecimento nutricional de alimentos produzidos a campo, podendo ocorrer a partir do processo de melhoramento genético ou através da adoção de técnicas de nutrição mineral de plantas e da correção de solo, sendo esse processo é denominado de biofortificação agrônômica (VERGUTZ, 2016).

Tendo em vista o exposto, visamos avaliar variedades de feijão, sob condições de adubação sulfatada, avaliados sob tratamentos visando biofortificação. Utilizando tecnologias de análise da cultura, como, método de análise com Redes Neurais Artificiais, e fenotipagem de alto rendimento com drone, visando associar imagens dos diversos estádios fenológicos da lavoura, com o desempenho agrônômico das cultivares.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. A cultura do feijoeiro

O feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) é um importante alimento para a população brasileira comumente utilizado na culinária. Desde os primórdios da história do País o feijão está inserido na dieta por conter altos teores de proteína, magnésio, potássio, fibras, carboidratos complexos, ácido fólico (fonte de vitamina B) e, em especial, ferro (Fe) e zinco (Zn), nutrientes auxiliares da prevenção de anemia e do fortalecimento do sistema imunológico (PEREIRA et al., 2020).

De acordo com Silva e Costa (2003), o feijão comum é uma planta pertencente à família das Fabaceas, com origem o continente americano. Além disso, é considerada uma planta dicotiledônea, autógama e anual. Sua germinação pode ser epígea ou hipógea, podendo ter crescimento determinado ou indeterminado, apresentando caule com coloração verde, podendo haver pilosidades. Seu fruto pode ser arqueado e recurvado com diferentes cores em seu estágio de maturação. De acordo com Frasca (2019), o feijoeiro possui um ciclo de vida que pode variar de 70 a 110 dias. O seu ciclo de vida é dividido em Estádio vegetativo (V) possuindo os estádios V0, V1, V2, V3, e V4, e o estágio reprodutivo (R), R5, R6, R7, R8 e R9.

Essa cultura está presente em todas as regiões do Brasil por ter uma boa adaptação climática. Sob condições de clima tropical, a diversidade dos ecossistemas promove uma combinação de solos e condições climáticas que ocasionam o estabelecimento e produção agrícola de diferentes espécies (ALBUQUERQUE e SILVA, 2008; HARVEY et al., 2013).

O cultivo do feijoeiro tem ficado cada vez mais tecnificado, especialmente na terceira época (safra de inverno), em que os agricultores utilizam maior quantidade de insumos visando atingir o potencial produtivo da cultivar. Portanto, tecnologias responsáveis pelo aumento de produtividade como cultivares, bioestimulantes e alternativas de manejo/estratégias de redução de custos de produção são alvos de estudos atuais (NAKAO, 2015).

Para que o cultivo do feijoeiro possa ser rentável ao produtor e suas sementes acessíveis a toda população, é preciso desenvolver tecnologias

de baixo custo, capazes de melhorar os níveis de produtividade dos agricultores (KANEKO et al., 2010).

Segundo o relatório anual da Conab (2022/23), existem três épocas para a semeadura do feijão no Brasil (primeira safra semeado entre agosto e dezembro, o de segunda safra entre janeiro e abril e o de terceira safra, de maio a julho. Ao final da safra de 2020/21 já foram constatados a elevação dos preços deste grão, muito devido aos efeitos abióticos de seca e geada que causaram um decréscimo na produtividade, principalmente nas regiões sul e sudeste, em especial o estado do Paraná. Com o final da colheita da primeira e segunda safra de 2022 os preços voltaram a se estabilizar uma vez que os grãos colhidos nestas safras possuem maior qualidade, e as lavouras são mais produtivas. O Brasil atualmente conta com aproximadamente 2.705,3 mil hectares plantados de feijão-comum com uma produtividade média de 1.457 Kg/ha⁻¹ e uma produção total de 3.066,3 mil toneladas nas três safras (CONAB, 2024). Com tais produtividades, nosso país se qualifica como um dos maiores produtores mundiais de feijão (ASSUNÇÃO et al., 2020).

Devido a ampla adaptação do feijoeiro a cultura vem sendo cada vez mais procurada para o cultivo em grandes lavouras, principalmente na segunda safra em sucessão à soja ou ao milho (CRAVO et al., 2009). O feijão é considerado uma cultura de ciclo curto e apresenta raízes superficiais e pouco agressivas, o que dificulta a busca por nutrientes no solo (FONSECA, 2011).

O teor proteico e a produção são altos, porém, o valor nutritivo da proteína não é satisfatório por apresentar teores baixos de alguns aminoácidos essenciais limitantes (FRANQUEIRA TOLEDO; BRAZACA, 2008). A combinação arroz e feijão se dá porque, o feijão é pobre em aminoácidos sulfurados, e rico em lisina; e o arroz é pobre em lisina e relativamente rico em aminoácidos sulfurados (MESQUITA et al., 2007).

2.2. Adubação sulfatada com enxofre elementar na cultura do feijoeiro.

Uma das grandes problemáticas envolvendo a baixa produtividade de feijão é o baixo uso de tecnologias aplicadas à cultura (FREIRE et al., 2005). Existem, no entanto, alternativas que visam aumentar a produtividade da cultura, como o uso do enxofre (S), o qual é considerado um macroelemento essencial secundário na nutrição de plantas, sendo necessário em quantidades satisfatórias para a manutenção do metabolismo vegetal (MARSCHNER, 2012).

O S é terceiro elemento mais exportado pela cultura, sendo aproximadamente 5,4 a 6,0 kg de S a cada 1000 kg de grão, o que representa cerca de 20% a 25% da quantidade absorvida (OLIVEIRA et al., 2013). As plantas absorvem o S do solo como íon sulfato (SO_4^{2-}) sendo sua principal fonte, a matéria orgânica do solo (RHEINHEIMER et al, 2007).

A maior parte de absorção de enxofre pelas plantas advém da absorção radicular via fluxo de massa (aproximadamente 95% do S absorvido) pelo íon na forma de SO_4^{2-} (MAZID; KHAN; MOHAMED, 2011), (MALAVOLTA, 2006).

O SO_4^{2-} é primeiro ativado em adenosina 5'-fosfossulfato (APS) por reação catalítica com ATP sulfúrilase. O APS pode então ser canalizado para a síntese de cisteína ou usado para a formação de metabólitos secundários. A cisteína pode ser posteriormente convertida em metionina, glutatona e todos os outros metabólitos contendo S reduzido (LONG et al ., 2015 ; MARUYAMA-NAKASHITA, 2017).

Assim em que o SO_4^{2-} é absorvido, inicia-se o processo de redução do ânion a S^{2-} , dando origem a cisteína a partir da condensação O-acetilserina (HELDT; PIECHULLA, 2021; LONG et al., 2015). Onde Heldt; Piechulla (2021), afirmam em suas pesquisas que a cisteína tem extrema importância estrutural e catalíticas de proteínas, uma vez que a ligação os grupos tióis com partes destes aminoácidos forma uma ligação dissulfeto, a qual é extremamente importante para o estabelecimento das estruturas proteicas.

Em outros estudos também publicados por Heldt; Piechulla (2021), mostram que a partir da formação da cisteína, no qual este aminoácido também pode ser precursor da formação de outro aminoácido essencial, a metionina, a qual tem função de metilação de compostos como pode-se citar: ácidos nucleicos, proteínas, carboidratos, lipídeos, membranas, clorofila,

plastoquinona, biotina, poliaminas, entre outros. Os compostos primários de S são complementados por numerosos metabólitos secundários contendo S, muitos dos quais estão envolvidos na defesa contra patógenos (AGHAJANZADEH et al. ., 2014 ; LONG et al ., 2015).

Na forma reduzida, o S é um componente chave de vários grupos protéticos nas proteínas Fe-S, como a ferredoxina, que medeia a transferência de elétrons na cadeia fotossintética de transporte de elétrons (FORIERI et al ., 2013 ; ZHENG & LEUSTEK, 2017).

Em plantas leguminosas, cujos grãos apresentam elevado teor de proteína, tem-se investigado uma forma de aumento de aminoácidos sulfurados, dado sua importância na dieta dos seres-humanos (DURANTI, 2006). Em feijão comum (GLOWACKA et al., 2019) e feijão preto (YADAV; MAHTO; CHAUDHARY, 2018), a concentração de cisteína e metionina nos grãos aumentaram consideravelmente, com o fornecimento de S às plantas. Diante destes resultados, advindos de várias investigações feitas nos últimos 10 anos, pode-se inferir que o fornecimento de S às plantas aumenta a qualidade dos grãos em relação ao conteúdo de aminoácidos sulfurados.

Plantas que apresentam deficiência nutricional de S, demonstram efeitos deletérios em seu metabolismo, podendo ocasionar a quebra da síntese de proteína uma vez que este elemento faz parte de dois aminoácidos essenciais sendo eles a cistina e a metionina, que são responsáveis pela formação das pontes de enxofre contribuindo para a formação da estrutura terciária das proteínas, quando ocorre a quebra desta síntese de proteínas pode ocorrer um menor crescimento radicular destas plantas afetadas, diminuindo a exploração das raízes no solo, além de diminuir os teores de clorofila afetando o processo fotossintético (RAIJ, 2011; MALAVOLTA e MORAES, 2007).

Segundo Vitti; Otto e Savieto (2015) o S também podem exercer funções essenciais no desenvolvimento e na qualidade das plantas, no controle hormonal, fotossíntese e mecanismos de defesa da planta contra patógenos. O enxofre faz parte da composição de coenzimas, como tiamina (B1) e biotina, essenciais para a nutrição humana, bem como da coenzima A (CoA), composto no qual se torna essencial no estágio inicial durante o ciclo de Krebs (respiração celular).

Além dos efeitos fisiológicos já citados acima, um ponto importante para se destacar é a relação entre Enxofre x Fixação Biológica de Nitrogênio, onde plantas que estabelecem relação simbiótica com bactérias fixadoras de N têm maior demanda por S dado seu grande acúmulo nos bacterioides (quase 20 vezes maior que nas plantas) e o fato de sua falta desencadear uma série de efeitos negativos.

Bosse et al. (2021) revisando vários trabalhos sugerem que flavonoides são os mais importantes para o processo de infecção das raízes pelas bactérias. Na rota de síntese destes flavonoides são encontradas moléculas que tem S em sua composição na forma de S-CoA. Sendo assim, a deficiência de S pode ocasionar redução na síntese de flavonoides importantes no processo de infecção da raiz pela bactéria.

Plantas que apresentam deficiência nutricional de S, demonstram efeitos deletérios em seu metabolismo, podendo ocasionar a quebra da síntese de proteína uma vez que este elemento faz parte de dois aminoácidos essenciais sendo eles a cistina e a metionina, são responsáveis pela formação das pontes de enxofre contribuindo para a formação da estrutura terciária das proteínas, quando ocorre a quebra desta síntese de proteínas pode ocorrer um menor crescimento radicular destas plantas afetadas na qual irá diminuir a exploração das raízes no solo, além de diminuir os teores de clorofila afetando o processo fotossintético (RAIJ, 2011; MALAVOLTA e MORAES, 2007). Quando as plantas crescem sob baixa disponibilidade de S, nota-se redução significativa do número e a massa de nódulos (ABIDO, 2018; GETACHEW; ABERA; BEYENE, 2016; SCHERER et al., 2008; SCHERER; LANGE, 1996). Varin et al. (2010) sugeriram que este fato se deu pelo alto acúmulo de aminoácidos ricos em N.

