

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

CAROLINE PATRICIA MENEGAZZI

**EFEITO DA DENSIDADE DE PLANTAS SOBRE CARACTERES AGRONÔMICOS
DE CULTIVARES DE SOJA COM DIFERENTES PADRÕES DE ENGALHAMENTO**

PATO BRANCO

2024

CAROLINE PATRICIA MENEGAZZI

**EFEITO DA DENSIDADE DE PLANTAS SOBRE CARACTERES AGRONÔMICOS
DE CULTIVARES DE SOJA COM DIFERENTES PADRÕES DE ENGALHAMENTO**

**Effect of plant density on agronomic traits of soybean cultivars with different stunting
patterns**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Agronomia – Área de Concentração: Produção Vegetal, do Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Giovani Benin.

PATO BRANCO

2024



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Pato Branco



CAROLINE PATRICIA MENEGAZZI

**EFEITO DA DENSIDADE DE PLANTAS SOBRE CARACTERES AGRONÔMICOS DE CULTIVARES DE SOJA
COM DIFERENTES PADRÕES DE ENGALHAMENTO**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Agronomia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Produção Vegetal.

Data de aprovação: 25 de Março de 2024

Dr. Giovani Benin, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Dra. Aline Silva Freitas, Doutorado - Gdm Genética do Brasil Ltda

Dra. Daniela Meira, Doutorado - Gdm Genética do Brasil Ltda

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 25/03/2024.

Aos meus pais, Rui Pedro e Ildefatima,
com todo o meu amor,
dedico.

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, agradeço a Deus que tem me proporcionado o dom da vida. Aos dias que ao duvidar de mim mesma, me concedeu sabedoria para continuar.

Agradeço imensamente à minha família, meus pais Rui Pedro e Ildéfátima, por acreditarem no meu sonho e por serem exemplo de amor e dedicação à agricultura, aos meus irmãos, Denise Maria, que me ensinou a ler e escrever, e André Luiz, que não mediu esforços para que eu seguisse nos estudos nos anos difíceis e de poucos recursos.

Ao meu orientador, Giovani Benin, por cada orientação e oportunidade desde minha graduação, sendo essencial para a realização e conclusão de mais essa etapa em minha vida.

Aos colegas do Laboratório de Genética e Melhoramento de Trigo e Soja da UTFPR/PB, agradeço ao auxílio na condução deste trabalho e pela paciência de aprenderem junto comigo. Em especial, agradeço a minha amiga e grande responsável pelo meu ingresso no Mestrado, Maiara Cecília Panho, que foi minha companhia por longos meses, com quem compartilhei angústias e alegrias, sendo fundamental do início ao fim deste trabalho.

À GDM Genética do Brasil, que desde meu estágio curricular, tem me guiado na construção de minha carreira profissional e desenvolvimento pessoal. Muito obrigada pelo apoio financeiro para a execução deste projeto, mas principalmente à equipe de Pesquisa Soja Passo Fundo/RS pela condução dos campos experimentais na região Sul do Brasil.

Aos demais parceiros que tornaram a realização deste trabalho possível. À Coopertradição pela concessão da área experimental, disponibilidade de maquinário agrícola e apoio técnico na condução do experimento ao longo da safra 2022/23. Ao Laboratório de Solos UTFPR/PB pela realização das análises químicas. Ao Laboratório de Análises de Sementes UTFPR/PB pela realização dos testes de germinação.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia pela educação de qualidade, gratuita e acessível. Viva a educação pública!

Às profissionais da saúde que me acompanharam ao longo do desenvolvimento deste trabalho, a Psicóloga Ana Luiza Forest e a Psicóloga Giliane Schmitz, muito obrigada.

Por fim, agradeço aos demais colegas, professores, colaboradores e amigos que fizeram parte desta jornada, desde muito antes da Agronomia.

O presente trabalho foi realizado com Apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

*“Tenha fé em Deus, tenha fé na vida.
Tente outra vez”.*
(Raul Seixas)

RESUMO

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é uma das *commodities* agrícolas de maior expressividade econômica no mercado mundial, sendo o Brasil o maior produtor e exportador da cultura. Neste sentido, técnicas de manejo que aumentem a produtividade e reduzam os custos de produção são estratégias para aumentar a eficiência da produção brasileira de grãos. O ajuste na densidade de plantas é uma prática de manejo que pode promover estas melhorias, visto que, a soja apresenta capacidade de compensar o menor número de plantas pela maior produção individual, contudo, esta característica pode ser afetada pelo ambiente. O presente estudo avaliou o comportamento de cultivares de soja com diferentes capacidades de engalhamento quando submetidas a variações na densidade de plantas. O experimento foi conduzido na safra 2022/23, em três locais (Pato Branco/PR, Guarapuava/PR e Abelardo Luz/SC), composto por cinco cultivares de soja (BMX Raio, BMX Zeus, BMX Ativa, DM57152 e BMX Vênus) submetidas a cinco densidades de plantas (-60%, -30%, população ideal, 30% e 60%), com três repetições e em delineamento experimental de blocos ao acaso. Avaliou-se cinco plantas por parcela para determinar rendimento de grãos e os caracteres agronômicos: peso de mil grãos, número de ramos, número de vagens, número de grãos, número de grãos por vagem, número de nós produtivos, altura de planta e distância entrenós, por planta e individualmente para haste principal e ramos. Os dados foram submetidos à análise conjunta trifatorial, analisados através da análise de variância pelo teste F ($\alpha=5\%$). Quando verificada interação trifatorial significativa aplicou-se regressão polinomial, enquanto, em casos de interação bifatorial significativa ou para fatores isolados, realizou-se comparação de médias pelo teste Tukey, ademais, os dados foram analisados pelo software R. Os resultados indicam que o incremento de 30% e 60% na densidade de plantas apresenta maior rendimento de grãos, independente do potencial de engalhamento das cultivares e locais de condução. Em altas densidades os genótipos apresentaram maior participação da haste principal no rendimento de grãos, enquanto o número de ramos foi reduzido. Portanto, mesmo com menor produção de vagens e grãos por planta, o incremento na densidade populacional elevou o peso dos grãos, de modo que, o rendimento aumentou em consequência do maior peso de mil grãos e da maior produtividade dos componentes agronômicos por área.

Palavras-chave: *Glycine max*; rendimento de grãos; manejo da soja.

ABSTRACT

Soybeans (*Glycine max* (L.) Merrill) are one of the most economically significant agricultural commodities on the world market, with Brazil being the largest producer and exporter of the crop. In this sense, management techniques that increase productivity and reduce production costs are strategies to increase the efficiency of Brazilian grain production. Adjusting plant density is a management practice that can promote these improvements, since soybeans have the capacity to compensate for the smaller number of plants with greater individual production, however, this characteristic can be affected by the environment. The present study evaluated the behavior of soybean cultivars with different *engalhamento* capacities when subjected to variations in plant density. The experiment was conducted in the 2022/23 harvest, in three locations (Pato Branco/PR, Guarapuava/PR and Abelardo Luz/SC), consisting of five soybean cultivars (BMX Raio, BMX Zeus, BMX Ativa, DM57I52 and BMX Vênus) and they were subjected to five plant densities (-60%, -30%, ideal population, 30% and 60%), with three replications and in a randomized block experimental design. Were evaluated five plants per plot to determine grain yield and agronomic characters: weight of a thousand grains, number of branches, number of pods, number of grains, number of grains per pod, number of productive nodes, plant height and Internode distance, per plant and individually for main stem and branches. The data were subjected to joint three-factor analysis, being analyzed through analysis of variance using the F test ($\alpha=5\%$). When a significant three-factor interaction was verified, polynomial regression was applied, while, in cases of significant two-factor interaction or for isolated factors, means were compared using the Tukey test. Furthermore, the data were evaluated on R software. The results indicate that the increase 30 and 60% in plant density presents higher grain yield, regardless of the cultivation potential of the cultivars and cultivation locations. At high densities the genotypes, there was a greater participation of the stem in grain yield, while the number of branches was reduced. As well as, even with lower production of pods and grains per plant, the increase in population density increased the weight of the grains, so that the yield increased as a result of the greater weight of a thousand grains and the greater productivity of the agronomic components per area.

Keywords: *Glycine max*; grain yield; soybean management.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Parcelas com densidades A = 60% a menos que a população recomendada (6 plantas m ⁻¹), B = população ideal (14 plantas m ⁻¹) e C = 60% a mais que a população recomendada (24 plantas m ⁻¹) para a cultivar BMX Zeus em Pato Branco/PR, na safra 2022/23	31
Figura 2 - Locais de condução dos ensaios na macrorregião sojícola 1, na região Sul do Brasil, na safra 2022/23	32
Figura 3 - Precipitação acumulada (mm), temperatura média do ar (°C) e radiação solar média (w m ⁻¹) a cada 10 dias no período de execução do experimento em Pato Branco/PR (A), Guarapuava/PR (B) e Abelardo Luz/SC (C), na safra 2022/23	37
Figura 4 - Regressões entre cinco densidades de plantas e cinco cultivares de soja nos locais Pato Branco/PR (A), Guarapuava/PR (B) e Abelardo Luz/SC (C), para a variável rendimento de grãos (RG, em kg ha ⁻¹).....	40
Figura 5 – Arquitetura de plantas das cultivares BMX Raio IPRO (A), BMX Zeus IPRO (B), BMX Ativa RR (C), DM57I52 IPRO (D) e BMX Vênus CE (E) submetidas às densidades de -60%, -30%, população ideal, 30% e 60%, respectivamente, em Pato Branco/PR, na safra 2022/23	44
Figura 6 - Regressões entre cinco densidades de plantas e cinco cultivares de soja em dois locais, para as variáveis número de vagens por planta (NVP), número de grãos por planta (NGP) e peso de mil grãos (PMG, em g). Pato Branco/PR = A, C e E; Guarapuava/PR = B, D e F	46
Figura 7 - Regressões entre cinco densidades de plantas e cinco cultivares de soja em dois locais, para as variáveis massa de 100 grãos na haste principal (M100GH, em g), número de vagens na haste principal por metro quadrado (NVHm ²) e número de grãos na haste principal por metro quadrado (NGHm ²). Pato Branco/PR = A, C e E; Guarapuava/PR = B, D e F	53
Figura 8 - Regressões entre cinco densidades de plantas e cinco cultivares de soja, para as variáveis número de vagens na haste principal (NVH, A) e número de grãos na haste principal (NGH, B)	57
Figura 9 - Regressões entre cinco densidades de plantas e dois locais de produção, para a variável número de vagens na haste principal (NVH)	58
Figura 10 - Regressões entre cinco densidades de plantas e cinco cultivares de soja em dois locais para as variáveis número de ramos por planta (NRP), número de grãos por vagem nos ramos (NGVR) e número de grãos nos ramos (NGR). Pato Branco/PR = A, C e E; Guarapuava/PR = B, D e F	61
Figura 11 - Regressões entre cinco densidades de plantas e cinco cultivares de soja em dois locais, para a variável massa de 100 grãos (M100GR, em g). Pato Branco/PR = A; Guarapuava/PR = B	62
Figura 12 - Regressões entre cinco densidades de plantas e cinco cultivares de soja em três locais, para as variáveis número de vagens nos ramos secundários por metro quadrado (NVRm ²) e número de grãos nos ramos secundários por metro quadrado (NGRm ²). Pato Branco/PR = A e C; Guarapuava/PR = B e D.....	67
Figura 13 - Regressões entre cinco densidades de plantas e cinco cultivares de soja, para as variáveis altura de planta (ALTP, em m = A) e número de nós por planta (NNP = B)	70
Figura 14 - Regressões entre cinco densidades de plantas e dois locais, para as variáveis altura de planta (ALTP, em m = A) e distância entrenós (DISTEN, em cm = B)	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Cultivares de soja, grupo de maturação, tipo de crescimento, peso de mil sementes (PMS, em g) e índice de ramificação dos materiais pertencentes ao germoplasma da GDM Genética do Brasil	29
Tabela 2 - Densidade populacional (mil plantas ha ⁻¹ e plantas m ⁻¹) de acordo com as porcentagens de densidade de plantas calculadas a partir da população ideal recomendada para as cultivares e os locais de cultivo da soja, na safra 2022/23	30
Tabela 3 - Data de plantio, data de início e final de florescimento, e dias após semeadura (DAS) por cultivares, observado nos locais Pato Branco/PR e Guarapuava/PR, na safra 2022/23	37
Tabela 4 - Resumo da análise de variância para a variável rendimento de grãos (RG, em kg ha ⁻¹), análise conjunta trifatorial para cinco densidades de plantas e cinco cultivares de soja em três locais	38
Tabela 5 - Resumo da análise de variância para as variáveis número de vagens por planta (NVP), número de grãos por vagem por planta (NGVP), número de grãos por planta (NGP) e peso de mil grãos (PMG, em g) de acordo com a análise conjunta trifatorial para cinco densidades de plantas e cinco cultivares de soja em dois locais de condução	45
Tabela 6 - Comparação de médias da variável número de grãos por vagem por planta (NGVP), de acordo com a interação significativa entre ambiente x cultivar.....	51
Tabela 7 - Resumo da análise de variância para as variáveis número de vagens na haste principal (NVH), número de grãos por vagem na haste principal (NGVH), número de grãos na haste principal (NGH), massa de 100 grãos na haste principal (M100GH, em g), número de vagens na haste principal por metro quadrado (NVHm ²) e número de grãos na haste principal por metro quadrado (NGHm ²) de acordo com a análise conjunta trifatorial para cinco densidades de plantas e cinco cultivares de soja em dois locais	52
Tabela 8 - Comparação de médias da variável número de grãos por vagem na haste principal (NGVH), de acordo com a significância individual para o fator cultivar.....	59
Tabela 9 - Comparação de médias das variáveis número de grãos por vagem na haste principal (NGVH) e número de grãos na haste principal (NGH), de acordo com a significância individual para o fator local	59
Tabela 10 - Resumo da análise de variância para as variáveis número de ramos por planta (NRP), número de grãos por vagem nos ramos (NGVR), número de grãos nos ramos (NGR), massa de 100 grãos nos ramos (M100GR, em g), número de vagens nos ramos por metro quadrado (NRPm ²) e número de grãos nos ramos por metro quadrado (NRPm ²) de acordo com a análise conjunta trifatorial para cinco densidades de plantas e cinco cultivares de soja em dois locais	60
Tabela 11 - Resumo da análise de variância para as variáveis altura de planta (ALTP, em m), distância entrenós (DISTEN, em cm) e número de nós por planta (NNP), de acordo com a análise conjunta trifatorial para cinco densidades de plantas e cinco cultivares de soja em dois locais	70
Tabela 12 - Comparação de médias para as variáveis altura de planta (ALTP, em m) e número de nós por planta (NNP), de acordo com a interação significativa entre local x cultivar	73