Os sintomas são tipicamente muito semelhantes à clorose geral encontrada em plantas deficientes em N, mas em algumas espécies a clorose interveniente é predominante, semelhante aos sintomas que ocorrem em plantas deficientes em Fe. As diferenças na aparência das folhas não são totalmente compreendidas, mas provavelmente estão relacionadas à extensa conversa cruzada com N e Fe durante a deficiência de S (FORIERI et al., 2017).

Além disso, há diminuição na atividade da nitrogenase (SCHERER, 2008; VARIN et al., 2010), na quantidade de ATP do bacteroide e da mitocôndria dos nódulos (SCHERER et al., 2008), na quantidade de glicose na parte aérea

e na raiz e nos nódulos (PACYNA et al., 2006), na ferredoxina (SCHERER et al., 2006; SCHERER et al., 2008) e na concentração de leghemoglobina no nódulo (PACYNA, 2005). Assim, a carência de S pode proporcionar redução na FBN e, conseqüentemente, na produção de massa seca ou de grãos de leguminosas (CAZZATO et al., 2012a; 2012b; GETACHEW; ABERA; BEYENE, 2016; 2017; HUSSAIN et al., 2011; SCHERER; LANGE, 1996; SCHERER et al., 2006; VARIN et al., 2010). Os compostos primários de S são complementados por numerosos metabólitos secundários contendo S, muitos dos quais estão envolvidos na defesa contra patógenos. A assimilação de sulfato é regulada negativamente quando C ou N são limitantes (LONG *et al.* , 2015 ; KOPRIVA *et al.* , 2019).

A prática da adubação sulfatada que visa o aumento da produtividade das culturas também pode ser considerada como uma técnica de biofortificação agrônômica, dado o aumento destas frações de aminoácidos que são essenciais aos humanos (DURANTI, 2006).

2.3. Biofortificação na cultura do feijoeiro.

A biofortificação agrônômica é uma técnica que visa promover o enriquecimento nutricionais de alimentos produzidos a campo (VERGUTZ, 2016), podendo ocorrer a partir do processo de melhoramento genético ou por meio da adoção de técnicas de nutrição mineral de plantas e da correção de solo.

O processo de biofortificação genética consiste no cruzamento de plantas de mesma espécie selecionadas a partir de características desejáveis. A partir do cruzamento selecionado, são geradas plantas que possuem alimentos mais nutritivos, produtivos e resistentes (LOUREIRO et al, 2018), os quais devem ser identificados visando a obtenção de cultivares melhorados. A biofortificação agrônômica é o processo de enriquecimento nutritivo do solo e das plantas, durante seu período de desenvolvimento, por meio da utilização de adubos minerais. Além da adubação via solo, destacam-se outras técnicas agrônômicas adotadas com o intuito de melhorar o teor de minerais nos cultivares, tais como: rotação de culturas e aplicação de biofertilizantes, seja no tratamento de sementes ou por meio da aplicação foliar (LOUREIRO et al, 2018). O principal objetivo da biofortificação é agregar maiores teores de micronutrientes, tais como

zinco, ferro, iodo, Co, Mo, dentre outros aos alimentos base (SOCCOL, et al, 2021).

Carvalho (2009) e Duarte (2021) elencaram as três principais vantagens da biofortificação dos alimentos: esta constitui uma estratégia sustentável capaz de prover alimentos básicos de melhor qualidade nutricional para as populações carentes; podem auxiliar de maneira significativa na redução de deficiências de micronutrientes em áreas rurais; constitui técnica de relativa fácil implementação de baixo custo, como política social, quando comparado a programas de suplementação e fortificação de alimentos.

2.4. Fenotipagem de alto rendimento com Drone no feijoeiro.

Ultimamente, tem sido realizado o processo de fenotipagem de alto rendimento por meio de análise de imagens, a qual tem sido empregada atualmente em vários programas de melhoramento (CASAGRANDE, 2019).

Com o uso de sensores e câmeras de alta resolução acopladas a aeronaves não tripuladas (principalmente drones). A análise de imagens digitais tem sido usada para mensuração de caracteres morfológicos e fisiológicos em centenas ou milhares de plantas em um curto intervalo de tempo e com baixa exigência em mão de obra (FRITSCHÉ-NETO; BORÉM, 2016; GUAN et al., 2018; HOWARD; JARQUIN, 2019).

A fenotipagem de plantas tem como base o tripé genótipo, o ambiente e o fenótipo. O genótipo é entendido como a constituição genética de organismo, neste caso a planta, considerando-se uma ou mais de uma característica para estudo (SADRAS et al., 2013). O fenótipo, por sua vez, é o conjunto de características da planta, tais como arquitetura, forma, tamanho e cor, resistência à patógenos, tolerância a estresses, produtividade etc.; distinguíveis por inspeção visual direta ou por métodos refinados de análise (Walter et al., 2015). Fenotipagem é o ato de determinar os valores qualitativos ou quantitativos das características em estudo e relacioná-las ao desempenho de um genótipo em determinado ambiente (DHONDT et al., 2013; SOUZA, 2017). No modelo genético básico dado por $F = G + A$, ou fenótipo = genótipo mais ambiente, considera-se ambiente, todo o fator externo, conhecido ou desconhecido que não o genótipo, mas que influencia este, de forma a proporcionar um fenótipo.

A fenotipagem de alto desempenho tem se mostrado uma alternativa promissora, pois apresenta rapidez, alta precisão e baixo custo na obtenção de informações fenotípicas ao decorrer do ciclo da cultura, de modo não destrutivo e em uma grande quantidade de indivíduos (FRITSCHÉ-NETO; BORÉM, 2016; MACIEL et al., 2019). O uso de câmeras de alta resolução, tais como as câmeras 4K de drones utilizados para tais fins, tem sido capazes de permitir avaliar caracteres morfofisiológicos e agronômicos de centenas ou milhares de plantas em um curto intervalo de tempo e com baixa exigência de mão de obra. Tal abordagem tem sido de extrema importância para o melhoramento genético vegetal, visando a seleção de genótipos desejáveis. A seleção por meio da fenotipagem de alto rendimento lança mão de índices espectrais para verificar aos atributos de qualidade / sanidade da lavoura, podendo estes serem associados às características de interesse (FRITSCHÉ-NETO; BORÉM, 2016).

2.5. Redes Neurais Artificiais (ANN).

De acordo com Russell *et al.* (1995) as ANNs – Artificial Neural Networks – ou redes neurais artificiais podem ser interpretadas como um modelo matemático para a representação das operações do cérebro, sendo que os elementos aritméticos da computação representam os neurônios e a rede corresponde à coleção de neurônios interconectados. As ANNs são constituídas de unidades de processamento simples, denominadas neurônio artificial, sendo este composto por: um conjunto de conexões, cada uma delas com um peso; um elemento somatório capaz de somar as informações de entrada; e uma função de ativação com o intuito de restringir a amplitude da resposta, e disparar uma saída associada ao neurônio (BRAGA et al., 2000). O neurônio artificial é a unidade básica de processamento das ANNs (HAYKIN, 2008), sendo uma estrutura projetada para funcionar de forma análoga ao neurônio biológico, apresentando as mesmas características e possuindo a capacidade de adquirir conhecimento.

O termo rede neural, de acordo com Hastie, Tibshirani e Friedman (2008), tem sido utilizado para englobar um grande conjunto de modelos e métodos de aprendizagem que envolvem normalmente modelos estatísticos não lineares. Uma rede neural constitui-se de uma regressão em dois estágios (“two-

stage regression”) ou um modelo de classificação, normalmente representado em um diagrama de rede. Essa categoria de rede pode ser utilizada para modelar uma ou múltiplas variáveis quantitativas, categóricas, ou combinações destas. Özçelik *et al.* (2010) relataram que as ANNs são normalmente referidas como uma caixa preta (“*black-box*”), dado ao fato de seus coeficientes ou pesos não serem interpretáveis, e devido às suas propriedades tais como: a existência de camadas ocultas de neurônios e a utilização de funções não lineares para tratamento da informação. Os autores ressaltam ainda que, embora na prática a ANN constitua-se de uma metodologia de modelagem matemática, não compreendemos ao certo como elas aprendem a solução de um problema particular, e como elas são capazes de extrapolar conclusões.

A dinâmica de um estudo baseado em ANN exige que, para cada problema, tenhamos que ajustar uma arquitetura de rede com número variável de camadas intermediárias ocultas, com quantidade de neurônios e funções de ativação específicas. Redes dessa natureza são referenciadas como redes neurais artificiais profundas, ou por meio do termo “*Deep Learning*” (GOODFELLOW *et al.*, 2016), o qual, para fim de simplificação, será referenciada no texto simplesmente como ANN. Essas, algumas vezes são bastante simples, mas que dependendo do tipo de problema podem se tornar muito complexas. Sua utilização prática envolve processos de treinamento, aprendizado e validação; devendo-se considerar a arquitetura planejada anteriormente (SILVA *et al.*, 2010). Uma das propriedades que torna as ANNs atraentes é a habilidade de detectar implicitamente relações não lineares dos dados sem a necessidade de especificação prévia de um modelo (MARTINS *et al.*, 2016), diferindo da abordagem por regressão.

Com relação à aplicação das ANNs na cultura do feijão, diversos autores tem relatado sucesso de sua aplicação. Prado (2015) relatou o uso de ANNs como classificadores de índice de doenças por meio da interpretação de características espectrais no feijão comum. Seu objetivo foi realizar a detecção precoce de antracnose e da murcha-de-fusário, por meio de uma variada gama e índices multiespectrais e hiperespectrais. O autor concluiu que o uso de determinados comprimentos de onda, associados a determinados índices espectrais permitiu a detecção precoce das duas doenças da cultura do feijão. Carneiro *et al.* (2018) investigou a respeito da ferramenta da lógica Fuzzy em

estudo de estabilidade e adaptabilidade em feijão comum. Embora a ferramenta não seja uma ANN propriamente dita, ela constitui uma ferramenta de Inteligência Artificial. Os resultados obtidos pelos autores foram bastante promissores com respeito à tomada de decisão, após realizada uma análise comparativa com o método tradicional de Eberhart e Russell (1966). Rosado et al. (2020), descreve o uso de ANN para predição do mérito genético de características de florescimento de cultivares de feijão. Os autores concluíram que as ANNs modeladas apresentaram resultados equivalentes aos proporcionados por metodologia tradicional – BLUP. Outros casos de sucesso da aplicação de ANN na cultura do feijão são descritos na literatura (CARNEIRO et al., 2017).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1.1. Área experimental, material genético e características avaliadas.

O experimento foi conduzido na área experimental irrigada da FCAT UNESP – Campus de Dracena, nas coordenadas geográficas 51°32' Latitude Oeste e 21°29' Longitude Sul, localizada a 396 m de altitude. De acordo com a classificação de Köppen, o clima predominante da região é do tipo Aw, e dados climáticos médios anuais: temperatura 24°C, umidade relativa 64% e precipitação pluvial de 1261 mm/ano.

O solo do local do experimento é classificado como Argissolo Vermelho distrófico com textura arenosa. Foi realizada análise de solo considerando os horizontes 0 – 0,20m e 0,20 – 0,40m visando a correta recomendação da adubação segundo as boas práticas recomendadas para a cultura do feijão (TABELA 1 e 2).

TABELA 1: Análise química do solo (macronutrientes).

AMOSTRAS	pH	M.O.	P	S	Al ³⁺	H+Al	K	Ca	Mg	SB	CTC	V	m	K	Ca	Mg
cm	CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³									%	%	---	% na CTC---	
0-20	6,0	9	23	0	0	10	2,8	24	10	37	47	79	0	6	51	21
20-40	4,9	3	12	1	1	17	2,2	19	3	24	41	59	4	5	46	7

TABELA 2: Análise química do solo (micronutrientes).