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	A cultura da soja.....	15
1.1.1	Histórico e importância econômica	15
1.1.2	Características da cultura.....	16
<u>1.1.2.1</u>	<u>Caracteres agronômicos.....</u>	<u>17</u>
1.2	Produtividade.....	19
1.2.1	Rendimento de grãos e componentes de rendimento	20
1.3	Densidade de plantas	20
1.3.1	A plasticidade fenotípica permite variações na densidade de plantas	22
1.3.2	Influência da densidade de plantas sobre a produtividade de grãos e caracteres agronômicos	23
1.3.3	Influência da temperatura, radiação solar e disponibilidade de água no desenvolvimento da soja.....	26
1.4	Interação genótipo x ambiente x densidade de plantas.....	27
2	MATERIAL E MÉTODOS	29
2.1	Condução experimental.....	29
2.1.1	Delineamento experimental.....	29
2.2	Caracteres avaliados.....	32
2.3	Análise de dados.....	34
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	36
3.1	Condições edafoclimáticas dos locais de condução.....	36
3.2	Influência da interação ambiente x densidade x cultivar no rendimento de grãos e caracteres agronômicos da soja.....	38
3.2.1	Rendimento de grãos	38
3.2.2	Caracteres agronômicos.....	45
3.2.3	Caracteres agronômicos da haste principal.....	52
3.2.4	Caracteres agronômicos dos ramos	59
3.2.5	Altura de planta, distância entrenós e número de nós por planta	69
4	CONCLUSÃO.....	75
	REFERÊNCIAS.....	76

1 INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* (L) Merrill) é uma das culturas anuais de maior expressividade econômica no mercado mundial de *commodities* agrícolas. O grão é considerado uma excelente fonte de óleo e proteína vegetal, o que permite sua ampla utilização no setor alimentício e industrial (HIRAKURI; LAZZAROTTO, 2014). O Brasil é um dos países mais relevantes do agronegócio mundial e principal produtor e exportador de soja. Estimativas de produção indicam que na safra 2023/24 o país deve produzir em torno de 161 milhões toneladas⁻¹ da cultura (CONAB, 2023; USDA, 2023).

A elevada produção da soja é uma resposta mediante a crescente demanda de energia e alimentos no mundo, atrelada à alta rentabilidade do seu cultivo no comércio agrícola. Nesse caso, aumentar sua produtividade é uma alternativa para aumentar a quantidade produzida e a lucratividade dos produtores. Para isto, é fundamental determinar o potencial produtivo das lavouras para direcionar os agricultores quanto aos pontos de investimento economicamente viáveis na cultura (TAGLIAPIETRA et al., 2022).

Ademais, nas últimas décadas o produtor de soja tem presenciado o aumento dos custos de implantação das lavouras, aliado ao aumento dos preços dos insumos, gerando a necessidade de otimização de retorno dos investimentos (CARCIOCHI et al., 2019; WERNER et al., 2021). Assim, técnicas de manejo que aumentem a produtividade e/ou reduzam os custos de produção são consideradas estratégias essenciais para alavancar a eficiência e competitividade da agricultura brasileira (BALBINOT JUNIOR et al., 2015a; BOMTEMPO; MATSUO; ODA, 2021; FERREIRA et al., 2020; TAGLIAPIETRA et al., 2022).

Neste contexto, o ajuste da densidade de plantas é uma prática de manejo que pode promover melhorias, como a redução dos custos de produção e/ou aumentar a produtividade. Estudos têm demonstrado a possibilidade de redução da densidade populacional sem afetar negativamente a produção de grãos (BALBINOT JUNIOR et al., 2015a, 2015b; BUCHLING et al., 2017; CARCIOCHI et al., 2019; FERREIRA et al., 2020), devido a característica de alta plasticidade fenotípica apresentada pela soja (BALEST, 2021; FERREIRA et al., 2018; PROCÓPIO et al., 2013).

A plasticidade fenotípica é a capacidade da planta em sofrer mudanças em sua morfologia, produzindo componentes de rendimento adaptados às diferentes condições do ambiente e de espaçamento (FERREIRA et al., 2018). Assim, diante a redução na densidade de plantas, esta característica permite compensar o menor número de plantas por área, pela

maior produção individual, emitindo mais ramos e produzindo mais vagens por planta (BALBINOT JUNIOR et al., 2015b; FERREIRA et al., 2018).

Mediante as circunstâncias econômicas e produtivas atuais, o produtor brasileiro de soja foi despertado para a necessidade e possibilidade de redução dos custos com sementes, por conseguinte, dos custos totais de produção. Essa redução pode ser alcançada com estudos que determinem a densidade de plantas ideal, visando o aumento da produtividade de grãos atrelada à redução na densidade populacional (BOARD; KAHLON, 2013; CARCIOCHI et al., 2019; FERREIRA et al., 2018, 2020).

Á vista disso, investigar como as variedades de soja disponíveis no mercado, com diferentes capacidades de engalhamento, comportam-se quando submetidas a variações na densidade populacional e cultivadas em diferentes ambientes, pode auxiliar os produtores na escolha da cultivar mais adequada e que atenda às necessidades da lavoura, otimizando a produtividade. Portanto, o presente estudo avaliou o comportamento de cultivares de soja com diferentes capacidades de engalhamento quando submetidas a variações na densidade de plantas acima e abaixo da densidade recomendada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 A cultura da soja

1.1.1 Histórico e importância econômica

A soja é uma espécie que advém da China, sendo inicialmente cultivada entre as latitudes entre 30 e 45° Norte e sua domesticação e uso na alimentação humana ocorre há cerca de cinco mil anos. No século XVII a cultura foi dispersada para outras regiões da Ásia, chegando à Europa em 1739 e na América em 1804. No Brasil, os primeiros relatos datam em 1882 no estado da Bahia, posteriormente, em 1892 em São Paulo e em 1914 no Rio Grande do Sul (BERGAMIN; CANCIAN; CASTRO, 1999), estado no qual inicia-se o cultivo.

Até 1930, sua produção foi utilizada como fonte de proteína na alimentação de suínos, contudo, a partir da década de 60 surgem as primeiras lavouras comerciais voltadas para a produção de óleo e proteína. O aumento das áreas de cultivo foi facilitado pela introdução de cultivares adaptadas às condições ambientais do sul do Brasil e pela melhoria das condições químicas do solo. Por conseguinte, a expansão da cultura para o centro oeste brasileiro ocorreu pelo desenvolvimento de cultivares com período juvenil longo, adaptadas as elevadas temperaturas do cerrado (MUNDSTOCK; THOMAS, 2005).

A sojicultura brasileira, além do incremento de produtividade, introduziu cultivares com hábito de crescimento e porte de planta diferentes das primeiras plantas cultivadas, priorizando cultivares indeterminadas, com maior precocidade, de arquitetura compacta e alto potencial de rendimento, conferindo maior produtividade (BALBINOT JUNIOR et al., 2015a; PROCÓPIO et al., 2013).

Na atualidade, a soja configura como um dos principais cultivos da agricultura mundial devido seu alto potencial produtivo e valor nutricional, deste modo, desempenhando importante papel socioeconômico. Seus grãos e produtos derivados são utilizados na alimentação humana e animal, além de constituir matéria-prima no complexo agroindustrial (MAUAD et al., 2010). Ademais, o aumento da população global requer o aumento da produção de alimentos e produtos relacionados, de forma a gerar uma crescente demanda pela cultura da soja (SCHMITZ, 2018).

Segundo as estimativas de produção para a safra brasileira 2023/24, as expectativas são de crescimento de produtividade e de área cultivada para a commodity, entretanto, menor que do ano-safra anterior. O crescimento de área semeada deve ser de 2,8%, com previsão de produtividade média de 3.586 kg ha⁻¹ (CONAB, 2023). A nível mundial, a produção da

oleaginosa em dezembro/23 chegou a 398,88 milhões de toneladas, sendo o Brasil o maior produtor com 161 milhões toneladas⁻¹, seguido dos EUA com produtividade de 112,38 milhões toneladas⁻¹ e Argentina com 48 milhões toneladas⁻¹ (USDA, 2023).

O Brasil destaca-se como o maior exportador mundial da cultura, em nível de mercado, os dados brasileiros indicam que as exportações do grão entre janeiro a outubro de 2023 foi 25% superior ao mesmo período em 2022, elevando de 97,48 para 98,06 milhões toneladas⁻¹ (CONAB, 2023). Segundo a USDA (2023) a cultura é crucial na agricultura do Brasil e na ascensão do país como um dos principais fornecedores globais de produtos agrícolas, considerando que aproximadamente 60% da soja cultivada em todo o território brasileiro é exportada.

Diante a importância econômica da soja, no Brasil a cultura é alvo de diversas pesquisas e estudos que permitem evoluções nas práticas de manejo e genética, resultando em melhorias nos índices de produtividade. Essas melhorias ocorreram e ocorrem através da seleção de cultivares com maior eficiência de interceptação de luz e conversão de energia, conseqüentemente, produzindo maior número de grãos e vagens, peso de grãos e rendimento (DERETTI et al., 2022).

1.1.2 Características da cultura

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) pertence à família Fabaceae, sendo uma planta dicotiledônea, anual, herbácea e ereta, formada por raízes e parte aérea. Apresenta inflorescência racemosa axilar, de flores com cálice tubuloso, corola de cinco pétalas e de coloração branca ou roxa, enquanto o fruto do tipo vagem, contém de três a cinco sementes, de coloração castanho quando maduros. Possui caule ramificado e piloso, com folhas alternadas e trifoliadas, com folíolos bem desenvolvidos. No período vegetativo forma folhas, conhecidas como aparato fotossintético, bem como, apresenta um número potencial de nós na haste, com gemas que podem formar flores, vagens ou ramos (BERGAMIN; CANCIAN; CASTRO, 1999; MUNDSTOCK; THOMAS, 2005).

A cultura apresenta hábitos de crescimento do tipo determinado e indeterminado, classificados de acordo com a característica do ápice da haste principal (MUNDSTOCK; THOMAS, 2005). No crescimento determinado, o florescimento inicia no 8º ou 10º nó, progredindo para cima e para baixo em toda a planta, resultando em uma densa distribuição de vagens no caule central e de forma dispersa nos ramos laterais, com caule terminando abruptamente em um ápice achatado, com um longo racemo floral terminal, e após o início do

florescimento, as plantas apresentam interrupção abrupta do crescimento (estádio R1) (BERGAMIN; CANCIAN; CASTRO, 1999; BUENO, 2023),

No crescimento indeterminado, o florescimento inicia no 4º ou 5º nó da haste principal e progride para cima, resultando na distribuição esparsa e uniforme de vagens sobre a haste principal e nos ramos laterais (BERGAMIN; CANCIAN; CASTRO, 1999) e não apresentam racemo floral terminal, portanto, durante o florescimento continuam desenvolvendo nós e vagens e incrementando altura (MUNDSTOCK; THOMAS, 2005; BUENO, 2023).

1.1.2.1 Caracteres agronômicos

Plantas de soja possuem de 16 a 20 nós com folhas trifoliadas localizados na haste principal, de modo que, em cada nó, na inserção do pecíolo da folha com o caule, há uma gema axilar meristemática, a partir da qual se originam estruturas vegetativas (ramos) ou reprodutivas (flores, vagens e grãos) (MUNDSTOCK; THOMAS, 2005). O número de nós é determinado pela temperatura, fotoperíodo e ausência de estresses abióticos (TAGLIAPIETRA et al., 2022; BUENO, 2023).

Portanto, a haste principal é desenvolvida a partir de uma gema do caule e, dessa haste, surgem os ramos secundários de estrutura similar a principal e por sua vez, essas estruturas podem gerar outros ramos, flores e folhas (MUNDSTOCK; THOMAS, 2005). O número de ramos na soja varia com a cultivar, a nutrição, o espaçamento, a disponibilidade de água e temperatura e a incidência de luz no baixeiro da planta, de modo que, uma planta pode emitir em média de zero a oito ramos (MUNDSTOCK; THOMAS, 2005; TAGLIAPIETRA et al., 2022). Apesar de ser a característica genética que determinará o potencial de formação dos ramos, fatores ambientais podem comprometer a eficiência das suas formações (BUENO, 2023).

As características número de ramos por planta, o comprimento dos ramos e o número de nós férteis têm relação com o potencial produtivo da soja, outrossim, são consideradas estruturas potenciais de produtividade ligadas ao surgimento das gemas reprodutivas (MAUAD et al., 2010). O número de ramos secundários e produtivos garantem a estruturação necessária para o arranjo de estruturas reprodutivas que se transformarão em vagens (BUENO, 2023).

Por sua vez, as flores na soja podem ou não originar vagens, de modo que, as vagens quando produzidas são nutridas pelos carboidratos originados na folha inserida no caule junto à vagem. O número de vagens por planta é um componente de rendimento com variação

altamente associada a modificações no manejo (MUNDSTOCK; THOMAS, 2005), sendo que, a fixação das vagens pode ser limitada pelos estresses bióticos e abióticos (BUENO, 2023). Para aumentar o carácter número de vagens indica-se a estimulação do aumento do número de nós através da diminuição da restrição de radiação solar no terço médio e inferior da planta, considerando a relevância da luz na fixação de flores e vagens. O número de vagens de uma planta está diretamente relacionado ao número de ramos por planta (DERETTI et al., 2022; TAGLIAPIETRA et al., 2022).