AMOSTRAS	BORO	COBRE	FERRO	MANGANÊS	ZINCO
cm					
0-20	0,13	0,8	6	2,6	0,4
20-40	0,15	0,7	7	3,4	0,2

A adubação de base foi de acordo com as recomendações do Boletim 100, aplicado no sulco da semeadura. Foi utilizado o adubo comercial 04-14-08 objetivando 35kg de Nitrogênio, 120Kg de Fósforo e 70Kg de potássio.

Para o experimento, foi utilizadas 4 variedades de feijão: Feijão Pérola; Feijão BRS Estilo; Feijão BRS FC406; Feijão BRS FC401.

A unidade experimental considerada foi constituída de cinco linhas de três metros das quais foram avaliadas as três linhas centrais de três metros. As variedades foram semeadas em sistema plantio direto sob palha de braquiária *Urochloa ruziziensis*, objetivando população final de 10 a 13 plantas por metro. Para preparo do solo, foi utilizada uma semeadora adubadora configurada para plantio direto, composta de 5 linhas de semeadura espaçadas 0,45m entre linhas, equipada haste escarificadora devido ao corte da palhada utilizando o disco de corte estava sendo ineficiente.

Na unidade experimental, foi avaliada a característica: Produtividade de grãos (PG) em kg ha⁻¹. Ainda, em dez plantas tomadas aleatoriamente dentro da unidade experimental, serão avaliadas as características: número de hastes por planta e Massa de mil grãos (g).

As plantas foram colhidas manualmente, secas, e submetidas à degreana mecanicamente com a trilhadora 150 PV da marca Vencedora MaqTron, após a degreana foi realizada a aferição de umidade e posteriormente pesagem e correção dos valores para umidade adequada da cultura.

O manejo e as práticas culturais, como fertilização, controle de insetos e pragas foram realizadas de acordo com as recomendações técnicas para o cultivo de feijão para a região de acordo com Carneiro et al. (2015). Ainda, foi realizado manejo da irrigação baseado na evapotranspiração de referência (ET_o) obtidas a partir da Estação Meteorológica Campbell Scientific CR10X, estimada pelo método de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998) e multiplicado pelo coeficiente da cultura (K_c) das fases fenológicas da cultura. Foi utilizado o sistema de irrigação por aspersão convencional, composto de 2 linhas com 6 aspersores da marca Fabrimar espaçados 12x12 m entre as linhas, lâmina de 7,0 mm/h, PS de 20 mca e turno de rega de 4 dias.

O experimento foi semeado em 01 de agosto de 2022 e instalado em campo sob delineamento de blocos casualizados em esquema fatorial duplo 4x4, com três repetições. Foram considerados os fatores variedades: 4 variedades, já especificadas; e o fator tratamentos da lavoura, com 4 níveis, sendo estes: Testemunha, sem aplicação de insumos adicionais; tratado com protocolo de Biofortificação; tratado com adubação sulfatada com enxofre elementar na dose de 80 kg há⁻¹; e tratado com protocolo de Biofortificação + aplicação de enxofre elementar.

A planta de cobertura utilizada para poder se iniciar o Sistema de Plantio Direto na área experimental foi de braquiária (*Urochloa ruziziensis*) (Figura 1).



FIGURA 1: Dessecação da *Urochloa ruziziensis*.

Três semanas antes da semeadura foi realizada a dessecação da planta de cobertura utilizando o GLIFOSATO NORTOX WG® no qual é um herbicida não seletivo, de ação sistêmica de pós-emergência.

No dia anterior a semeadura foi realizado o tratamento das sementes, foi utilizado o produto comercial STANDAKTOP® no qual sua ação é atuar como fungicida e Inseticida de ação protetora (Piraclostrobina), sistêmico (Tiofanato Metílico) e de contato e ingestão (Fipronil) no qual foram utilizada a dose comercial recomendada pela bula de 200mL de produto comercial a cada 100Kg de semente, foi realizado do modelo *on farm*, ou seja, não houve tratamento industrial das sementes utilizadas, porém o tratamento atingiu um alto padrão de cobertura das sementes garantindo uma boa proteção inicial, visando o controle das principais pragas de início de ciclo do feijoeiro. (FIGURA 2).



FIGURA 2: Sementes tratadas com STANDAKTOP®, apresentando boa cobertura das sementes com o produto químico.

Durante a semana anterior, foi realizado a regulagem da plantadeira visando plantio de 14 sementes/ metro linear, e a regulagem das catracas de adubação com a recomendação e baseada na análise de solo (BOLETIM TÉCNICO 100).

Para a semeadura do experimento foi utilizada uma semeadeira da marca Tatu Marchesam modelo PST4 FLEX SUPREMA a qual conta com sistema pantográfico nas linhas de semente, garantindo o acompanhamento das variações da topografia do solo, permitindo uma deposição de adubo e sementes sempre na profundidade correta, foi utilizada o sistema de “botinha” ou hastes escarificadoras com mínima movimentação do solo e ajuste da profundidade do adubo para que houvesse uma melhor distribuição do fertilizante, a qual foi regulado para poder depositar o fertilizante a aproximadamente de 4-5cm abaixo da semente, para que não houvesse problemas de salinidade muito por conta do cloreto de potássio que fui utilizado na adubação de base.

Após 7 DAS (Dias Após a Semeadura) todas as plântulas já se encontravam emergidas a campo, sendo assim foi iniciado o monitoramento de pragas e doenças na cultura do feijoeiro. E se iniciaram as programações para as adubações de cobertura com Nitrogênio e Potássio. No qual as recomendações utilizadas foram do Boletim Técnico 100 utilizando a classe de resposta alta ao nitrogênio que corresponde a culturas irrigadas; solos arenosos; cultivo após gramíneas, especialmente em sistema plantio direto recém-implantados. Sendo assim as adubações nitrogenadas foram divididas em 3 em

etapas com doses iguais de acordo com os estádios fenológicos da cultura, sendo eles (V3 – abertura da primeira folha trifoliada, V4 – abertura da terceira folha trifoliada e R5 – surgimento dos primeiros botões florais até a abertura das flores), a adubação potássica foi realizada em duas etapas dividindo em partes iguais a dose recomendada segundo os estádios fenológicos de maíois necessidade do nutriente, sendo eles (V3 – abertura da primeira folha trifoliada, V4 – abertura da terceira folha trifoliada).

A aplicação do enxofre elementar foi feita em uma única aplicação logo após a semeadura.

(A)



(B)



FIGURA 3: (A) Plântulas de feijão com 7 dias após a semeadura. (B) Avaliação do desenvolvimento inicial da lavoura, avaliação do stand de plantas e monitoramento de pragas, doenças e plantas daninhas.

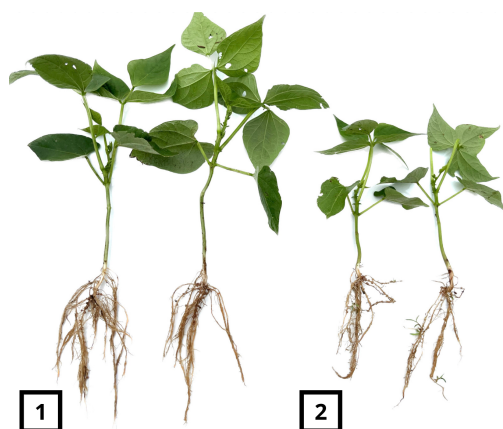


FIGURA 4: Comparação visual de plantas em estágio vegetativo V4, quando submetidos a dose 1 (80Kg/ha) e dose 2 (0Kg/ha) de S.

O protocolo de biofortificação de avaliação envolveu o uso de um combo de produtos, a citar: CoMo Ultra, produto a base de cobalto, molibdênio, e um extrato de algas *Ascophyllum nodosum*; GROWTH, produto a base de potássio e carbono orgânico; e produto Recover Black, produto a base de nitrogênio e carbono orgânico. Os produtos foram aplicados de acordo com recomendação da bula dos respectivos produtos (TABELA 3, 4 e 5).

TABELA 3: Resumo das concentrações de nutrientes envolvidos na biofortificação.

CONCENTRAÇÃO CoMo ULTRA		
NUTRIENTE	% p/p	g/L
Cobalto (Co)	1,0	14,0
Molibdênio (Mo)	10,0	140,0
RECOMENDAÇÃO (FOLIAR) (V4)		300mL/ha

TABELA 4: Resumo das concentrações de nutrientes envolvidos na biofortificação.

CONCENTRAÇÃO RECOVER BLACK		
NUTRIENTE	% p/p	g/L
Nitrogênio (N)	3,0	33,00
Carbono Orgânico Total	22,0	88,00
RECOMENDAÇÃO (FOLIAR)		500mL/ha

TABELA 5: Resumo das concentrações de nutrientes envolvidos na biofortificação.

CONCENTRAÇÃO GROWTH		
NUTRIENTE	% p/p	g/L
Potássio (K)	5,0	56,50
Carbono Orgânico Total	6,0	67,20
RECOMENDAÇÃO (FOLIAR) (V4)		250mL/ha

A aplicação do protocolo de biofortificação ocorreu quando os primeiros botões florais do feijoeiro começaram a ser emitidos, a aplicação foi realizada via pulverizador costal manual, na vazão de 200L/ha (FIGURA 5).

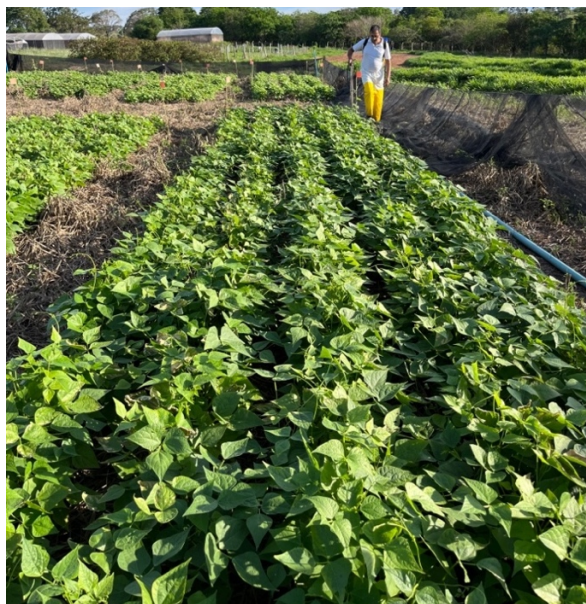


FIGURA 5: Aplicação do protocolo de biofortificação e controle de pragas da cultura.

Ao final do ciclo da cultura foi realizada a dessecação do feijoeiro ocorreu quando todas as plantas atingiram a sua maturação fisiológica plena, evitando o comprometimento e a má formação de estruturas reprodutivas (sementes), visando uma maior uniformidade de colheita, utilizando o produto comercial o GLIFOSATO NORTOX WG®, na dose comercial de 2 L/p.c/ha.

Após a dessecação ocorreu a colheita de forma manual, após a colheita foi feita a debulha das vagens e as avaliações agronômicas já descritas.



FIGURA 6: Retirada de impurezas pós debulha dos grãos e aferição do teor de umidade.

3.1.2. Predição de Valor Genético – Método REML-BLUP

Para predição do valor genético dos cultivares, foi utilizado o software Selegen-REML/BLUP (RESENDE, 2007; RESENDE 2016), por meio do módulo de integração do software GENES (CRUZ, 2013; CRUZ, 2016), considerado o modelo apropriado para cada um dos experimentos.