Na soja cada vagem apresentará um determinado número de grãos, sendo esta uma característica genética pouco afetada por fatores ambientais, de modo que, em média, uma vagem forma três óvulos, resultando de dois a três grãos vagem⁻¹ (BALBINOT JUNIOR et al., 2015b; COSTA, 2013; DERETTI et al., 2022; FERREIRA et al., 2020; MUNDSTOCK; THOMAS, 2005), contudo, o estresse hídrico nos estádios R2 e R5 e a presença de insetos sugadores podem afetar o caractere. Por conseguinte, considerando o número de vagens por planta e o número de grãos por vagem produzidos é possível determinar o número de grãos por planta, sendo este um componente definido pelas características genéticas, pelos recursos ambientais disponíveis e pelas práticas de manejo adotadas (TAGLIAPIETRA et al., 2022).

A massa de grãos também é um caractere determinado geneticamente, entretanto, sua massa pode ser influenciada pelo ambiente, seja pela falta de água no enchimento de grãos, reduzindo seu o tamanho e peso (COSTA, 2013) ou por alterações no manejo, na fertilidade do solo, presença de insetos sugadores (BALBINOT JUNIOR et al., 2015b; TAGLIAPIETRA et al., 2022) e incidência de doenças foliares (DERETTI et al., 2022).

Segundo Bueno (2023), a alteração da atividade fonte (folhas) durante o florescimento e o enchimento de grãos, resulta na alteração do número de vagens e grãos, indicando que manter uma quantidade equilibrada de área foliar garante o abastecimento adequado de grãos e não exige que a planta transloque energia para estruturas vegetativas, comprometendo a sua distribuição.

Ademais, na literatura são estabelecidos valores ideais para os caracteres agronômicos da soja, com o objetivo de maximizar a produtividade de grãos, conhecidos como componentes agronômicos ótimos. Conforme descrito por Tagliapietra et al. (2022) a altura de 104 cm, o número de vagens por planta (ou área) de 1836 vagens por m², a média de nós produtivos na haste principal, ou seja, de nós que apresentem vagens, de 18 nós planta⁻¹, associado à média de grãos por vagem de 2,2 grãos vagem⁻¹ e a média de massa de grãos de 207 gramas, são os valores ideais para alcançar a máxima produtividade de uma lavoura de soja.

Assim, pode-se inferir que uma lavoura com 1836 vagens m^{-2} , com 2,2 grãos vagem⁻¹ e peso de mil grãos de 207 g, há potencial para produzir 8,3 ton ha^{-1} , correspondendo a 139,3 sacas ha^{-1} , de modo que, esses valores podem ser adotados como referência na identificação de como os fatores ambientais e de manejo interferem na produtividade das lavouras de soja (PEGORARO, 2023; TAGLIAPIETRA et al., 2022).

1.2 Produtividade

Todavia, a construção de uma lavoura com alta produtividade inicia com uma boa semeadura, um excelente estabelecimento de planta e uma população ideal de plantas, e estes fatores irão contribuir de forma positiva nos caracteres agronômicos. Contudo, após o estabelecimento das plantas, a produtividade pode ser limitada por fatores como água e nutrientes e/ou pela incidência de doenças, pragas e plantas daninhas (TAGLIAPIETRA et al., 2022).

A produtividade depende também da arquitetura vegetal, no caso da soja, aquela que promove melhor engalhamento, de modo que, compreender como manejá-la para isto é um fator de sucesso para a produtividade. O número de entrenós e o seu comprimento na haste principal, o número e comprimento dos ramos e folhas são conjuntos de aspectos estruturais que levam ao entendimento da melhor arquitetura de planta (BUENO, 2023).

Entretanto, aliado ao aumento da produtividade da soja, existe a urgência de se construir uma agricultura moderna e sustentável, pautada no uso racional de insumos e recursos naturais. Com esse propósito, alterações no modo de produção e das práticas de manejo visando à produção sustentável da cultura devem ser adotadas por todos os agentes da cadeia produtiva (HIRAKURI; LAZZAROTTO, 2014; TAGLIAPIETRA et al., 2022), de modo a produzirmos mais por planta e por área sem a necessidade de somarmos novas terras para cultivo.

Além disso, diante à relevância econômica da soja no Brasil, muitos produtores têm buscado novas alternativas para incrementar a produtividade (BOMTEMPO; MATSUO; ODA, 2021). No entanto, este aumento de produtividade acompanha o aumento dos custos de implementação das lavouras (MORO et al., 2021). Em 2014, o custo com sementes de soja representava de 10 a 13% dos custos gerais de produção no Brasil (DE LUCA; NOGUEIRA; HUNGRIA, 2014). Dados atuais indicam que o investimento em sementes na implantação de uma lavoura pode chegar a 12% do custo total (DERETTI et al., 2022). Deste modo, práticas agronômicas que diminuam os custos de produção, sem afetar a produtividade por área,

devem ser consideradas em um planejamento agrícola eficiente (DE LUCA; NOGUEIRA; HUNGRIA, 2014).

1.2.1 Rendimento de grãos e componentes de rendimento

De acordo com Costa (2013) o rendimento de grãos é o resultado da capacidade de uma planta interceptar, absorver e utilizar a radiação fotossinteticamente ativa, para produzir e fornecer fotoassimilados na formação, fixação e desenvolvimento de estruturas reprodutivas, sendo que o rendimento é determinado pelo genótipo, ambiente e pela interação entre planta-ambiente. Contudo, as práticas de manejo como época de semeadura, escolha da cultivar e a disposição espacial das plantas, podem alterar o crescimento e a produtividade (MACHADO et al., 2018; MAUAD et al., 2010; WERNER et al., 2016). Portanto, o potencial de produção de grãos está associado a atributos genéticos, as condições ambientais, as práticas de manejo e suas interações (CORASSA et al., 2018; DERETTI et al., 2022).

O rendimento de uma planta está correlacionado linearmente com o número de grãos por área (COSTA, 2013). Na soja, a produção de grãos por área é determinada pelos componentes de rendimento primários: número de plantas por área, número de vagens por planta ou área, número de grãos por vagem, massa de grãos (ASSEFA et al., 2018; BALBINOT JUNIOR et al., 2015b; MUNDSTOCK; THOMAS, 2005) e número de grãos por planta (BALBINOT JUNIOR et al., 2015b; DERETTI et al., 2022). Já os componentes secundários são características morfológicas, como número de nós e número de ramos e, características fisiológicas, como taxa fotossintética e respiração no crescimento, e estes apresentam efeito sobre os componentes primários (MUNDSTOCK; THOMAS, 2005).

Logo, a produtividade da soja é influenciada por fatores genéticos, ambientais e de manejo, que modificam seu desenvolvimento, apresentando reflexo no rendimento de grãos (MORO et al., 2021). Quanto ao manejo da soja, a densidade de plantas é um fator que pode provocar lacunas de produtividade (BALEST, 2021; CORASSA et al., 2018; COX; CHERNEY, 2011), assim, alterações na densidade populacional podem gerar aumento da produtividade, reduzindo custos de produção e gerando economia de recursos ambientais (MORO et al., 2021).

1.3 Densidade de plantas

A densidade de plantas ou população de plantas refere-se ao número de plantas, ou seja, a quantidade de plantas por hectare ou quantidade de indivíduos por área. Todavia, a

densidade populacional depende da densidade de semeadura, outrossim, da quantidade de sementes por hectare utilizada no plantio. Deste modo, o número de plantas que compõem a densidade final é proveniente das sementes e plântulas que foram submetidas às condições favoráveis ou estressantes do ambiente (umidade, temperatura, precipitação, tipo de solo, fertilidade do solo, doenças e insetos), que germinaram e emergiram após o plantio e que, portanto, estabeleceram-se na lavoura até o estágio final (BALBINOT JUNIOR et al., 2015b; SCHMITZ, 2018).

A quantidade de plantas por área determina a competição inter e intraespecífica por recursos como água, nutrientes e luz, alterando o crescimento das plantas, por conseguinte, a velocidade de fechamento das entrelinhas, a produção de biomassa, a arquitetura de planta, a incidência e severidade de pragas e doenças, a penetração de produtos fitossanitários no dossel, o acamamento e por fim, a produtividade e qualidade dos grãos e os componentes de rendimento (BALBINOT JUNIOR et al., 2015a, 2015b, 2018; MACHADO et al., 2018; PROCÓPIO et al., 2013; WERNER et al., 2016).

Portanto, a densidade de plantas modifica a competição pelos recursos do ambiente e a interação com o ambiente, resultando em ganhos ou perdas de produtividade (BALBINOT JUNIOR et al., 2015a; BALEST, 2021). Neste sentido, a densidade de plantas é uma prática de manejo relevante na obtenção de altas produtividades na cultura da soja (BOMTEMPO; MATSUO; ODA, 2021; DERETTI et al., 2022; MASINO et al., 2018), podendo ser alterada pelos produtores, adaptando-se o arranjo de plantas para cada região e clima, a fim de atingir melhores resultados (MORO et al., 2021).

À medida que os custos com sementes aumentam continuamente, produtores têm buscado gerir os insumos de produção, apresentando interesse na redução das taxas de semeadura e conseqüentemente, da densidade de plantas (DERETTI et al., 2022; HAMMAN et al., 2021), principalmente por se tratar de uma estratégia de redução dos custos sem comprometimento do rendimento de grãos (BOARD; KAHLON, 2013; WERNER et al., 2021). Associado a isso, enquanto maior produtor de soja, técnicas de manejo que aumentem o rendimento e/ou reduzam os custos de produção, representam uma ferramenta para aumentar a eficiência produtiva e a competitividade da agricultura brasileira (ALVES COSTA, 2020; FERREIRA et al., 2020).

No Brasil, visando alcançar alto teto produtivo, comumente, as recomendações para a soja são de alta a média densidade populacional, em torno de 300 mil plantas ha⁻¹ (15 plantas m⁻¹). Contudo, estudos têm indicado que o rendimento da soja pode ser semelhante em uma ampla variedade de populações de plantas (BOARD; KAHLON, 2013), inclusive, que a

cultura é capaz de suportar grandes reduções populacionais sem perdas significativas de produtividade (BOMTEMPO; MATSUO; ODA, 2021).

Assim, o plantio em baixas densidades têm apresentado vantagens à produtividade da cultura, resultando na redução da competição por recursos, aumentando a chegada de luz nos ramos e melhorando o rendimento de grãos (DE LUCA e HUNGRIA, 2014; DE LUCA; NOGUEIRA; HUNGRIA, 2014). Contudo, cada tipo de planta apresentará uma população específica considerando o ciclo, a altura de planta, o tipo de crescimento, o índice de acamamento e o período juvenil (MACHADO et al., 2018).

Entretanto, as variações na densidade da soja acima ou abaixo da recomenda requerem atenção do produtor. Segundo Machado et al. (2018) e Carciochi et al. (2019) o uso de populações superiores às indicadas, além de gerar custos mais elevados devido a maior necessidade de sementes por área, podem resultar em acamamento e desenvolvimento de doenças, por fim, não agregando em produtividade. Em contrapartida, populações abaixo do indicado podem favorecer o desenvolvimento de plantas daninhas, também resultando em perdas de produtividade (MACHADO et al., 2018).

Em suma, a densidade de plantas determina a disposição de plantas no ambiente e interfere na competição por recursos ambientais, no entanto, também influencia no crescimento das plantas, causando alterações morfofisiológicas (BOMTEMPO; MATSUO; ODA, 2021; MACHADO et al., 2018; MAUAD et al., 2010). Mas o que permite as variações na densidade de plantas na soja? A alta plasticidade fenotípica da cultura (DERETTI et al., 2022; MORO et al., 2021). Diversos estudos indicam que é possível reduzir a densidade de plantas sem reduzir a produtividade, inclusive, aumentando o retorno econômico (BUCHLING et al., 2017; WERNER et al., 2021), considerando que o rendimento por área varia pouco com as alterações na densidade de plantas (BALBINOT JUNIOR et al., 2018), devido à alta plasticidade fenotípica.

1.3.1 A plasticidade fenotípica permite variações na densidade de plantas

A plasticidade fenotípica é definida como a capacidade de adaptação da planta às condições ambientais e de manejo, através de modificações na morfologia e nos componentes de rendimento, adaptando-se ao espaço disponível e a competição intraespecífica por recursos (água, nutrientes e luz) (BALBINOT JUNIOR et al., 2015a, 2015b, 2018; FERREIRA et al., 2018, 2020; MACHADO et al., 2018). Esta característica está relacionada à adaptação à altitude, latitude, fertilidade do solo, época de semeadura, população de plantas e espaçamento entre linhas (BOMTEMPO; MATSUO; ODA, 2021). Sendo que, as respostas de

plasticidade a sinais ambientais afetam diretamente o sucesso reprodutivo da planta em resposta ao estresse ambiental (MANDA; MATAA, 2020).

Portanto, a plasticidade fenotípica permite que a planta se adapte produzindo estruturas vegetativas e reprodutivas em decorrência do ambiente e espaço. Na soja, esta característica ocorre pela presença de gemas axilares nos nós, as quais podem se diferenciar em ramos secundários, que por sua vez, produzem nós, folhas, flores, vagens e grãos, aumentando o número de nós na haste principal e, por conseguinte, o número de vagens e grãos por planta (BALEST, 2021).

A alta plasticidade na soja permite compensar a distribuição ou perdas de plantas, alcançando produtividades similares em uma ampla população de plantas (BALBINOT JUNIOR et al., 2015a, 2018; BOARD; KAHN, 2013; DE LUCA; HUNGRIA, 2014; FERREIRA et al., 2018; PROCÓPIO et al., 2013). Todavia, o baixo estande de plantas ou a deficiência de recursos podem gerar decréscimo na produtividade, ainda que o genótipo apresente alta capacidade de compensação (BALEST, 2021). Ademais, uma grande redução no número de plantas diminui a eficiência do uso dos recursos ambientais (FERREIRA et al., 2020).

1.3.2 Influência da densidade de plantas sobre a produtividade de grãos e caracteres agronômicos

Compreender como a produtividade de grãos é construída na cultura da soja e como modificações no manejo interferem no comportamento dos caracteres agronômicos gera questionamentos quanto as densidades populacionais comumente utilizadas pelos agricultores. Diversos estudos vêm sendo desenvolvidos neste sentido, avaliando como o aumento ou a redução das taxas de semeadura e densidades de plantas impactam na produtividade de grãos por meio dos caracteres agronômicos.

Estudos avaliando mudanças nos comportamentos de rendimento devido às variações na densidade populacional indicam que a diminuição na densidade de plantas produz maior crescimento de planta individual (DE LUCA; HUNGRIA, 2014). Isto porque, em baixas densidades a soja tende a emitir maior número de ramos e de maior tamanho, proporcionando aumento do número de vagens e sementes, gerando maior produção por planta, mantendo o rendimento de grãos mesmo com a redução no número de plantas por área (BALBINOT JUNIOR et al., 2015b; CARCIOCHI et al., 2019; FERREIRA et al., 2018, 2020; PROCÓPIO et al., 2013; WERNER et al., 2021).

Desta forma, o principal mecanismo de compensação da soja é o incremento da quantidade de vagens por planta oriunda dos ramos, sendo esta a variável com maior impacto na plasticidade fenotípica. Em altas densidades, as plantas diminuem a contribuição dos ramos, aumentando a participação da haste principal na produção total por planta, enquanto em menores densidades, os ramos são mais significativos na produtividade de grãos (FERREIRA et al., 2018; WERNER et al., 2021).

Neste sentido, Balbinot Junior et al. (2018) buscou compreender como os ramos e o caule contribuem na produtividade de grãos por planta quando submetida a diferentes densidades. Os resultados indicam que o número de vagens por planta nos ramos foi a variável com maior impacto na plasticidade fenotípica, mas também foram associados os caracteres número de vagens por planta nos galhos e haste principal, o número de galhos por planta e a porcentagem de produção dos galhos, enquanto, o número de grãos por vagem e massa de grãos dos ramos e caule não apresentaram contribuição significativa.

Trabalhos avaliando o efeito de diferentes densidades nos componentes de produção e na produtividade da soja relatam que a redução na densidade de plantas não afetou o número de vagens por área, número de grãos por vagem e rendimento, por outro lado, aumentou o número de vagens nos ramos e por planta, indicando que a cultura suporta a redução de plantas sem afetar o rendimento e a produtividade (DERETTI et al., 2022).

Sobre o efeito da redução da densidade no rendimento de cultivares com diferentes potenciais de engalhamento, Ferreira et al. (2020) identificou taxa ótima abaixo da recomendada, sendo que, os componentes de rendimento vagens m^{-2} e número de sementes por vagem foram responsáveis pelo efeito compensatório em resposta a redução. Os autores ressaltam que, o peso de mil sementes foi o componente principal pela perda de rendimento na menor densidade, enquanto a produtividade dos ramos foi alta em resposta a menor população de plantas. Contudo, por mais que as cultivares apresentaram taxa ótima abaixo da indicada, cultivares com arquitetura compacta apresentaram menor capacidade de redução na densidade.

Segundo os resultados relatados por Werner et al. (2021), o número de vagens m^{-2} e a produtividade de grãos aumentaram nos ramos e diminuíram na haste principal com a diminuição na densidade, independentemente do tipo de crescimento ou estatura da planta. Quanto à massa de mil grãos, esta foi maior em ambas as partes da planta. Não obstante, Werner et al. (2016) acrescenta que o crescimento da planta não é afetado pela densidade, mas o aumento da densidade incrementa a massa seca da planta e reduz o número de ramos por planta.

Investigações também foram realizadas a respeito do desempenho vegetativo e reprodutivo de cultivares com hábito de crescimento determinado e indeterminado, buscando compreender o comportamento destas mediante as variações na densidade populacional. Em cultivares de tipo indeterminado o aumento da população resultou na maior altura de inserção da primeira vagem e altura final de planta, menor número de nós e ramos, assim como, no aumento linear da média de produtividade por hectare (BOMTEMPO; MATSUO; ODA, 2021) e resposta quadrática da produtividade à taxa de semeadura (COX; CHERNEY, 2011). Também foram identificadas reduções no número de vagens por planta e de grãos por planta, bem como, aumento da massa de grãos (COSTA, 2013).

Para as cultivares determinadas foram observados os mesmos comportamentos anteriormente mencionados, exceto para peso de grão e produtividade, que não foram influenciados com o aumento da densidade de plantas (MAUAD et al., 2010; MORO et al., 2021). Diante o exposto, a escolha do genótipo é essencial na definição da densidade de plantas, considerando que algumas cultivares respondem ao adensamento ou reduções e, outras não, salientando a necessidade de conhecer as respostas dos genótipos às variações nas populações (PROCÓPIO et al., 2013).

De acordo com a literatura, o componente de produtividade mais influenciado pela densidade de plantas é o número de vagens por área, e este, representa alta influência no rendimento de grãos, variando inversamente ao aumento ou redução da população de plantas (ALVES COSTA, 2020; BALEST, 2021; COSTA, 2013). Em contrapartida, a quantidade de grãos por vagem e massa de grãos são componentes pouco influenciados pela densidade (ALVES COSTA, 2020; BALBINOT JUNIOR et al., 2015b).

Segundo Manda e Mataa (2020) a densidade apresenta pouco efeito no rendimento, exemplificado pelo rendimento constante observado em diferentes densidades. Conforme relata Machado et al. (2018), densidades de semeadura entre 15 e 20 plantas m^{-1} não apresentaram efeito sobre a produtividade de grãos, devido à alta plasticidade fenotípica, compensando a redução na densidade com o aumento da produção individual de vagens. Para Schmitz (2018) o aumento na densidade ocasionou falta de resposta de rendimento. Todavia, Procópio et al. (2013) observou que o aumento da densidade provocou menor produção por indivíduo, mas compensou pela maior quantidade de plantas e pelo aumento de produção de grãos nas hastes, não afetando o rendimento, portanto, a alteração na densidade teve pouca influência na determinação do rendimento de grãos.

De forma geral, estudos considerando densidade acima do recomendado demonstraram pouca influência na produtividade. Deste modo, o aumento da densidade além

da faixa indicada demonstra ser uma prática desnecessária na soja, não conferindo ganhos significativos de produtividade, podendo inclusive, provocar acamamento de plantas e aumentar os custos de produção (BALBINOT JUNIOR et al., 2015b).

Entretanto, como o estabelecimento de plantas é fundamental na obtenção de elevados rendimentos (MUNDSTOCK; THOMAS, 2005), a acentuada redução na densidade pode aumentar os riscos de formação deficiente de estande, representando reduções de produtividade, sobretudo em ambientes pouco propícios ao crescimento da planta e formação de grãos, sendo necessário priorizar a qualidade fisiológica das sementes (BALBINOT JUNIOR et al., 2015b). Portanto, ainda que a cultura da soja compense as diferenças de crescimento entre plantas, a qualidade do plantio é fundamental, considerando que pequenos efeitos de produtividade podem ter alto retorno econômico devido ao elevado preço do produto (MASINO et al., 2018).

1.3.3 Influência da temperatura, radiação solar e disponibilidade de água no desenvolvimento da soja

Analisando a influência dos fatores ambientais podemos compreender o efeito do ambiente sobre a produtividade de grãos na cultura da soja e práticas de manejo adotadas. Contudo, ainda que os fatores climáticos como temperatura, precipitação, umidade relativa e radiação solar variam independente da atuação humana, estes podem ser previstos a curto e médio prazo (BORÉM; MIRANDA, 2013).

Para o cultivo da soja, é considerada como temperatura ótima 25 a 30 °C, sendo que, temperaturas abaixo de 20 °C retardam a emergência e o desenvolvimento vegetativo, afetando a absorção de nutrientes, a fotossíntese, a translocação de fotoassimilados e a fixação de nitrogênio. Já temperaturas acima de 30 °C diminuem a emergência, o crescimento de entrenós, o número de nós, a atividade fotossintética e inibem a nodulação. Quanto ao florescimento, temperaturas inferiores retardam e superiores aceleram a fase, provocando distúrbios nas sementes (BERGAMIN; CANCIAN; CASTRO, 1999).

Por sua vez, a radiação solar está relacionada à atividade fotossintética, a alongação da haste principal e dos ramos, a expansão foliar e nodulação da cultura (BERGAMIN; CANCIAN; CASTRO, 1999), de modo que, a qualidade e a quantidade de radiação afeta diretamente a produtividade (DE LUCA; NOGUEIRA; HUNGRIA, 2014). Assim, o sombreamento excessivo gera maior alongação da haste e diminuiu os ramos, aumentando a taxa de aborto e queda de flores e vagens. Em contrapartida, ao iluminar as folhas mais baixas da planta, aumenta-se a taxa fotossintética, aumentando a produção de nós nos ramos, por

consequente, aumentando a produtividade de grãos (BERGAMIN; CANCIAN; CASTRO, 1999; DE LUCA; HUNGRIA, 2014).

Quanto ao fator água, a soja apresenta sensibilidade ao excesso e a escassez hídrica, de modo que, a cultura apresenta boa adaptação em regiões com precipitações médias entre 700 e 1.200 mm anuais (BERGAMIN; CANCIAN; CASTRO, 1999). O excesso de água reflete em crescimento vegetativo demasiado, ocasionando acamamento (MUNDSTOCK; THOMAS, 2005), em contraponto, a escassez de água reduz a taxa de crescimento vegetativo, a fotossíntese, a fixação do nitrogênio e o metabolismo da planta.

O estresse hídrico no início do florescimento pode levar a 10% de perda de produtividade devido à queda de flores e vagens (BERGAMIN; CANCIAN; CASTRO, 1999), ademais, na deficiência hídrica ocorre a redução na emissão de novos ramos, reduzindo o potencial de nós que poderiam formar vagens (MUNDSTOCK; THOMAS, 2005). Portanto, nesta condição, a capacidade de compensação da soja diminuiu, reduzindo os componentes de rendimento, com maior efeito sobre o número de vagens, número de sementes por vagem e tamanho da semente (BERGAMIN; CANCIAN; CASTRO, 1999).

Conforme Mundstock e Thomas (2005) a redução de água afeta o crescimento da planta, restringindo a disponibilidade de fotoassimilados, refletindo em menor estatura de planta e menor número de nós na planta, assim, um menor número de nós férteis. Portanto, o rendimento de grãos diminuiu devido ao menor número de vagens férteis por planta e menor peso de grão. Caso a disponibilidade de água melhore no meio da floração e início da formação de vagens, a planta consegue emitir e fixar as flores, contudo, a falta de novas folhas reduz o enchimento dos grãos (MUNDSTOCK; THOMAS, 2005), mesmo que as perdas de vagens possam ser compensadas pelo aumento no tamanho da semente nos nós inferiores (BERGAMIN; CANCIAN; CASTRO, 1999).

1.4 Interação genótipo x ambiente x densidade de plantas

Em síntese, a produtividade de uma lavoura é determinada pela genética, condições do ambiente (clima e solo) e práticas de manejo. O fator ambiente pode ser influenciado pelas características fitotécnicas (BALBINOT JUNIOR et al., 2015b), o fator genético depende da escolha da cultivar (TAGLIAPIETRA et al., 2022) e o fator manejo, especificamente a densidade de plantas, varia com a tomada de decisão do produtor (BALBINOT JUNIOR et al., 2015b; BALEST, 2021).

A interação entre os três fatores define o quanto será produzido em uma área, de modo que, para uma cultivar de soja expressar sua máxima produtividade potencial, além da

influência genética, está sujeita a influência das condições edafoclimáticas e do manejo adotado (BALEST, 2021; TAGLIAPIETRA et al., 2022). Essa interação pode explicar as variações na resposta de rendimento à densidade de plantas, assim como, compreendê-la auxilia a alcançar respostas favoráveis à produtividade agrícola (COSTA, 2013).

Todavia, não existe espaçamento e densidade de plantas ideal para todos os tipos de ambientes e genótipos, assim, é necessário observar a interação com a densidade em cada condição de cultivo, dessa maneira, a recomendação da densidade populacional varia com a cultivar, a região, a época de semeadura e o sistema de plantio adotado (MACHADO et al., 2018). Não obstante, as plantas de soja podem se ajustar à variação no ambiente pela plasticidade fenotípica (BORÉM; MIRANDA, 2013).

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Condução experimental

2.1.1 Delineamento experimental

Foram utilizadas cinco cultivares comerciais de soja com diferentes índices de ramificação pertencentes ao germoplasma da GDM Genética do Brasil (Tabela 1). As cultivares utilizadas são recomendadas para cultivo na região sul do Brasil e foram selecionadas devidas sua importância econômica e expressividade de mercado, mas também, buscando representar as diferentes arquiteturas de plantas (índice de ramificação, tipo de crescimento e estatura) utilizadas pelos produtores.

Tabela 1 - Cultivares de soja, grupo de maturação, tipo de crescimento, peso de mil sementes (PMS, em g) e índice de ramificação dos materiais pertencentes ao germoplasma da GDM Genética do Brasil

Cultivar	Grupo Maturação	Tipo de Crescimento	PMS (g)	Índice de ramificação
BMX Raio	5.0	Indeterminado	201,00	Média
BMX Zeus	5.5	Indeterminado	209,00	Média
BMX Ativa	5.6	Determinado	174,00	Baixa
DM 57I52	5.7	Indeterminado	179,00	Alto
BMX Vênus	5.7	Indeterminado	166,00	Alto

Fonte: Brasmax e DonMario (2023)

A cultivar BMX Raio apresenta superprecocidade, com excelente adaptação a regiões de maior altitude e porte controlado com resistência ao acamamento (BRASMAX, 2023). A BMX Zeus possui resistência ao acamamento, com porte controlado de plantas, de arquitetura moderna e folhas lanceoladas, o que permite maior penetração e luminosidade do baixeiro, com grande formação de vagens nos nós produtivos da haste principal, com excelente adaptação a regiões de maior altitude (BRASMAX, 2018). A BMX Ativa apresenta porte baixo e é altamente responsiva à época de semeadura e população de plantas. A BMX Vênus apresenta porte controlado com resistência ao acamamento, com alto potencial de ramificação e com adaptação a regiões de maior altitude (BRASMAX, 2023). Por fim, a cultivar DM57I52 possui estabilidade e alto potencial de ramificação, com porte médio de planta e resistência ao acamamento (DONMARIO, 2020).