3.1.3. Fenotipagem de alto Rendimento e análise por ANN

Foi realizada fenotipagem de alto rendimento para aquisição de imagens aéreas com um drone Mavic 2 Pro com sua câmera nativa RGB em 4K 60 fps, capaz de obter imagens de alta qualidade. Dessa forma, foi investigado a aplicabilidade dos principais índices espectrais, realizando a sua associação com as características agrônômicas da cultura. Considerando os índices NGRDI, BGI, GLI, BI e VARI.

A criação dos ortomosaicos foi realizada por meio do aplicativo OpenDroneMap. A análise de dados associadas às imagens coletadas, foram realizadas por meio dos pacotes raster e FIELDimageR (MATIAS et al., 2020), também disponíveis para o software livre R. A associação das imagens das parcelas amostrais com os dados obtidos de produtividade e de biometria da cultura obtidos a campo foram realizadas por meio das ANNs que serão construídas para tal fim.

Para associação dos dados extraídos das imagens, foi ajustada uma Rede Neural Artificial (RNA ou ANN – Artificial Neural Network) do tipo perceptron multicamada, para cada experimento. A respeito da arquitetura da rede, foram utilizadas como covariáveis de entradas, os fatores do experimento, a citar aplicação do tratamento, variedade e bloco; mais as estimativas de média, mediana e desvio padrão dos pixels das camadas Vermelho, Verde e Azul da imagem das parcela experimentais extraídas do orthomosaico; adicionado das mesmas estimativas associadas a cada um dos índices espectrais citados. Dessa forma, foram consideradas, à princípio, 33 informações com covariáveis na camada de entradas. Posteriormente, foram desconsideradas aquelas covariáveis que não apresentaram variação.

Para cada covariável, os dados foram normalizados por meio da função $f(X_i) = \frac{X_i - \min(X_i)}{\max(X_i) - \min(X_i)}$, sendo X_i o valor original da particular covariável de entrada, e $f(X_i)$, o valor normalizado de X_i . Foram utilizados 75% dos valores fenotípicos do experimento no processo de treinamento da ANN e os 25% restantes no processo de validação. A estimação dos pesos da ANN foi realizada em processo iterativo, considerando 100 repetições, sendo salva aquela que proporcionou melhores métricas (RMSE – Root Mean Squared Error), tanto para o conjunto de treinamento, quanto para o conjunto de teste, nesta ordem.

Foi utilizado o algoritmo de treinamento resilient backpropagation e a função de ativação padrão do pacote *neuralnet*, nas camadas intermediárias. Foram consideradas ainda duas camadas ocultas, a primeira com 5 neurônios e a segunda com 4 neurônios, tomados de forma arbitrária; e uma camada de saída, com um neurônio, sendo este associado à característica de produtividade. A modelagem das ANNs está sendo realizada por meio de rotinas de análise no software livre R (R CORE TEAM, 2019), utilizando principalmente o pacote *neuralnet*, disponíveis no repositório “*The Comprehensive R Archive Network*”, além de outros a citar: *AMORE*, *BNN*, *brnn* e *neural*.

A avaliação da eficácia da ANN foi realizada por meio de métricas de ajuste dos valores preditos e observados, a citar: Root Mean Squared Error – RMSE – raiz do erro quadrático médio: $RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}$, e o coeficiente de determinação – R^2 : $R^2 = \frac{\sum(\hat{Y}_i - \bar{Y})}{\sum(Y_i - \bar{Y})}$; sendo Y_i e $\hat{Y}_i$, os valores observado e predito para a parcela experimental, respectivamente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Safra de inverno – ano de 2022

TABELA 6: Resumo da ANOVA para as características avaliadas para considerando dos fatores Tratamento Foliar e o fator Variedade de feijão comum.

FV	GL	QM		
		NH	MMG (g)	PROD (kg/ha)
Tratamento	3	19.500000***	32457.93***	1962033***
Variedade	3	2.3888889	123812.95***	1251433**
Bloco	2	0.5833333	5518.66	1236583**
Interação	9	1.2592593	8698.09*	738102**
Resíduo	30	1.2500000	2864.61	188449
$\bar{x}$		5.0833	766.23	1483
CV(%)		21.99	6.99	29.27

* – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$; *** – $p < 0,001$.

Na Tabela 6 estão apresentados os resultados da análise de variância para as características número de hastes (NH), produtividade (PG) e massa de mil grãos (MMG). Os resultados indicaram significância para o efeito tratamento para a característica número de hastes (NH), e apresenta efeito de interação para as características Produtividade (PG) e Massa de Mil Grãos (MMG).

Ao avaliar de forma isolado o fator Número de Hastes (NH) é possível observar que apresenta diferença estatística quando submetida ao teste de Tukey a 0,01% de significância para o fator tratamento, no qual cada tipo de tratamento apresenta uma resposta distinta (FIGURA 7).

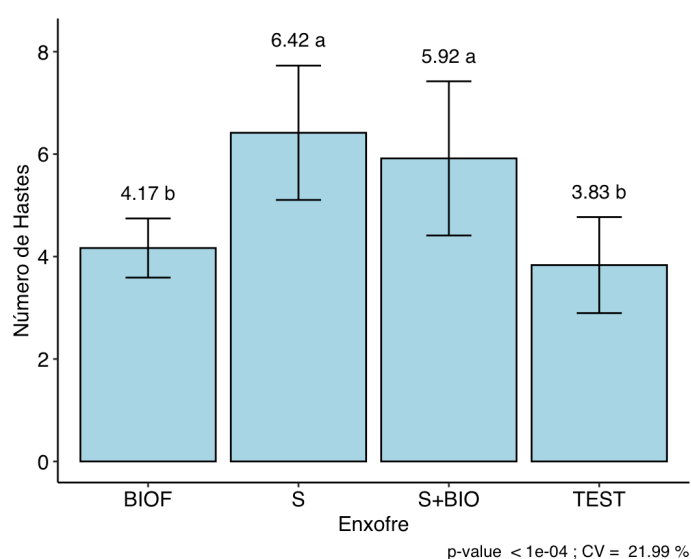


FIGURA 7: Resultado do teste de comparação de médias para o fator tratamento.

Segundo Vitti; Otto e Saviato (2015) o S também podem exercer funções essenciais no desenvolvimento e na qualidade das plantas, no controle hormonal, fotossíntese e mecanismos de defesa da planta contra patógenos.

Além disso, plantas que apresentam deficiência nutricional de S, demonstram efeitos deletérios em seu metabolismo, podendo ocasionar a quebra da síntese de proteína uma vez que este elemento faz parte de dois aminoácidos essenciais sendo eles a cisteína e a metionina, são responsáveis pela formação das pontes de enxofre contribuindo para a formação da estrutura terciária das proteínas, quando ocorre a quebra desta síntese de proteínas pode ocorrer um menor crescimento radicular, além de diminuir os teores de clorofila afetando o processo fotossintético (RAIJ, 2011; MALAVOLTA e MORAES, 2007).

Além dos efeitos fisiológicos já citados acima, um ponto importante para se destacar é a relação entre Enxofre x Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN) no qual as plantas que estabelecem relação simbiótica com bactérias fixadoras de N têm maior demanda por S dado seu grande acúmulo nos bacteróides (quase 20 vezes maior que nas plantas) e o fato de sua falta desencadear uma série de efeitos negativos.

Bosse et al. (2021) revisando vários trabalhos sugerem que flavonóides são os mais importantes para o processo de infecção das raízes pelas bactérias. Na rota de síntese destes flavonóides são encontradas moléculas que tem S em sua composição na forma de S-CoA, de forma que a deficiência de S pode ocasionar redução na síntese destes.

A importância do S para a indução de mecanismos de defesa contra patógenos, principalmente patógenos de início de ciclo até o início do florescimento, período no qual as plantas emitem as suas hastes produtivas. Além disso podemos citar a contribuição do S no processo de FBN e no controle hormonal. Portanto deve-se haver mais estudos e pesquisas para o entendimento da fisiologia de emissão de hastes quando o feijoeiro é submetido a diferentes doses de S.

O resultado do teste de comparação de médias indicou grande variedade de comportamento das variedades em relação aos tratamentos avaliados, para

a característica Massa de Mil Grãos (MMG). As variedades apresentaram comportamento diferentes em relação ao tratamento aplicado. De forma geral, a aplicação do tratamento resultou em aumento na MMG em relação à testemunha. Especificamente na variedade Estilo, somente o nível de tratamento com aplicação de S, mostrou-se superior aos demais níveis de tratamento (FIGURA 8).

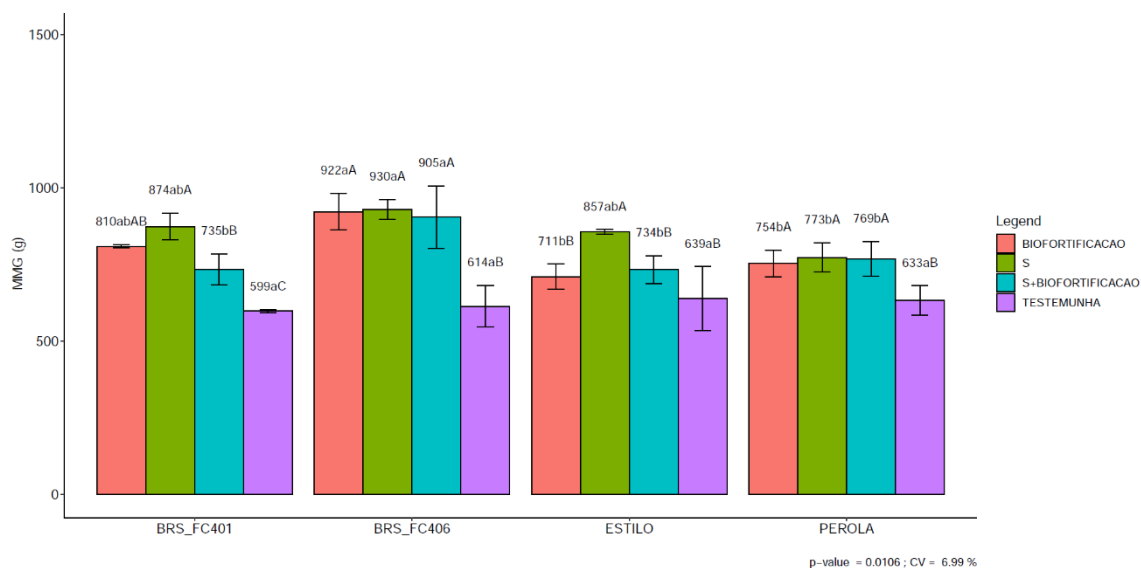


FIGURA 8: Resultado do teste de comparação de médias para a característica MMG (g). Letras maiúsculas comparam níveis de Tratamento dentro das variedades; e letras minúsculas, Variedades dentro de um mesmo Tratamento.

Para esta característica, destacou-se ainda a variedade BRS FC406, cujas médias daqueles níveis de fatores de tratamento nos quais foram aplicados S, Protocolo de Biofortificação com micronutrientes, ou ambos, diferiram significativamente da testemunha com média de MMG de 919g; considerado alto, se comparado com as demais.

Tais resultados implicam que dependendo da variedade, a aplicação generalizada de tais produtos (S e micronutrientes), não necessariamente conduzem ao aumento desejado desta característica, uma vez que existe efeito de interação. Isso implica que dependendo da variedade, pode ocorrer um efeito de sinergia entre seu respectivo genótipo e o tratamento aplicado, fazendo com que se aumente significativamente a característica MMG.

Para uma melhor compreensão dos dados obtidos no presente trabalho, é válido considerar de forma isolada para cada cultivar e sua resposta para os diferentes tratamentos aplicados, uma vez que cada estes respondem de maneira diferente.

Considerando o cultivar BRS FC 401 fica notadamente a diferença estatística entre todos os tratamentos em razão da resposta deste cultivar, uma vez que o uso da combinação da adubação sulfatada + biofortificação proporcionou os melhores resultados quando comparado com os demais tratamentos.

Já em relação ao cultivar BRS FC 406 a resposta do mesmo, se mostra de forma diversa, uma vez que a aplicação de todos os tratamentos apresenta média estatística iguais entre si, porém se diferenciam da testemunha.

A resposta do cultivar BRS ESTILO se mostra diferente das demais uma vez que somente o uso da adubação sulfatada se mostra estatisticamente eficaz, uma vez que o uso de S + biofortificação, somente biofortificação e a testemunha se mostram estatisticamente iguais.

A resposta obtida pelo cultivar Pérola se assemelha a do cultivar BRS FC 406 uma vez que todos os tratamentos aos quais foram submetidos se mostraram estatisticamente superior a testemunha.

Com base nos resultados obtidos (FIGURA 8), pode-se validar a importância da recomendação de acordo com o cultivar, e não, de forma generalizada se baseando apenas na cultura específica a ser trabalhada.

Em experimentos realizados por Rosa (2016) utilizando a cultura da Soja, cv. BMX-5855RSF, a qual foi submetida ao mesmo tratamento da presente pesquisa, com 80kg/ha de S via Enxofre Elementar. Obteve resultados que corroboram com os presentes resultados. Para MMG o S elementar demonstrou maior ganho na massa de grãos; e número de grãos por vagens mostrou-se superior proporcionando aumento na produtividade final, sendo assim em todos os tratamentos, quando comparado a testemunha.

Em relação as parcelas que receberam o protocolo de biofortificação mostraram uma semelhança em relação a resposta dos tratamentos que receberam diferentes doses de enxofre, onde houve um incremento no MMG em ambos os tratamentos.

Ao avaliar o teste de comparação de média para o tratamento em que as plantas foram submetidas a diferentes doses de Enxofre, é plausível a observação de um incremento na MMG, quando as plantas são submetidas a diferentes doses de S (FIGURA 9).

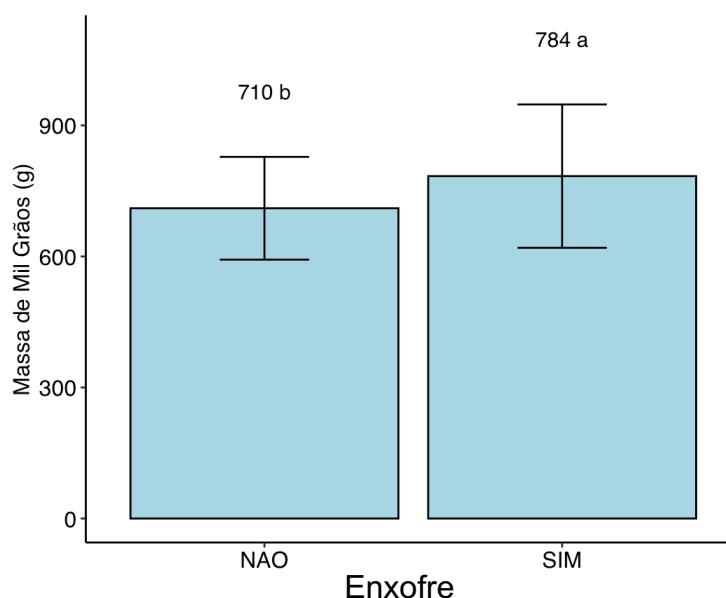


FIGURA 9: Gráfico para as médias para a características de Massa de Mil Grãos (MMG) quando submetidas a diferentes doses de Enxofre.

A deficiência de S provoca uma diminuição na atividade da nitrogenase (SCHERER, 2008; VARIN et al., 2010), na quantidade de ATP do bacteroide e da mitocôndria dos nódulos (SCHERER et al., 2008), na quantidade de glicose na parte aérea e na raiz e nos nódulos (PACYNA et al., 2006), na ferredoxina (SCHERER et al., 2006; SCHERER et al., 2008) e na concentração de leghemoglobina no nódulo (PACYNA, 2005). Assim, a carência de S pode proporcionar redução na FBN e, conseqüentemente, na produção de massa seca ou de grãos de leguminosas (CAZZATO et al., 2012a; 2012b; GETACHEW; ABERA; BEYENE, 2016; 2017; HUSSAIN et al., 2011; SCHERER; LANGE, 1996; SCHERER et al., 2006; VARIN et al., 2010).

Experimentos realizados por Rosa, (2016) utilizando a cultura da Soja, cv. BMX-5855RSF, a qual foi submetida ao mesmo tratamento da presente pesquisa, com 80kg/ha de S via Enxofre Elementar obtiveram resultados que corroboram os presentes resultados. Para MMG o S elementar maior ganho de

massa, além de maior quantidade de grãos por vagens, que se mostrou superior, ambos contribuindo para o aumento na produtividade final.

Segundo o teste de comparação de média foi verificado aumento na massa de mil grãos dos tratamentos submetidos a biofortificação, os quais apresentaram diferença estatística, sendo estes superiores em relação aos não biofortificados (FIGURA 10).

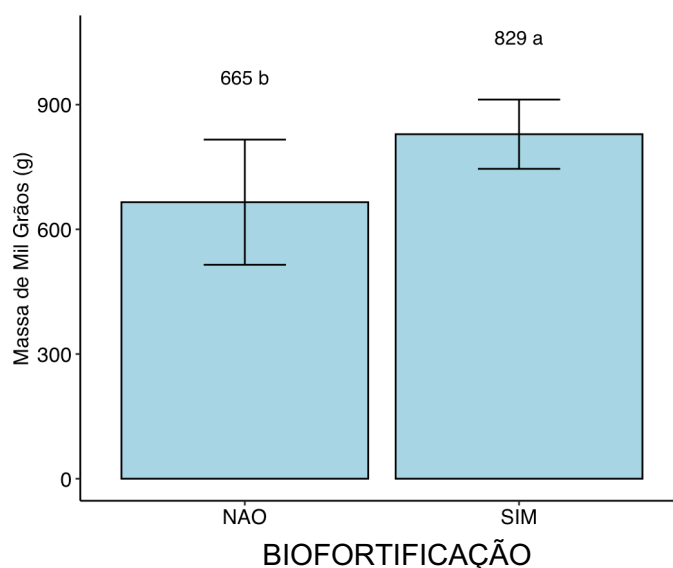


FIGURA 10: Gráfico de médias para a características de Massa de Mil Grãos (MMG) quando submetidas ou não submetidas ao protocolo de biofortificação.

As principais linhas de pesquisa de biofortificação utilizam Zinco e Selênio, porém, no presente estudo foi utilizado Cobalto, Molibdênio, Nitrogênio e Potássio. Uma vez que o molibdênio participa diretamente na fixação biológica de nitrogênio, sendo componente essencial de duas enzimas, nitrogenase e redutase, que são indispensáveis para utilização do nitrato promovendo maior acúmulo de N nas plantas (BERGER, et al., 1996).

O cobalto também tem grande importância na FBN exercendo importante papel em processos metabólicos nos nódulos presentes nas raízes, compondo parte da molécula cobalamina, vitamina B12 (ARAUJO, 2009), atuando também na composição da leghemoglobina, controlando os níveis de oxigênio nos nódulos, de forma que auxilia a enzima nitrogenase, além de compor processos de ativações enzimáticas com participação no metabolismo de carboidratos e proteínas (MARCARELLO, et al., 2012).

Em experimentos realizados por Mendonza, (2021) o autor concluiu que a utilização de inoculante, cobalto e molibdênio no feijoeiro comum, contribuiu para acréscimos nos caracteres agrônômicos da cultura, o que indica que seu desenvolvimento seja superior do que quando não utilizado. O mesmo, no entanto, não se refletiu na produtividade da cultura.

O resultado do teste de comparação de médias para a característica Produtividade (PG) também indicou grande variedade de comportamentos, tanto entre variedades, quanto entre tratamentos avaliados (FIGURA 11).

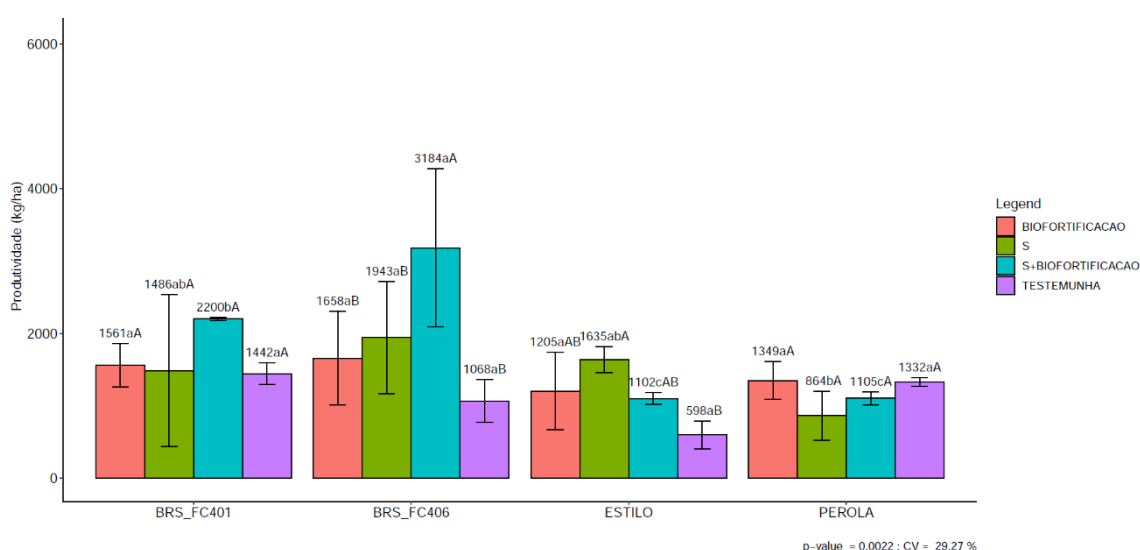


FIGURA 11: Resultado do teste de comparação de médias para a característica PG (kg/ha^{-1}). Letras maiúsculas comparam níveis de Tratamento dentro das variedades; e letras minúsculas, Variedades dentro de um mesmo Tratamento.

Um destaque interessante, foi detectado na variedade BRS FC406, especificamente com o nível de tratamento S + Protocolo de Biofortificação. Esta combinação de níveis de tratamento atingiu produtividade média de 3184 kg/ha , tendo média (A), superior aos demais níveis de tratamento (B) dentro da variedade; e média (a), superior às demais variedades tratamentos com o mesmo tratamento – (b, para BRS FC401, com média de 2200; e c, para as variedades Estilo e Pérola, com médias de 1102 e 1105 kg/ha , respectivamente).

Semelhante à característica anterior, esse nível de tratamento não pode ser recomendado de forma generalizada, devido ao efeito de interação Variedade x Tratamento. Para a variedade Pérola, por exemplo, os resultados indicaram que ela não foi responsiva a nenhum dos níveis dos tratamentos

(média A), o que implica que sua aplicação somente geraria custos desnecessários.

Ao olhar de forma isolada para cada cultivar e suas respostas de acordo com os tratamentos aos quais foram submetidos, podemos analisar que:

Os cultivares BRS FC 401 e BRS FC 406 apresentaram as melhores médias de produtividade quando submetidos a adubação sulfatada via enxofre elementar com 80Kg/ ha e Biofortificação, porém apenas o cultivar BRS FC 406 apresentou diferença estatística quando utilizado o tratamento citado acima. Enquanto o cultivar BRS FC 401 não apresentou diferença estatística entre os tratamentos.