As cinco cultivares foram semeadas em cinco densidades de plantas (Tabela 2, Figura 1), estabelecidas a partir da população recomendada, e conduzidas na safra 2022/23 em três locais na região sul do Brasil (Figura 2).

O delineamento experimental foi de blocos ao acaso, com três repetições. As unidades experimentais foram compostas de oito linhas com quatro metros de comprimento, com espaçamento entre linhas de 0,50 metros, totalizando área de parcela de 16 m². O plantio foi realizado com semeadora de taxa variável, de sistema a vácuo, com controle automático de

distribuição de sementes. As práticas culturais adotadas para controle de pragas, doenças e plantas daninhas foram realizadas de acordo com as recomendações técnicas para a cultura.

Tabela 2 - Densidade populacional (mil plantas ha⁻¹ e plantas m⁻¹) de acordo com as porcentagens de densidade de plantas calculadas a partir da população ideal recomendada para as cultivares e os locais de cultivo da soja, na safra 2022/23

Cultivares	-60%		-30%		População Ideal		+30%		+60%	
	Pl ha ⁻¹	Pl m ⁻¹	Pl ha ⁻¹	Pl m ⁻¹	Pl ha ⁻¹	Pl m ⁻¹	Pl ha ⁻¹	Pl m ⁻¹	Pl ha ⁻¹	Pl m ⁻¹
Pato Branco/PR										
BMX Raio	140.000	6	245.000	11	350.000	16	455.000	20	560.000	25
BMX Zeus	136.000	6	238.000	11	340.000	14	442.000	20	544.000	24
BMX Ativa	136.000	6	238.000	11	340.000	15	442.000	20	544.000	24
DM57I52	124.000	6	217.000	10	310.000	14	403.000	18	496.000	22
BMX Vênus	112.000	5	196.000	9	280.000	13	364.000	16	448.000	20
Guarapuava/PR										
BMX Raio	132.000	6	231.000	10	330.000	15	429.000	19	528.000	24
BMX Zeus	120.000	5	210.000	9	300.000	14	390.000	18	480.000	22
BMX Ativa	124.000	6	217.000	10	310.000	14	403.000	18	496.000	22
DM57I52	112.000	5	196.000	9	280.000	13	364.000	16	448.000	20
BMX Vênus	112.000	5	196.000	9	280.000	13	364.000	16	448.000	20
Abelardo Luz/SC										
BMX Raio	132.000	6	231.000	10	330.000	15	429.000	19	528.000	24
BMX Zeus	124.000	6	217.000	10	310.000	14	403.000	18	496.000	22
BMX Ativa	124.000	6	217.000	10	310.000	14	403.000	18	496.000	22
DM57I52	112.000	5	196.000	9	280.000	13	364.000	16	448.000	20
BMX Vênus	112.000	5	196.000	9	280.000	13	364.000	16	448.000	20

Pl = plantas.

Fonte: Adaptado de Brasmax e DonMario (2022)

Para o cálculo das densidades de plantas que constituíram cada tratamento, utilizou-se como referência a população de plantas recomendada pelo obtentor da cultivar, segundo a região de cultivo e época de semeadura. A partir da população ideal definiu-se 60% e 30% a mais de plantas e 60% e 30% a menos de plantas, entretanto, devido às diferenças entre as cultivares estudadas, esses valores foram diferentes para cada material, sendo representados por número de plantas m⁻¹ e número de plantas ha⁻¹ (Tabela 2). Para confirmar a densidade de plantas alcançada nas parcelas utilizou-se uma régua graduada para quantificar a quantidade de plantas presentes em um metro linear (Figura 1).

Figura 1 - Parcelas com densidades A = 60% a menos que a população recomendada (6 plantas m⁻¹), B = população ideal (14 plantas m⁻¹) e C = 60% a mais que a população recomendada (24 plantas m⁻¹) para a cultivar BMX Zeus em Pato Branco/PR, na safra 2022/23

A



B



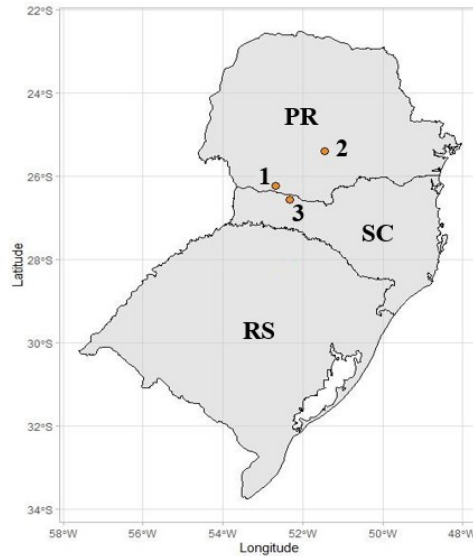
C



Fonte: Autoria própria (2022)

Os ensaios foram conduzidos em três locais pertencentes à macrorregião sojícola 1 (3^a aproximação) (KASTER e FARIA, 2012) (Figura 2). Em Pato Branco/PR os ensaios foram cultivados na área experimental da Coopertradição, os demais ensaios foram conduzidos nos locais de experimentação da empresa GDM Genética do Brasil, localizados em Guarapuava/PR e Abelardo Luz/SC, na safra 2022/23.

Figura 2 - Locais de condução dos ensaios na macrorregião sojícola 1, na região Sul do Brasil, na safra 2022/23



- 1 – Pato Branco/PR (altitude 765 m)
- 2 – Guarapuava/PR (altitude 1.111 m)
- 3 – Abelardo Luz/SC (altitude 771 m)

Fonte: Autoria própria (2023)

Os dados meteorológicos de temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), precipitação acumulada (mm) e radiação solar (w m^{-1}) foram obtidos para os meses de desenvolvimento da soja (semeadura à colheita) ao longo da safra, para os três locais de condução do experimento. A temperatura foi calculada a cada 10 dias pela média das temperaturas diárias, a precipitação acumulada foi obtida pela soma a cada 10 dias das precipitações diárias e a radiação solar foi calculada a cada 10 dias pela média da radiação diária, dos dados obtidos da Nasa Power via software R (versão R.4.3.2), pacote *EnvRtype*. Ademais, foram observadas as datas de florescimento para cada cultivar nos campos experimentais de Pato Branco/PR e Guarapuava/PR, através de avaliação visual, considerando como data de florescimento momento em que mais de 50% das plantas da parcela apresentavam flores abertas.

2.2 Caracteres avaliados

No estágio de maturação plena (R8, segundo FEHR e CAVINESS, 1977), foram avaliadas cinco plantas por parcela, coletadas aleatoriamente (adaptado dos trabalhos desenvolvidos por BALBINOT JUNIOR et al., 2015a; FERREIRA et al., 2018, 2020; MAUAD et al., 2010; WERNER et al., 2016). Após o saque das plantas, estas foram avaliadas para os caracteres:

- a. Altura de planta (ALTP): distância entre a superfície do solo e a extremidade apical da haste principal, utilizando trena graduada em centímetros, expresso em cm;
- b. Distância de entrenós (DISTEN): distância média de entrenós na haste principal, utilizando régua graduada em centímetros, expresso em cm;
- c. Número de ramos por planta (NRP): contagem do número de ramos presentes na haste principal, expresso em valor médio. Foram considerados ramos as estruturas vegetativas contendo mais de um nó;
- d. Número de nós produtivos (NNP): contagem do número de nós reprodutivos, ou seja, nós com vagens na haste principal, expresso em valor médio;
- e. Número de vagens por planta (NVP): contagem do número total de vagens por planta, expresso em valor médio;
 - a. Número de vagens na haste principal (NVH): contagem do número total de vagens na haste principal, expresso em valor médio;
 - b. Número de vagens nos ramos (NVR): contagem do número total de vagens nos ramos, expresso em valor médio;
 - c. Número de vagens na haste principal por metro quadrado (NVHm²): contagem de todas as vagens provenientes da haste principal (NVH) e transformadas em m²;
 - d. Número de vagens nos ramos por metro quadrado (NVRm²): contagem de todas as vagens provenientes dos ramos (NVR) e transformadas em m²;
- f. Número de grãos por vagem por planta (NGVP): calculado pela divisão do número total de grãos por planta pelo número de vagens totais por planta, expresso em valor médio;
 - a. Número de grãos por vagem na haste principal (NGVH): calculado pela divisão do número total de grãos na haste principal pelo número de vagens totais na haste principal, expresso em valor médio;
 - b. Número de grãos por vagem nos ramos (NGVR): calculado pela divisão do número total de grãos nos ramos pelo número de vagens totais nos, expresso em valor médio;
- g. Número de grãos por planta (NGP): contagem do número total de grãos formados em cada planta, calculando o valor médio das cinco plantas amostradas;

- a. Número total de grãos na haste principal (NGH): contagem do número total de grãos formados na haste principal, calculando o valor médio das cinco plantas amostradas;
 - b. Número total de grãos nos ramos (NGR): contagem do número total de grãos formados nos ramos, calculando o valor médio das cinco plantas amostradas;
 - c. Número de grãos na haste principal por metro quadrado (NGHm²): contagem de todos os grãos provenientes da haste principal (NGH) e transformadas em m²;
 - d. Número de grãos nos ramos por metro quadrado (NGRm²): contagem de todos os grãos provenientes dos ramos (NGR) e transformados em m²;
- h. Peso de mil grãos (PMG): obtido a partir da contagem e pesagem de três repetições de 100 sementes, com posterior estimativa para 1000 sementes, com resultados expressos em gramas;
- a. Massa de 100 grãos na haste principal (MGH): em balança de precisão foram pesados todos os grãos provenientes da haste principal e o valor foi utilizado para estimativa da massa de 100 grãos, expresso em valor médio;
 - b. Massa de 100 grãos nos ramos (MGR): em balança de precisão foram pesados todos os grãos provenientes dos ramos e o valor foi utilizado para estimativa da massa de 100 grãos, expresso em valor médio;
- i. Rendimento de grãos (RG): obtido a partir da colheita das linhas centrais de cada unidade experimental em colhedora de parcela. O peso de grãos por parcela (kg) foi estimado em kg ha⁻¹, com teor de umidade padronizada para 13%;

Os caracteres citados foram avaliados a partir do saque de plantas nos ensaios conduzidos em Pato Branco/PR e Guarapuava/PR, enquanto em Abelardo Luz/SC avaliou-se apenas o carácter rendimento de grãos.

2.3 Análise de dados

As análises estatísticas foram realizadas seguindo o delineamento de blocos ao acaso (DBA) com três repetições. Considerando análise trifatorial, sendo compostos por cinco

densidades de plantas, cinco cultivares de soja e, em dois locais, com exceção para RG para o qual foram considerados os três locais de estudo.

Os dados foram testados quanto à normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk) e homogeneidade de variâncias (Bartlett), sem necessidade de transformação dos dados, com exceção para o caractere número de vagens nos ramos (NVR) que não atendeu aos pressupostos de normalidade dos resíduos mesmo com transformação dos dados. Quando atendido os pressupostos, o conjunto de dados foi submetido à análise da variância (ANOVA) pelo teste F ($p < 0,05$), como análise conjunta trifatorial com todos os fatores fixos. Casos em que a interação entre os três fatores não foi significativa, as médias dos fatores qualitativos, quando interação dupla ou individual significativa, foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Na interação tripla significativa, o efeito da densidade de plantas com as cultivares de soja e locais, foi avaliado mediante análise de regressão polinomial testada até terceiro grau. Quando houve ajuste de regressão quadrático, calculou-se o ponto de máxima ou mínima eficiência técnica (PMET) pela equação:

$$x = \frac{-b_1}{2b_2}$$

Ao substituir o valor de x na equação de segundo grau obteve-se o valor de y . Quando houve ajuste de regressão cúbica, calculou-se o ponto de máxima eficiência técnica e ponto de mínima eficiência técnica pela equação:

$$x = \frac{(-2 * b_2 \mp (\sqrt{4 * (b_2^2) - 12 * b_1 * b_3}))}{(6 * b_3)}$$

Substituiu-se o valor de x na equação de terceiro grau para obter o valor de y .

Os procedimentos foram realizados no software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2020, versão R.4.3.2), utilizando-se o pacote ExpDes.pt (FERREIRA; CAVALCANTI; NOGUEIRA, 2021), enquanto os gráficos foram gerados no Microsoft Excel®.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Condições edafoclimáticas dos locais de condução

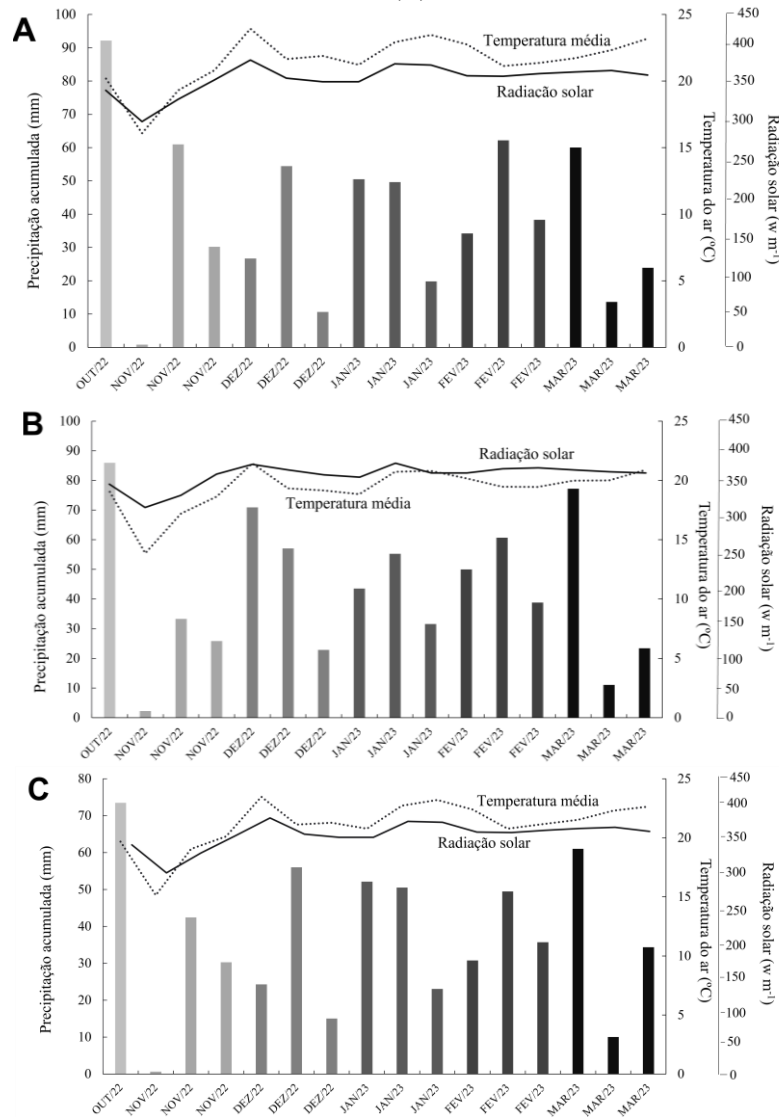
Considerando as condições de temperatura do ar, precipitação acumulada e radiação solar nos três locais ao longo do desenvolvimento da cultura na safra 2022/23, observa-se em Pato Branco/PR (Figura 3-A) alta precipitação durante o mês de outubro/22, um mês antes a semeadura. Após o plantio, a precipitação variou entre 10 e 60 mm a cada 10 dias. Ademais, entre os meses de janeiro e fevereiro ocorreu boa distribuição das chuvas coincidindo com as fases de floração e formação de grãos.

De acordo com as datas de florescimento (Tabela 3), verificou-se boa disponibilidade de água para a viabilidade das flores e enchimento dos grãos. De modo geral, as plantas não foram submetidas a períodos de estresse hídrico prolongados. Quanto à temperatura não foram registradas ocorrências de altos valores (acima de 30 °C), permanecendo entre 20 e 25 °C. A radiação solar esteve majoritariamente acima dos 350 w m⁻¹, com exceção para os 10 dias do plantio.

Em Guarapuava/PR (Figura 3-B) os resultados revelam que no momento de plantio (outubro/22) a precipitação foi acima de 80 mm, contudo, 10 dias após semeadura (novembro/22) houve uma queda de precipitação aliada a queda de temperatura (abaixo de 15 °C). Após esse período a precipitação permaneceu entre 20 e 70 mm, chegando a elevar-se durante o mês de março/23. Além disso, os dados indicam temperaturas amenas ao decorrer do desenvolvimento da cultura, mantendo-se em torno de 20 °C. Já a radiação solar apresentou comportamento semelhante aos demais locais, sendo de aproximadamente 350 w m⁻¹.

Analisando Abelardo Luz/SC no período de execução do experimento (Figura 3-C), o comportamento foi semelhante ao observado para Pato Branco/PR, devido à proximidade geográfica e de altitude. As temperaturas também não ultrapassaram os 30 °C, permanecendo entre 20 e 25 °C, e a radiação solar foi acima de 350 w m⁻¹. A semeadura foi realizada no fim de outubro/22, em condições de precipitação elevada, garantindo umidade para germinação ainda que nos 10 dias subsequentes (novembro/22) tenha ocorrido queda na precipitação (próximo a 0 mm). Após esse período a precipitação permaneceu entre 10 e 60 mm, principalmente entre janeiro e fevereiro/23, momento em que os caracteres de rendimento como vagens, número de grãos e peso de grãos foram definidos na cultura.

Figura 3 - Precipitação acumulada (mm), temperatura média do ar (°C) e radiação solar média (w m⁻¹) a cada 10 dias no período de execução do experimento em Pato Branco/PR (A), Guarapuava/PR (B) e Abelardo Luz/SC (C), na safra 2022/23



Fonte: Nasa Power (2023)

Tabela 3 - Data de plantio, data de início e final de florescimento, e dias após semeadura (DAS) por cultivares, observado nos locais Pato Branco/PR e Guarapuava/PR, na safra 2022/23

Cultivar	Data de plantio	Data início florescimento	Dias após plantio	Data final florescimento ¹
Pato Branco/PR				
BMX Raio	09/11/2022	19/12/2023	40 DAS	-
BMX Zeus	09/11/2022	23/12/2023	44 DAS	-
BMX Ativa	09/11/2022	06/01/2023	58 DAS	-
DM57I52	09/11/2022	06/01/2023	58 DAS	-
BMX Vênus	09/11/2022	04/01/2023	56 DAS	-
Guarapuava/PR				
BMX Raio	27/10/2022	22/12/2022	27 DAS	20/01/2023
BMX Zeus	27/10/2022	22/12/2022	27 DAS	20/01/2023
BMX Ativa	27/10/2022	03/01/2023	38 DAS	25/01/2023
DM57I52	27/10/2022	02/01/2023	37 DAS	30/01/2023
BMX Vênus	27/10/2022	01/01/2023	36 DAS	30/01/2023

Fonte: Autoria própria (2023)

Segundo a literatura, a temperatura ótima para o desenvolvimento da soja é de 25 a 30 °C, sendo que, temperaturas abaixo de 20 °C podem retardar a emergência, o desenvolvimento vegetativo e o florescimento, enquanto temperaturas acima de 30 °C diminuem o crescimento de entrenós e o número de nós (BERGAMIN; CANCIAN; CASTRO, 1999). Portanto, nos três locais estudados as temperaturas não foram elevadas, permanecendo entre 20 e 25 °C, não apresentando danos na emergência e desenvolvimento. Para precipitação verificou-se a ocorrência de uma boa distribuição de precipitação em todos os locais, principalmente em Guarapuava/PR.

O fator radiação solar foi semelhante nos três locais de condução. A incidência de luz solar é relacionada à atividade fotossintética, a alongação da haste principal e dos ramos secundários e a expansão foliar (BERGAMIN; CANCIAN; CASTRO, 1999). Esse fator apresentou maior impacto quando analisamos as diferentes densidades as quais as cultivares foram submetidas.

3.2 Influência da interação ambiente x densidade x cultivar no rendimento de grãos e caracteres agronômicos da soja

3.2.1 Rendimento de grãos

A análise de variância (Tabela 4) apresentou interação trifatorial significativa entre ambiente x densidade x cultivar para o carácter rendimento de grãos. O coeficiente de variação ficou abaixo de 10%, indicando boa precisão experimental.

Tabela 4 - Resumo da análise de variância para a variável rendimento de grãos (RG, em kg ha⁻¹), análise conjunta trifatorial para cinco densidades de plantas e cinco cultivares de soja em três locais

Causas de variação	GL	Quadrado médio
		Rendimento de grãos (kg ha ⁻¹)
Bloco	2	135997,02 ^{NS}
Ambiente	2	19659336,45*
Densidade	4	18062474,68*
Cultivar	4	6736580,30*
Ambiente * Densidade	8	2205633,91*
Ambiente * Cultivar	8	1175198,80*
Densidade * Cultivar	16	470611,43*
Ambiente * Densidade * Cultivar	32	683231,73*
Resíduo	148	142051,16*
Coefficiente de variação (%)	-	7,47

GL = grau de liberdade. *Significativo em nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste F. ^{NS} não significativo.

Autoria própria (2024)

Analisando o comportamento das cultivares de soja quando submetidas a variações na densidade de plantas e cultivadas em três locais (Figura 4), os resultados indicam que a cultivar BMX Raio em Pato Branco/PR apresentou ajuste linear crescente, de modo que, o

aumento na densidade de plantas levou ao incremento da produtividade de grãos, em que, a cada incremento de 30% na densidade o rendimento foi elevado em 286,70 kg ha⁻¹ (Figura 4-A).

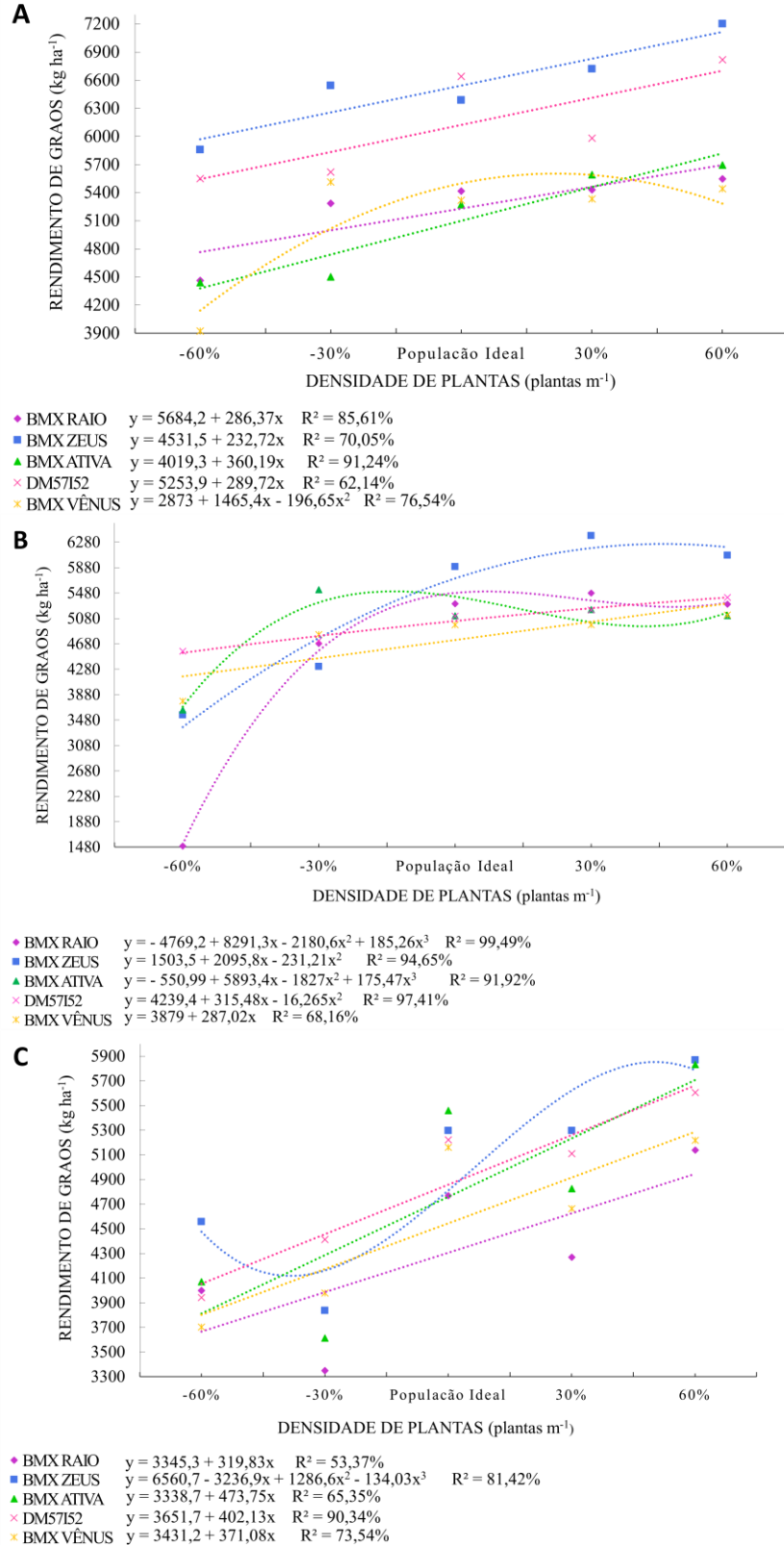
Em Guarapuava/PR a cultivar BMX Raio apresentou ponto de mínima eficiência técnica na menor densidade (6 plantas m⁻¹) produzindo 5.261,69 kg ha⁻¹, enquanto o ponto de máxima ocorreu na população ideal (15 plantas m⁻¹) produzindo 5.504,66 kg ha⁻¹ (Figura 4-B). Para Abelardo Luz/SC BMX Raio obteve ajuste linear crescente, demonstrando que o aumento na densidade de plantas elevou o rendimento de grãos em 319,83 kg ha⁻¹ a cada acréscimo no número de plantas (Figura 4-C). Portanto, em dois locais a cultivar apresentou maior rendimento de grãos nas maiores populações de plantas, com exceção para Guarapuava/PR em que o maior rendimento ocorreu na população ideal.

Para a cultivar BMX Zeus em Pato Branco/PR, os resultados demonstram ajuste linear crescente para RG, de modo que, o aumento de 60% na densidade elevou o rendimento de grãos em 232,72 kg ha⁻¹ com a adição de plantas (Figura 4-A). Em Guarapuava/PR a cultivar apresentou ponto de máxima eficiência com o incremento em 60% na densidade populacional (22 plantas m⁻¹), com rendimento de 6.252,84 kg ha⁻¹ (Figura 4-B). Em Abelardo Luz/SC a cultivar apresentou ponto de mínima eficiência com redução em 30% na população de plantas (10 plantas m⁻¹) com rendimento de 4.177,50 kg ha⁻¹, todavia, o ponto de máxima também foi observado com o incremento populacional de 60% (22 plantas m⁻¹), ou seja, na máxima densidade de plantas, produzindo 5.853,13 kg ha⁻¹ (Figura 4-C).