O cultivar BRS ESTILO, apresenta uma resposta diferente dentre os cultivares avaliados, onde apenas o tratamento com adubação sulfatada apresenta diferença estatística, enquanto somente a biofortificação isolada e a combinação S + biofortificação apresenta médias estatísticas iguais, e a testemunha mostra-se estatisticamente inferior aos demais tratamentos.

Com o cultivar Pérola não apresenta significância em nenhum dos tratamentos em relação a testemunha, sendo assim, não se diferem estatisticamente quando utilizada os tratamentos em relação a testemunha.

Em experimentos realizados por Rosa, (2016) utilizando a cultura da Soja, cv. BMX-5855RSF, a qual foi submetida ao mesmo tratamento da presente pesquisa, com 80kg/ ha de S via Enxofre Elementar. Obteve resultados que corroboram com os presentes resultados, onde, a utilização de enxofre S 90, trinta dias antecedente a semeadura proporcionou aumento no peso de sementes de soja e rendimento de grãos em 413 kg há⁻¹ com relação à testemunha.

Já em estudos realizados por BROCH, 2011, diferem dos resultados obtidos no presente estudos, onde o tratamento com enxofre elementar na cultura da soja foi inferior aos demais tratamentos MAP + Sulfurgran, Fosmag 509M6, Gesso agrícola à lanço, Gesso granulado, Sulfurgran e Superfosfato simples) e não diferiu da testemunha, evidenciando ser uma fonte ineficaz de fornecimento deste nutriente à soja. Porém o autor evidencia que, embora possa não haver resposta à aplicação de S em muitas áreas cultivadas pelo Brasil, é preciso ficar atento ao que acontece no solo, em função do S apresentar rápido deslocamento ao longo do perfil em profundidade, dando atenção especial para

que a disponibilidade do elemento não possa se tornar limitante aos próximos cultivos.

Para o teste de comparação de médias entre enxofre x biofortificação é possível concluir que quando não é realizada a biofortificação, porém a adubação sulfatada é realizada é plausível a identificação da diferença estatística para o aumento da produtividade, quando é realizada a biofortificação pode-se observar que efeito da biofortificação x enxofre não sofre diferença estatística (FIGURA 12).

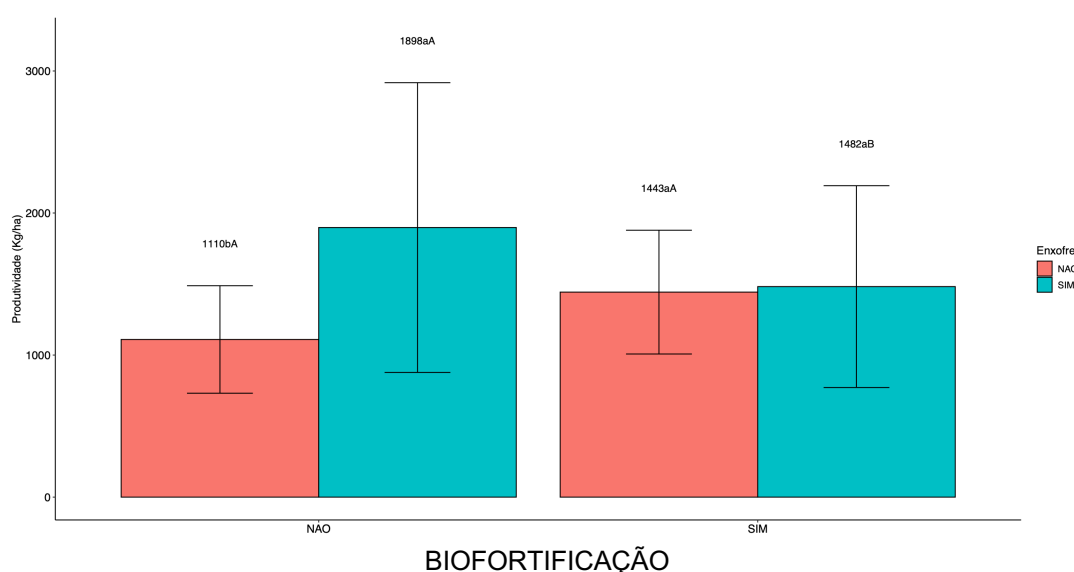


FIGURA 12: Gráfico de comparação de médias da interação enxofre x biofortificação para a característica de Produtividade (Kg/ha).

Novas pesquisas devem ser realizadas neste âmbito, uma vez que existem apenas linhas de pesquisas com os fatores estudados de forma isolada e não em conjunto, para obter maior conhecimento científico da interação fisiológica do enxofre x biofortificação.

O resultado do teste de comparação de médias para a característica Produtividade (Kg/ha) indicou grande variedade de comportamentos das variedades em relação a adubação sulfatada, onde pode-se observar que os cultivares avaliados, exceto o cultivar Pérola apresentam respostas positivas em relação a produtividade alcançada (FIGURA 13).

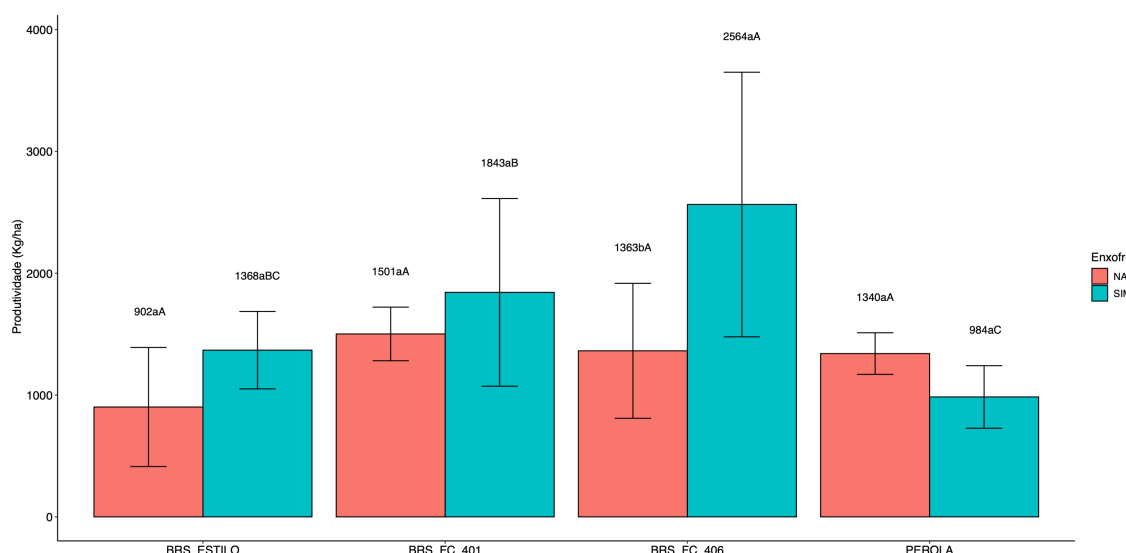


FIGURA 13: Gráfico de comparação de médias da interação biofortificação x cultivares para a característica de Produtividade (Kg/ha).

Em estudos realizados por Furtini Neto, (2000) obtiveram resultados que corroboram com os resultados desta presente pesquisa, o autor conclui que, existe variabilidade genética no feijoeiro que pode ser explorada no melhoramento e seleção de cultivares mais eficientes visando ao seu cultivo em condições distintas de fertilidade do solo em relação ao enxofre.

Crusciol, (2006) e colaboradores apresentam resultados, aos quais se alinham com os resultados obtidos, e concluem que em lavouras com alto nível tecnológico, o incremento na produtividade de grãos de feijão pode estar sendo limitado pela utilização de doses insuficientes de enxofre.

4.2. Fenotipagem de alto rendimento.

Para a análise de fenotipagem de alto rendimento, foram consideradas 125 fotografias capturadas pelo drone. Na Figura 14 está apresentado o orthomosaico cujos resultados das análises apresentaram resultados mais promissores. Para análise dos orthomosaicos, foram considerados os índices espectrais: NGRDI, BGI, VARI, HI, SI e GLI; utilizando o pacote FIELDImageR para extração da informação.



As informações os índices obtidos das parcelas experimentais foram utilizados para construção de uma rede neural (ANN) do tipo perceptron multicamada (MLP), em processo iterativo. A arquitetura utilizada para construção de ANN está apresentada na Figura 4.

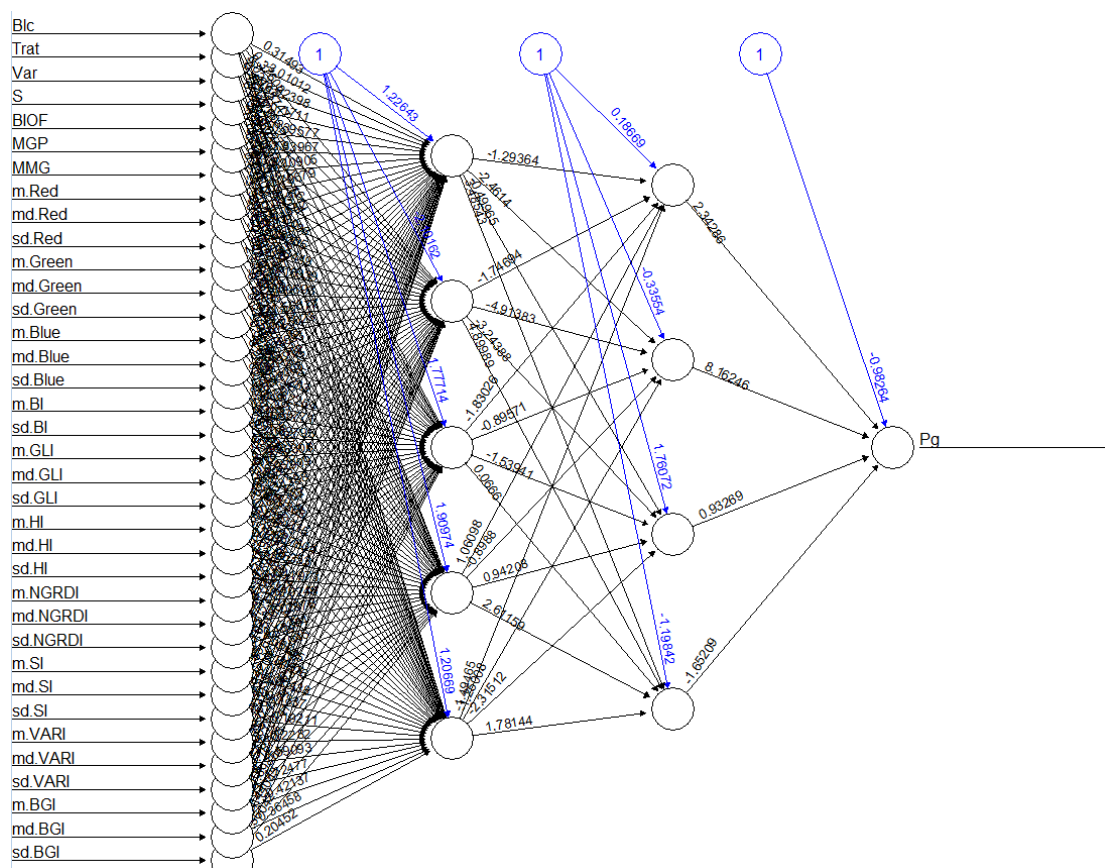


FIGURA 15: ANN do tipo PMC para predição da produtividade das variedades de feijão utilizadas no experimento da safra 2022.

Em processo iterativo, foram construídas 100 ANNs, a partir das quais foi selecionada a melhor com base nas estimativas de RMSE, primeiramente no conjunto de treinamento e posteriormente no conjunto de teste. Na Tabela 7 estão, os parâmetros da melhor ANN, selecionada para estimação da produtividade. O RMSE constitui uma medida de erro e, portanto, quanto menor sua estimativa, melhor tende a ser a ANN. O R^2 , constitui um parâmetro capaz de exemplificar a capacidade de generalização da ANN.

TABELA 7: Métricas das etapas de treinamento da melhor ANN construída para predição da produtividade.

Etapa	Métricas	
Treinamento	RMSE	0,0318
	R^2	0,9698
Teste	RMSE	0,0497
	R^2	0,9334

De acordo com os resultados obtidos, a ANN selecionada foi capaz de prever os dados da produtividade do conjunto de teste, o equivalente a 25% dos dados não utilizados no treinamento com coeficiente de determinação de 93,34%. Os resultados são considerados muito promissores. Normalmente estimativas de 80 a 85% são consideradas satisfatórias, e são obtidas com conjuntos de dados muito maiores. É sabido ainda que quanto maior o conjunto de dados, tais métricas tendem a diminuir, considerando que variação normalmente é inserida no conjunto.

Ainda, estão apresentados na Figura 5 um gráfico de dispersão entre os valores reais, mensurados a campo e os valores preditos pela melhor ANN – os valores estão codificados para facilidade de análise computacional. Quanto mais próximo as estimativas se aproximam da reta a 45° disposta no gráfico, melhor a capacidade preditiva da ANN.

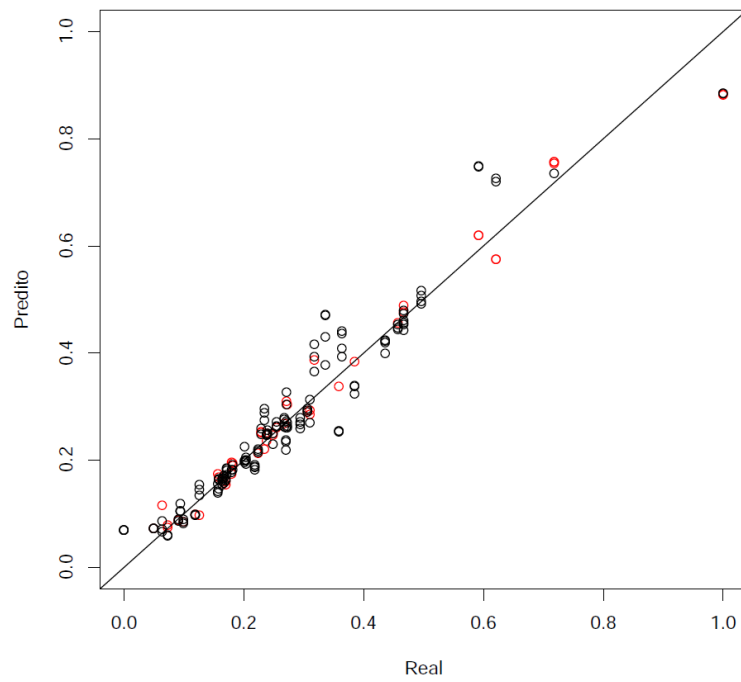


FIGURA 16: Gráfico de dispersão entre as estimativas dos valores reais e os valores preditos gerados pela melhor ANN. Os pontos pretos constituem estimativas utilizadas na população de treinamento da ANN, e os vermelhos, na população de teste.

5. CONCLUSÕES

1. Pode-se concluir que para a característica de NH quando utilizado o S elementar e a combinação de S + Biofortificação, ocorre uma indução de mais hastes reprodutivas nas plantas.

2. A aplicação dos tratamentos resultou em aumento na MMG em relação à testemunha, embora exista um comportamento diferencial dos cultivares em relação aos tratamentos aplicados.

3. Em relação a produtividade os resultados indicaram grande variedade de comportamentos, tanto entre variedades, quanto entre tratamentos avaliados. Recomenda-se, portanto, o uso da cultivar BRS FC 406 utilizando os tratamentos de 80Kg/ha de S e a aplicação do protocolo de biofortificação, devido a sua produtividade de 3.184 Kg/ha.

4. A Rede Neural Artificial a qual foi modelada a partir das métricas obtidas pelas imagens via fenotipagem de alto rendimento com drone apresentaram resultados extremamente satisfatórios, porém deve-se desenvolver mais estudos na mesma linha de pesquisa para o aprimoramento da tecnologia utilizada.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIDO, W. A. E. Impact of phosphorus and sulfur fertilizers levels on soybean productivity impact of phosphorus and sulfur fertilizers levels on soybean productivity. **Journal of Plant Production**, v. 9, n. 12, p. 1223-1230, 2018.

Aghajanzadeh T , Hawkesford MJ , De Kok LJ . 2014 . A importância dos glucosinolatos para armazenamento de enxofre em mudas de Brassicaceae . **Fronteiras na Ciência Vegetal** 5 : 704 .

ALBUQUERQUE, A. C. S.; SILVA, A. G. Agricultura tropical: quatro décadas de inovações tecnológicas, institucionais e políticas. **EMBRAPA**, Brasília, 2008.1340 p. 2008.

Araujo, R.S. Fixação biológica do nitrogênio em feijão. In: Araújo, R.S.; Hungria, M. (Ed.) Microorganismos de importância agrícola. Brasília: **Embrapa-SP**, 1994, 236p

ASSUNÇÃO, A. T. S.; PRIA, M. D.; CHRISTMANN, P. E. T. P.; SCHAFRANSKI, T. Controle de antracnose na cultura do feijão com produtos alternativos em casa de vegetação. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 3, p. 9971-9982, 2020.

Bang, T. C., Husted, S., Laursen, K. H., Persson, D. P., & Schjoerring, J. K. The molecular-physiological functions of mineral macronutrients and their consequences for deficiency symptoms in plants. **New Phytologist**, v. 229, p. 2446-2469, 2021. <https://doi.org/10.1111/nph.17074>

Berger, P. G., Vieira, C., & Geraldo, A. D. A. (1996).Efeitos de doses e épocas de aplicação do molibdênio sobre a cultura do feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 31(7), 473-480.

BOSSE, M. A. et al. Physiological impact of flavonoids on nodulation and ureide metabolism in legume plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 166, p. 512-521, 2021.

BRAGA, A. D. P.; CARVALHO, A. P. L. F.; LUDERMIR, T. B. **Redes neurais artificiais: teoria e aplicações**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2000.

BROCH, Dirceu Luiz et al. Produtividade da soja no cerrado influenciada pelas fontes de enxofre. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, p. 791-796, 2011.

CARNEIRO, J.E.S., T.J. PAULA JÚNIOR, A. BORÉM. **Feijão: Do plantio à colheita**. Ed. UFV, Viçosa, Minas Gerais, Brazil. 2015.

CARNEIRO, V. Q.; PRADO, A. L. D.; CRUZ, C. D.; CARNEIRO, P. C. S.; NASCIMENTO, M.; CARNEIRO, J. E. D. S. Fuzzy control systems for decision-making in cultivars recommendation. **Acta Scientiarum**. Agronomy, v. 40, 2018.

CARNEIRO, V. Q.; SILVA, G.N.; CRUZ, C.D.; CARNEIRO, P.C.S.; NASCIMENTO, M.; CARNEIRO, J.E.S. Artificial neural networks as auxiliary tools for the improvement of bean plant architecture. **GENETICS AND MOLECULAR RESEARCH**, v. 16, p. 16, 2017.

Casagrande, C.R. Associação entre fenotipagem de alto rendimento do dossel e produtividade em soja. **Dissertação de Mestrado**. UFV. 2019.

CAZZATO, E. et al. Influence of sulphur application on protein quality, fatty acid composition and nitrogen fixation of white lupin (*Lupinus albus* L.). **European Food Research and Technology**, v. 235, p. 963-969, 2012a.

CAZZATO, E. et al. Quality, yield and nitrogen fixation of faba bean seeds as affected by sulphur fertilization. **Acta Agriculturae Scandinavica, Section B–Soil & Plant Science**, v. 62, n. 8, p. 732-738, 2012b.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**, Brasília, DF, v. 8, safra 2020/21, n. 5, quinto levantamento, fev. 2021.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**, Brasília, DF, v. 11, safra 2023/24, n. 8 oitavo levantamento, maio 2024.

CRAVO, M. S.; SOUZA, B. D. L.; CUNHA, F. D. R. CAVALCANTE, E. S.; ALVES, J. M. A.; MARINHO, J. T. S.; VIEIRA JÚNIOR, J. R.; GONÇALVES, J. R. P.; FREITAS, A. C. R.; TOMAZETTI, M. A. Sistemas de cultivo. In: ZILLI, J. É.; VILARINHO, A. A.; ALVES, J. M. A. **A cultura do feijão-caupi na Amazônia brasileira**. Embrapa Roraima, 2009. p.59-104.

CRUSCIOL, Carlos Alexandre Costa et al. Aplicação de enxofre em cobertura no feijoeiro em sistema de plantio direto. **Bragantia**, v. 65, p. 459-465, 2006.

CRUZ, C. D. GENES - a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. **Acta Scientiarum**. v.35, n.3, p.271-276, 2013

CRUZ, C.D. Genes Software – extended and integrated with the R, Matlab and Selegen. **Acta Scientiarum**. v.38, n.4, p.547-552, 2016

DE MENDONÇA, Gabriele Gonçalves; TORRES, Francisco Eduardo; CAPRISTO, Denise Prevedel. Inoculação do feijoeiro associada à adubação foliar com Cobalto e Molibdênio. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 15, p. e242101513004-e242101513004, 2021.

DHONDT, S., WUYTS, N., INZÉ, D., 2013. Cell to whole-plant phenotyping: the best is yet to come. **Trends in Plant Science** 18, 428-439.

Dung Tien L , Ha Duc C , Ngoc Quynh L. 2016 . Melhorar a qualidade nutricional das proteínas vegetais através da engenharia genética . **Genômica Atual** 17 : 220-229 .

DURANTI, M. Grain legume proteins and nutraceutical properties. **Fitoterapia**, v. 77, n. 2, p. 67-82, 2006.

EBERHART, S. A., RUSSELL, W. A. (1966). **Stability parameters for comparing varieties**. **Crop Science**, 6(1), 36-40. doi: 10.2135/cropsci1966.0011183X000600010011x

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Embrapa Informação Tecnológica. Feijão: o produtor pergunta, a Embrapa responde. Brasília: **EMBRAPA**, 2003.

FONSECA, G. G. Resposta de cultivares de feijoeiro-comum à inoculação das sementes com duas estirpes de rizóbio em minas gerais. 2011. 166 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Agronomia/fitotecnia, área de Concentração em Produção Vegetal, **Universidade Federal de Lavras**, Lavras, 2011.

Forieri I , Wirtz M , Hell R. 2013 . Rumo a novas perspectivas sobre a interação do metabolismo do ferro e do enxofre nas plantas . **Fronteiras na Ciência das Plantas** 4 : 357 .

FRANQUEIRA TOLEDO, Taís Carolina de; BRAZACA, Solange Guidolin Canniatti. Avaliação química e nutricional do feijão-carioca (*Phaseolus vulgaris* L.) cozido por diferentes métodos. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 28, n. 2, p. 6, 2008.

FRASCA, L. L. M. Bioestimulantes no crescimento e desempenho agrônomo do feijão-comum de ciclo precoce. Dissertação Mestrado. **Universidade Federal de Goiás**, Goiânia, 78 f. 2019.