Desta forma, nos três locais estudados, a cultivar BMX Zeus apresentou maior produtividade por hectare quando submetida a maior densidade (22 plantas m⁻¹), bem como, independentemente do local, foi a cultivar com maior rendimento de grãos. Em estudo, Derreti et al. (2022) identificou que BMX Zeus quando submetida a reduções na densidade compensou produzindo mais ramos, número de vagens e grãos por planta, portanto, corroborando com os resultados do presente estudo, em que a cultivar apresentou maior produtividade (5.304 kg ha⁻¹), demonstrando que mesmo com redução na densidade o potencial produtivo foi alto.

Em Pato Branco/PR a BMX Ativa apresentou resposta linear crescente, deste modo, o incremento no número de indivíduos elevou a produtividade de grãos em 360,19 kg ha⁻¹ (Figura 4-A). Em Guarapuava/Pr a cultivar apresentou ponto de mínima eficiência técnica com 30% a mais de plantas (18 plantas m⁻¹) com rendimento de 4.956,46 kg ha⁻¹, por outro lado, o ponto de máximo foi observado com o uso da população ideal (14 plantas m⁻¹) alcançando produtividade de grãos de 5.506,65 kg ha⁻¹ (Figura 4-B).

Figura 4 - Regressões entre cinco densidades de plantas e cinco cultivares de soja nos locais Pato Branco/PR (A), Guarapuava/PR (B) e Abelardo Luz/SC (C), para a variável rendimento de grãos (RG, em kg ha^{-1})



Fonte: Autoria própria (2024)

Em contrapartida, a BMX Ativa em Abelardo Luz/SC apresentou comportamento semelhante ao observado em Pato Branco/PR, de modo que, o ajuste linear crescente indica aumento no rendimento de acordo com o aumento no número de plantas, ou seja, a cada 30% a mais de plantas ocorreu o acréscimo de 473,75 kg ha⁻¹ (Figura 4-C). Assim, observa-se que a cultivar apresentou maior rendimento quando submetida ao adensamento de plantas, exceto em Guarapuava/PR em que o potencial de rendimento foi alcançado na população ideal, enquanto o incremento de 30% na densidade ocasionou menor produtividade.

A cultivar DM57I52 apresentou ajuste linear crescente em Pato Branco/PR, portanto, o aumento na densidade de plantas ocasionou o aumento na produção de grãos por hectare, outrossim, a cada incremento na quantidade de plantas ocorreu incremento de 360,19 kg ha⁻¹ (Figura 4-A). Para Guarapuava/PR a cultivar possuiu ponto de máxima eficiência técnica com densidade acima de 60% (22 plantas m⁻¹), podendo alcançar produtividade de 5.767,70 kg ha⁻¹ (Figura 4-B), ou seja, a variedade apresentou possibilidade de continuar incrementando produtividade em densidades superiores as estudadas. Em Abelardo Luz/SC o comportamento foi semelhante ao identificado em Pato Branco/PR, em que o ajuste linear crescente indica incremento de 402,13 kg ha⁻¹ com a adição de plantas (Figura 4-C). De forma geral, a cultivar possui capacidade de produzir maior rendimento quando submetida as maiores densidades de plantas.

Observando a resposta de BMX Vênus em Pato Branco/PR, a cultivar apresentou ponto de máxima eficiência técnica com o incremento de 30% na densidade de plantas (16 plantas m⁻¹) produzindo 5.602,97 kg ha⁻¹ (Figura 4-A). Já em Guarapuava/PR e Abelardo Luz/SC o ajuste linear crescente demonstrou que o aumento na densidade de plantas foi associado ao aumento de rendimento de grãos, elevando em 287,02 e 371,08 kg ha⁻¹, respectivamente (Figuras 4-B e 4-C). Deste modo, seguindo a tendência das demais cultivares, BMX Vênus também apresentou aumento de rendimento quando submetida ao adensamento de plantas.

De modo geral, nos três locais as cultivares apresentaram incremento no rendimento de grãos com o aumento no número de plantas, de modo que, o potencial produtivo foi alcançado acima da população ideal, com exceções em que a máxima produtividade ocorreu na densidade recomenda. Também se observou que independente do hábito de crescimento e potencial de engalhamento, as cultivares responderam positivamente ao adensamento de plantas.

Diversos estudos relatam que o fator densidade de plantas apresenta pouco efeito sob o rendimento de grãos. Manda e Matta (2020) observaram rendimento constante em diferentes

densidades, inclusive, as cultivares apresentaram incapacidade de aumentar o rendimento em densidades elevadas. Neste sentido, Alves Costa (2020) não identificaram cultivares responsivas às variações na densidade, de modo que, o aumento na densidade de plantas não gerou aumento de produtividade, corroborando com os resultados encontrados por Moro et al. (2021), que relatam aumento dos custos de produção. Procópio et al. (2013) observou que o aumento na densidade provocou menor produção por indivíduo, mas compensou pela maior quantidade de plantas e pela produção de grãos na haste principal, contudo não alterando a produtividade, de modo que, a alteração na densidade apresentou pouca influência no rendimento de grãos.

Apesar dos resultados, alguns autores relatam queda de produtividade com o aumento na densidade de plantas. Machado et al. (2018) identificaram redução no rendimento de grãos utilizando como densidade máxima 18 plantas m^{-1} . Balbinot Junior et al. (2015a) descreveu aumento na produtividade devido as reduções na densidade de plantas, considerando que as altas densidades acentuam a competição entre as plantas, reduzindo a produção por indivíduo, não compensando o aumento no número de plantas na área. Por outro lado, alguns estudos descrevem resposta linear crescente da produtividade por hectare em função do aumento da densidade (BOMTEMPO et al., 2021; COSTA, 2013; DE LUCA et al., 2014; DE LUCA; HUNGRIA, 2014), enquanto a menor densidade de plantas apresentou menor rendimento, corroborando com os resultados encontrados no presente estudo.

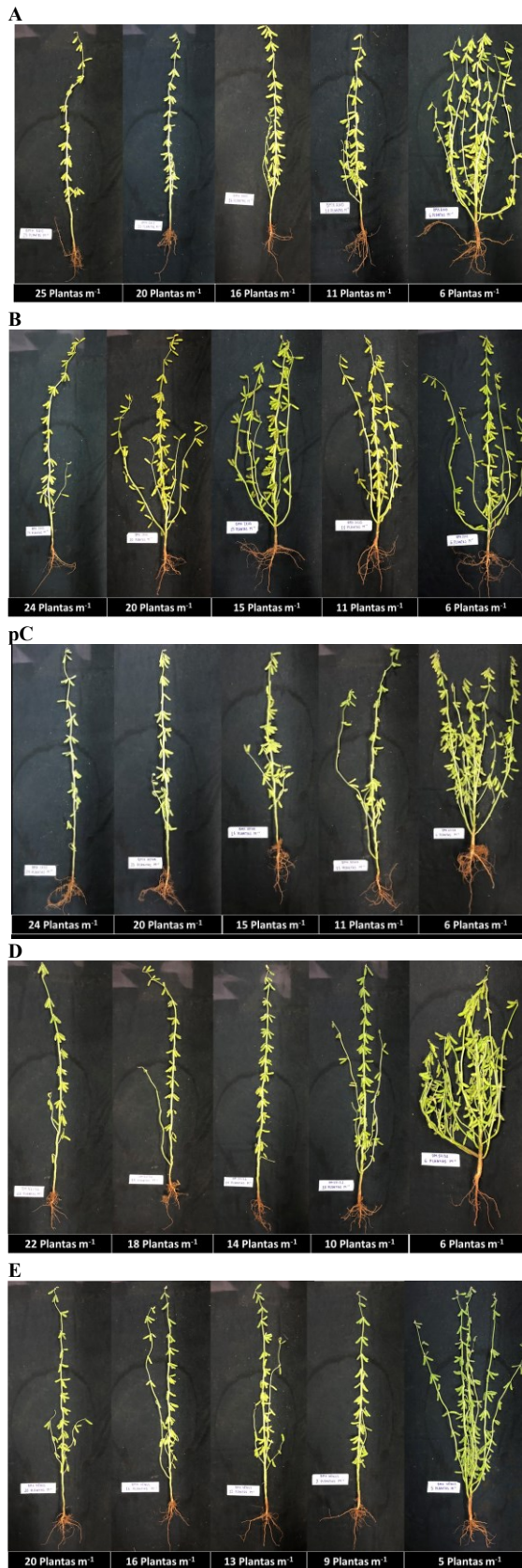
Segundo De Luca et al. (2014) a alta densidade de plantas resultou no aumento em 16% da produtividade, enquanto a diminuição de 75% na densidade populacional apresentou queda de 10% na produtividade, de mesmo modo, De Luca e Hungria (2014) observaram redução na produtividade na menor densidade. Outros autores relatam resposta quadrática para rendimento de grãos, com 7% a mais de produtividade com o aumento na densidade populacional, contudo, após alcançar o máximo rendimento a produtividade decaiu, com queda de aproximadamente 4% com o incremento de plantas (COX; CHERNEY, 2011; SCHMITZ, 2018).

Em suma, quanto mais favoráveis as condições de ambiente, menores são as densidades para expressão de alta produtividade, compensando a menor quantidade de plantas pelo maior crescimento e produção por planta (BOARD; KAHN, 2013). Contudo, os resultados encontrados apresentam resposta divergente da literatura, considerando a ausência de estresse nos três locais, somado as condições adequadas de manejo da cultura, bem como, as condições de altitude de Guarapuava/PR (1.111 m), as cinco cultivares apresentaram maior produtividade com densidades superiores a recomendada.

Utilizando como referência as plantas coletadas em Pato Branco/PR (Figura 5) para as cinco cultivares estudadas, observa-se que independente da capacidade de engalhamento, quando submetidas ao menor adensamento de plantas (entre 6 e 5 plantas m^{-1}) as variedades expressam elevado número de ramos. A cultivar BMX Zeus independente da densidade, apresentou maior número de ramos quando comparada as demais, exceto na menor densidade, em que todas apresentam haste única, pela perda de ramos devido a competição por recursos e espaço.

Portanto, os resultados de rendimento de grãos indicam que mesmo que as cultivares aumentem o número de ramos e vagens por indivíduo nas menores densidades, os maiores rendimento foram obtidos nas densidades 30% e 60% superior a densidade ideal, com exceções em que a máxima produtividade ocorreu ainda na população ideal.

Figura 5 – Arquitetura de plantas das cultivares BMX Raio IPRO (A), BMX Zeus IPRO (B), BMX Ativa RR (C), DM57152 IPRO (D) e BMX Vênus CE (E) submetidas às densidades de -60%, -30%, população ideal, 30% e 60%, respectivamente, em Pato Branco/PR, na safra 2022/23



Fonte: Autoria própria (2023)

Contudo, a recomendação de densidades acima e baixo da indicada para os genótipos requerem atenção. O custo de usar mais sementes e insumos implicam ambientalmente e socialmente na agricultura (DE LUCA et al., 2014). Densidades acima do recomendado contribuem no aumento do risco de acamamento e incidência de doenças devido ao adensamento de plantas (CARCIOCHI et al., 2019). Usar mais indivíduos implica no aumento dos custos de produção, pois o uso de mais sementes promove aumento no uso de insumos como inoculantes, micronutrientes, fungicidas e inseticidas utilizados no tratamento de sementes (BALBINOT JUNIOR et al., 2015b).

3.2.2 Caracteres agronômicos

De acordo com a análise de variância para os caracteres agronômicos (Tabela 5), observou-se interação significativa entre ambiente x densidade x cultivar para NVP, NGP e PMG, com exceção para NGVP que apresentou interação significativa entre densidade x cultivar e entre ambiente x cultivar. Todas as variáveis apresentaram coeficientes de variação abaixo de 10%, indicando boa precisão experimental.

Tabela 5 - Resumo da análise de variância para as variáveis número de vagens por planta (NVP), número de grãos por vagem por planta (NGVP), número de grãos por planta (NGP) e peso de mil grãos (PMG, em g) de acordo com a análise conjunta trifatorial para cinco densidades de plantas e cinco cultivares de soja em dois locais de condução

Causas de variação	GL	Quadrado médio			
		NVP	NGVP	NGP	PMG
Bloco	2	21,71 ^{NS}	0,02 ^{NS}	357,28 ^{NS}	33,40 ^{NS}
Ambiente	1	31118,40*	0,63*	219382,88*	1214,30*
Densidade	4	80064,85*	0,02*	461274,74*	345,36*
Cultivar	4	11683,26*	0,48*	44688,76*	13998,61*
Ambiente * Densidade	4	6157,46*	0,01 ^{NS}	41393,64*	56,33*
Ambiente * Cultivar	4	1772,02*	0,08*	8240,00*	148,18*
Densidade * Cultivar	16	1441,85*	0,01 ^{NS}	6620,32*	173,78*
Ambiente * Densidade * Cultivar	16	447,76*	0,01 ^{NS}	2489,51*	42,98*
Resíduo	98	25,18	0,01	95,30	22,99
Coefficiente de variação (%)	-	5,58	3,49	4,54	2,74