FREIRE FILHO, F. R.; LIMA, J. A; RIBEIRA, A. Feijão caupi: avanços tecnológicos. Brasília: **Embrapa Informações Tecnológicas**, 2005. 519 p.

FRITSCHÉ-NETO, R.; BORÉM, A. Fenômica: como a fenotipagem de próxima geração está revolucionando o melhoramento de plantas. 1 ed. **Viçosa, MG:UFV**, 2016

FURTINI NETO, ANTONIO EDUARDO et al. Resposta de cultivares de feijoeiro ao enxofre. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 35, p. 567-573, 2000.

GETACHEW, Z.; ABERA, G.; BEYENE, S. Rhizobium inoculation and sulphur fertilizer improved yield, nutrient uptake and protein quality of soybean (Glycine max L. Merrill) varieties on nitisols of assosa área, Western Ethiopia. **African Journal of Plant Science**, v. 11, p. 123-132, 2017.

GETACHEW, Z.; ABERA, G.; BEYENE, S. Sulfur fertilizer and rhizobia inoculation improved soybean (Glycine max L. Merrill) growth performance and N₂ fixation on acidic nitisols of Western Ethiopia. **Ethiopia Journal of Applied Science and Technology**, v. 8, p. 1-11, 2016.

GLOWACKA, A. et al. The response of common bean to sulphur and molybdenum fertilization. **International Journal of Agronomy**, v. 2019, art. 3830712, 2019.

GOODFELLOW, I.; BENGIO, Y.; COURVILLE, A. **Deep learning**: adaptive computation and machine learning. MIT press, 2016.

HARVEY C. A., Chacón, M., Donatti, C. I., Garen, E., Hannah, L., Andrade, A., Wollenberg, E. (2014). Climate-Smart Landscapes: Opportunities and Challenges for Integrating Adaptation and Mitigation in Tropical Agriculture. **A journal of the society for conservation biology**. v.7, n.2, p. 77-90, 2013.

HAYKIN, S. **Neural Networks and Learning Machines**. 3. ed. New York: Prentice Hall, 2008.

HELDT, H. W.; PIECHULLA, B. Plant biochemistry. Cambridge: **Academic Press**, 2021.

HOFFMANN JÚNIOR, L. Substratos para cultivo de feijão e tolerância a alta temperatura do ar no período reprodutivo. 2006. 45 f. Dissertação (Mestrado)

– **Universidade Federal de Santa Maria**, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Santa Maria, 2006.

HOFFMANN JÚNIOR, L.; RIBEIRO, N. D.; ROSA, S. S.; JOST, E.; POERSCH, N. L.; MEDEIROS, S. L. P. Resposta de cultivares de feijão à alta temperatura do ar no período reprodutivo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.37, n.6, p.1543-1548, nov./dez. 2007.

HUSSAIN, K. et al. Soybean growth and nitrogen fixation as affected by sulfur fertilization and inoculation under rainfed conditions in Pakistan. **International Journal of Agriculture & Biology**, v. 13, n. 6, 2011.

Kopriva S , Malagoli M , Takahashi H. 2019 . Nutrição com enxofre: impactos no desenvolvimento das plantas, metabolismo e respostas ao estresse . **Jornal de Botânica Experimental** 70 : 4069-4073 .

Long SR , Kahn M , Seefeldt L , Tsay YF , Kopriva S. 2015 . Nitrogênio e enxofre . In: BB Buchanan , W Gruissem , RL Jones , K Vickers , eds. **Bioquímica e biologia molecular das plantas** . Chichester, West Sussex; Hoboken, NJ : Wiley Blackwell , 711-767 .

LONG, S. R. et al. Nitrogen and sulfur. In: BUCHANAN, B. B.; GRUISSEM, W.; JONES, R. L. (eds.) **Biochemistry & Molecular Biology of Plants**. Rockville: **American Society of Plant Biologists**, 2015.

LOUREIRO, M. P., CUNHA, L. D., NASTARO, B. T., PEREIRA, K. D. S., & NEPOMOCENO, M. D. L. **Biofortificação de alimentos: problema ou solução. Secur. Aliment. Nutr.**, 25 (2), 66 - 84. 2018.

MALAVOLTA, E. Manual de nutrição mineral de plantas. São Paulo: **Agronômica Ceres**, 2006. 638 p.

MALAVOLTA, E.; MORAES, M. F. Fundamentos do nitrogênio e do enxofre na nutrição mineral das plantas cultivadas. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S.; VITTI, G. C. (Ed.). **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira**. Piracicaba: **International Plant Nutrition Institute**, 2007. p. 189-249.

MARTINS, E. R.; BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. G.; BINOTI, D. H.; DUTRA, G. C. Configuração de redes neurais artificiais para estimação do afilamento do fuste de árvores de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, vol. 11, n. 1, pp. 33-38, 2016.

Maruyama-Nakashita A. 2017 . Mudanças metabólicas sustentam a vida das plantas em ambientes com baixo teor de enxofre . **Opinião Atual em Biologia Vegetal** 39 : 144-151 .

MATIAS, F. I.; CARAZA-HARTER, M. V.; ENDELMAN, J. B. FIELDImageR: An R package to analyze orthomosaic images from agricultural field trials. **The Plant Phenome J.** 2020.

MAZID, M.; KHAN, T. A.; MOHAMMAD, F. Response of crop plants under sulphur stress tolerance. **Journal of Stress Physiology & Biochemistry**, v. 7, n. 3, p. 23-57, 2011.

MESQUITA, Fabricio Rivelli; CORREA, Angelita Duarte; ABREU, Celeste Maria Patto de; LIMA, Rafaella Araújo Zambaldi; ABREU, Angela de Fátima Barbosa. Linhagens de Feijão (*Phaseolus Vulgaris* L): Composição química e digestibilidade protéica. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 31, n. 4, p. 1114-1121, 2007. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/215853>. Acesso em: 01 fev. 2024.

OLIVEIRA, D.P. Adubação nitrogenada, inoculação com estirpes de rizóbios e tratamentos fungicidas de sementes em feijoeiro-comum cv. BR SMG Madrepérola. 180f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal). **Universidade Federal de Lavras**, Lavras, MG, 2013.

PACYNA, S; SCHULZ, M.; SCHERER, H. W. Influence of sulphur supply on glucose and ATP concentrations of inoculated broad beans (*Vicia faba minor* L.). **Biology and Fertility of Soils**, v. 42, p. 324-329, 2006.

PACYNA, S. Bedeutung des schwefels für den ferredoxin-und leghämoglobin-gehalt sowie die energieverorgung in n₂-fixierenden leguminosen. 2005. **Tese - University of Bonn, Bonn**, 2005.

PEREIRA, H., de OLIVEIRA, L. F. C., MELO, L., de FARIA, L. C., de AGUIAR, M. S., DEL PELOSO, M. J., ... & BASSINELLO, P. (2020). **Biofortificação feijão-comum. Embrapa Arroz e Feijão-Livro técnico (INFOTECA-E)**.

PRADO, E.V. Uso de características espectrais para detecção precoce da antracnose e murcha-de-fusário em feijoeiro-comum. Tese. **Universidade Federal de Viçosa**. 2015.

RAIJ, B. V. Fertilidade do solo e manejo de nutrientes. Piracicaba-SP: **International Plant Nutrition Institute**, 420p. 2011.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H. QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2ª ed. Instituto Agrônomo de Campinas -IAC.Campinas. 1997. 285p. (Boletim Técnico, 100).

RAMALHO, M.A.P.; PIROLA, L.H.; ABREU, A.F.B. Alternativas na seleção de plantas de feijoeiro com porte ereto e grão tipo carioca. **Pesq Agropec Bras** 33:1989–1998

RHEINHEIMER, D. D. S.; RASCHE, J. W. A.; OSORIO FILHO, B. D.; SILVA, L. S. D. Resposta à aplicação e recuperação de enxofre em cultivos de casa de vegetação em solos com diferentes teores de argila e matéria orgânica. **Ciência Rural**, 37, 363-371. 2007.

ROSA, Juliano Anselmo. **Influência de diferentes épocas de aplicação de enxofre elementar sobre a produtividade de grãos na cultura da soja**. 2016.

ROSADO, R. D. S., CRUZ, C. D., BARILI, L. D., DE SOUZA CARNEIRO, J. E., CARNEIRO, P. C. S., CARNEIRO, V. Q., SILVA, J. T., NASCIMENTO, M. Artificial Neural Networks in the Prediction of Genetic Merit to Flowering Traits in Bean Cultivars. **Agriculture**, 10(12), 638. 2020.

SADRAS, V. O., REBETZKE, G. J., EDMUDE, G. O. The phenotype and the components of phenotypic variance of crop traits. **Field Crops Research** 154, 255-259. 2013.

SCHERER, H. W. et al. Low levels of ferredoxin, ATP and leghemoglobin contribute to limited N₂ fixation of peas (*Pisum sativum* L.) and alfalfa (*Medicago sativa* L.) under S deficiency conditions. **Biology and Fertility of Soils**, v. 44, p. 909-916, 2008.

SCHERER, H. W. et al. Sulphur supply to peas (*Pisum sativum* L.) influences symbiotic N₂ fixation. **Plant, Soil and Environment**, v. 52, n. 2, p. 72-77, 2006

SCHERER, H. W. Impact of sulfur on N₂ fixation of legumes. In: KHAN, N. A.; SINGH, S.; UMAR, S. (eds.). Sulfur assimilation and abiotic stress in plants. **Berlin: Springer-Verlag**, 2008, p. 43-54.

SCHERER, H. W.; LANGE, A. N₂ fixation and growth of legumes as affected by sulphur fertilization. **Biology and Fertility of Soils**, v. 23, p. 449-453, 1996.

SILVA, H. T. COSTA, A. O. Caracterização botânica de espécies silvestres do gênero *Phaseolus* L. (Leguminosae). Santo Antônio de Goiás: **Embrapa Arroz e Feijão**. 40 p. 2003.

SILVA, I. N. D.; SPATTI, D. H.; FLAUZINO, R. A. **Redes neurais artificiais para engenharia e ciências aplicadas**. 1. ed. São Paulo: ArtLiber Editora, 2010.

SOUZA, J. E. B.; BRITO FERREIRA, E. P. (2017). Improving sustainability of common bean production systems by co-inoculating rhizobia and azospirilla. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 237, 250-257.

SUZUKI, K.; TSUKAGUCHI, T.; TAKEDA, H.; EGAWA, Y. Decrease of pollen stainability of green bean at high temperatures and relationship to heat tolerance. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v. 126, n. 5, p. 571-574, 2001.

VARIN, S. et al. How does sulphur availability modify N acquisition of White clover (*Trifolium repens* L.)? **Journal Experimental Botany**, v. 61, p. 225-234, 2010.

VERGÜTZ, L.; LUZ, J. M. R.; SILVA, M. C. S.; KASUYA, M. (2016). Biofortificação de alimentos: saúde ao alcance de todos. **Boletim informativo Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 42, 20-23.

WALTER, A., LIEBISCH, F., HUND, A. Plant phenotyping: from bean weighing to image analysis. **Plant Methods** 11, 14. 2015

YADAV, S. K.; MAHTO, D. K.; CHAUDHARY, S. K. Influenced of different levels and sources of Sulphur on nodulation and quality of Blackgram [*Vigna mungo* (L.) Hepper]. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v. 7, n. 1S, p. 2027-2029, 2018

Zheng ZL , Leustek T. 2017 . Avanços na compreensão da eficiência da utilização do enxofre nas plantas . In: MA Hossain , T Kamiya , DJ Burritt , LSP Tran , T Fujiwara , eds. Eficiência no uso de macronutrientes pelas plantas . Londres, Reino Unido : **Academic Press** , 215-232 .