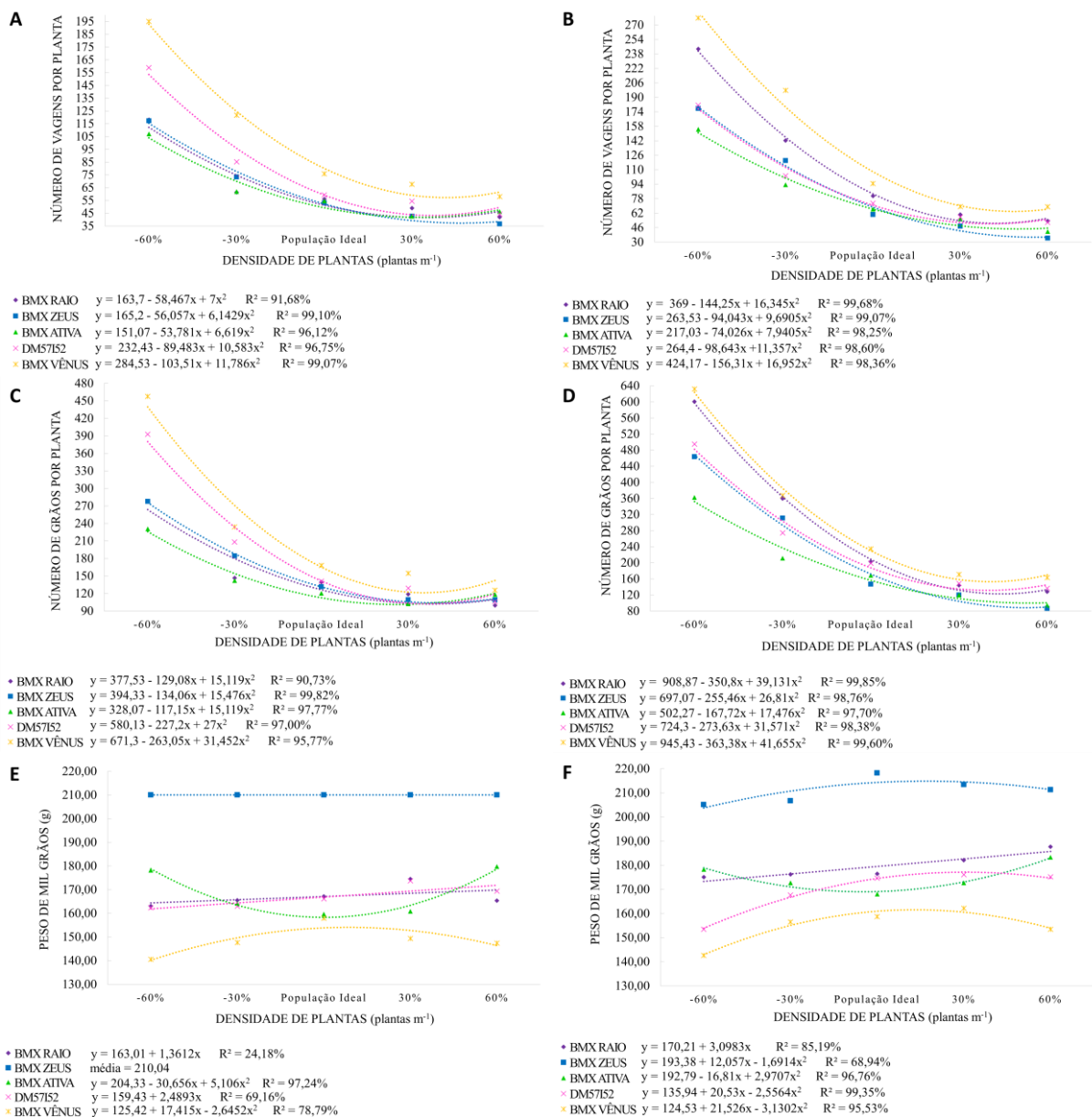
GL = grau de liberdade. *Significativo em nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste F. ^{NS} não significativo.

Autoria própria (2024)

Para os caracteres por planta com interação significativa (Figura 6), em Pato Branco/PR a cultivar BMX Raio apresentou ponto de mínima eficiência técnica com a adição de 30% na densidade de plantas (20 plantas m⁻¹), resultando em 42 vagens por planta (Figura 6-A) e 102 grãos por planta (Figura 6-C), enquanto para PMG o ajuste linear crescente indicou que o aumento na densidade populacional elevou o peso de grãos produzidos por planta, com incremento de 1,36 g a cada densidade avaliada (Figura 6-E).

Em Guarapuava/PR a cultivar obteve ponto de mínima com 30% a mais de plantas (19 plantas m⁻¹) produzindo 51 vagens planta⁻¹ (Figura 6-B) e 132 grãos planta⁻¹ (Figura 6-D), enquanto PMG apresentou ajuste linear crescente, indicando que o aumento no número de indivíduos elevou em 3,10 g o peso dos grãos (Figura 6-F). Assim, conclui-se que para BMX Raio a adição de indivíduos diminuiu a formação de vagens e grãos por planta, no entanto, elevou o PMG considerando que a planta passou a ter um menor número de vagens e grãos demandando por fotoassimilados.

Figura 6 - Regressões entre cinco densidades de plantas e cinco cultivares de soja em dois locais, para as variáveis número de vagens por planta (NVP), número de grãos por planta (NGP) e peso de mil grãos (PMG, em g). Pato Branco/PR = A, C e E; Guarapuava/PR = B, D e F



Fonte: Autoria própria (2024)

Para BMX Zeus em Pato Branco/PR, observou-se ponto de mínima eficiência técnica quando submetida a máxima densidade (24 plantas m^{-1}), produzindo 37 vagens (Figura 6-A), enquanto para NGP, o incremento de 30% na densidade (20 plantas m^{-1}) ocasionou ponto de mínima com 104 grãos por planta (Figura 6-C). Já o PMG não apresentou ajuste de equação, sendo o peso médio de 210,04 g (Figura 6-E), indicando que as variações de densidade não interferiram no peso dos grãos. Para Guarapuava/PR o ponto de mínima ocorreu com a máxima densidade (22 plantas m^{-1}) com produção de 35 vagens (Figura 6-B) e 90 grãos por planta (Figura 4-D), enquanto o PMG apresentou ponto de máxima eficiência com a população ideal (14 plantas m^{-1}) com 214,55 g (Figura 6-F).

Diante a isto, nas maiores densidades a cultivar BMX Zeus obteve menor produção de vagens e grãos devido ao maior adensamento, enquanto as variações no número de indivíduos tiveram pouco impacto sobre o peso dos grãos em Pato Branco/PR. Resultado divergente foi obtido por Derreti et al. (2022), no qual a cultivar apresentou regressão linear, de modo que, o aumento na densidade aumentou linearmente o PMG, assim, BMX Zeus obteve o maior peso de grão em todas as densidades e com PMG de 224 g na população ideal.

Para a cultivar BMX Ativa em Pato Branco/PR, verifica-se que o ponto de mínima eficiência ocorreu com a adição de 30% no número de plantas (20 plantas m^{-1}) com produção de 37 vagens (Figura 6-A), conseqüentemente, produzindo 101 grãos $planta^{-1}$ (Figura 6-C), em contrapartida, o PMG apresentou ponto de mínima com a população ideal (15 plantas m^{-1}) com 158,32 g (Figura 6-E). Em Guarapuava/PR a cultivar possuiu ponto de mínima com o máximo adensamento de plantas (22 plantas m^{-1}) acarretando na produção de 45 vagens (Figura 6-B) e 101 grãos $planta^{-1}$ (Figura 6-D). Assim como em Pato Branco/PR, o peso de mil grãos apresentou ponto de mínima eficiência na população ideal (14 plantas m^{-1}) com PMG de 169,10 g (Figura 6-F).

Portanto, BMX Ativa possui menor produção de vagens e grãos com densidades elevadas, enquanto na população ideal a cultivar apresentou menor peso de grãos. Uma possível explicação para baixo peso de grãos pode ser em decorrência da menor exploração do solo pelas raízes e/ou menor interceptação de radiação solar, mesmo que em densidades ideais ou abaixo desta (FERREIRA et al., 2020).

Os resultados para a cultivar DM57I52 em Pato Branco/PR indicam ponto de mínima eficiência técnica com 30% a mais de indivíduos (18 plantas m^{-1}) formando 43 vagens (Figura 6-) e 102 grãos $planta^{-1}$ (Figura 6-C), contudo, o PMG apresentou resposta linear crescente. O aumento na densidade de plantas ocasionou o aumento do peso de grãos, de modo que, a cada incremento na quantidade de plantas têm-se adição de 2,49 g (Figura 6-E).

Para Guarapuava/PR observou-se ponto de mínima também com densidade de 30% (16 plantas m^{-1}) formando 50 vagens (Figura 6-B), por conseguinte, 131 grãos (Figura 6-D), no entanto, nesta densidade também ocorre o ponto de máxima eficiência para PMG com 177,16 g (Figura 6-F). Deste modo, seguindo a tendência das cultivares indeterminadas, DM57152 apresenta menor quantidade de vagens e grãos quando submetida a 30% a mais de plantas, com PMG de 179 g.

Para BMX Vênus em Pato Branco/PR os resultados demonstram que o incremento de 30% na densidade de plantas (16 plantas m^{-1}) ocasionou ponto de mínima eficiência técnica de 57 vagens (Figura 6-A) e 121 grãos planta $^{-1}$ (Figura 6-C), no entanto, para o caractere PMG a densidade ideal (13 plantas m^{-1}) resulta no ponto de máxima eficiência com 153,86 g (Figura 6-E).

Analisando Guarapuava/PR observou-se que a adição de 60% no número de plantas (20 plantas m^{-1}) ocasionou ponto de mínima com 64 vagens (Figura 6-B), enquanto o incremento de 30% na densidade (16 plantas m^{-1}) apresenta menor produção de grãos com 158 grãos planta $^{-1}$ (Figura 6-D), em contrapartida, assim como em Pato Branco/PR, o PMG teve ponto de máxima na população ideal (13 plantas m^{-1}) com 160,94 g (Figura 6-F). Mediante a isso, compreende-se que variações de densidade acima da comumente utilizada ocasiona menor produção de vagens e grãos por planta, enquanto o uso da população recomendada em ambos os locais esteve associado ao ponto de máxima eficiência, com PMG de 166 g.

O caractere número de vagens por planta é um componente altamente associado às modificações no manejo (MUNDSTOCK; THOMAS, 2005), sendo assim, o aumento no número de vagens pode ser estimulado pelo aumento do número de nós, enquanto este é estimulado pela maior incidência de radiação solar no terço médio e inferior da planta, ocasionando maior fixação de flores e vagens (DERRETI et al., 2022; TAGLIAPIETRA et al., 2022).

Portanto, o adensamento de plantas ocasionado pela maior porcentagem de plantas por área diminuiu a entrada de radiação no baixeiro da planta, conseqüentemente, diminuindo o número de vagens por planta, de modo que, nas menores densidades têm-se maior formação de vagens, por conseguinte, maior formação de grãos por planta, considerando a maior incidência de radiação. Contudo, ao detectar competição por recursos, a soja apresenta capacidade de ajustar seu fenótipo, assim, em maiores densidades as plantas crescem como estratégia para interceptar radiação em qualidade e quantidade, resultando em menor

ramificação e menor formação de vagens por planta (COX; CHERNEY, 2011; FERREIRA et al., 2020).

Diversos estudos têm sido realizados para verificar a resposta das cultivares as variações na densidade de plantas. Na literatura, os resultados descritos para a cultura da canola identificaram que densidade de plantas e vagens por planta possuem relação negativa, de modo que, as vagens por planta diminuem à medida que a densidade é elevada (ASSEFA et al., 2018). Para a soja os estudos indicam comportamento semelhante, de modo que, o aumento na densidade de plantas diminui linearmente a quantidade de vagens produzidas por planta (MAUAD et al., 2010).

Neste sentido, menores densidades de plantas a soja apresenta maior número de ramos produtivos, conseqüentemente, maior número de vagens por planta, em contrapartida, o aumento na densidade eleva a competição pelos recursos e o crescimento vertical, produzindo menos ramos, por conseqüência, menor número de vagens por planta (BALBINOT JUNIOR et al., 2015). Ademais, nas maiores densidades os ramos apresentam baixa participação na produção de grãos por planta, devido ao rápido fechamento da copa criando um ambiente desfavorável a ramificação, portanto, a produção de grãos na planta depende da haste principal (FERREIRA et al., 2018; WERNER et al., 2021).

Portanto, Cox e Cherney (2011) descrevem resposta linear decrescente para o caractere NVP, na qual identificaram que sob menor densidade a soja produziu 27% a mais de vagens em relação a alta densidade, de modo que, o aumento de vagens por planta compensou a menor distribuição de indivíduos na área, enquanto Machado et al. (2018) mencionam que o aumento de 7 para 22 plantas m^{-1} reduziu o número total de vagens.

Alves Costa (2020) descreve como comportamento inversamente proporcional à densidade de plantas, de modo que, reduções de 20% sob a densidade recomendada produziram 34% a mais de vagens quando comparadas a populações 20% maiores. Balbinot Junior et al. (2015b) enfatizam que o aumento na densidade provocou reduções de 70% no número de vagens, atribuindo à menor densidade capacidade de compensação de rendimento, devido a maior produção de vagens por planta. Contudo, divergindo dos demais resultados, Ferreira et al. (2020) não identificou diferença significativa para número de vagens em relação a densidade populacional.

A respeito do número de grãos por planta, trata-se de um caractere agrônômico determinado pelas características genéticas, condições do ambiente e práticas de manejo, contudo, a variável resulta do número de vagens planta⁻¹ e número de grãos por vagem planta⁻¹ (TAGLIAPIETRA et al., 2022). Sendo assim, comumente, a soja cultivada sob maiores

densidades de plantas apresenta menor produção de vagens por planta, por consequência, estas produzem menor número de grãos por planta, em contrapartida, na baixa densidade de plantas eleva-se a produção de grãos (DE LUCA et al., 2014).

Em trabalho executado por Cox e Cherney (2011) o NGP apresentou resposta linear positiva à densidade de plantas, produzindo 31% a mais de grãos planta⁻¹ na menor densidade. Já Derreti et al. (2022) não identificou influência da população sobre o caractere, comprovando a forte ligação entre a variável e a genética, sendo pouco afetado pelas variações na densidade de plantas.

Outro caractere determinado geneticamente, mas com influência do ambiente e das práticas de manejo, é o peso de grãos (MACHADO et al., 2018). Deste modo, a escassez hídrica durante o enchimento de grãos ocasiona redução no tamanho e peso (COSTA, 2013). A baixa fertilidade, presença de insetos sugadores (BALBINOT JUNIOR et al., 2015b; TAGLIAPIETRA et al., 2022) e incidência de doenças foliares como a ferrugem asiática (*Phakopsora pachyrhizi*) também podem penalizar o peso dos grãos.

Quanto a densidade de plantas, estudos indicam que a redução na densidade de plantas aumentou o peso dos grãos, devido a menor competição intraespecífica por recursos do ambiente (DE LUCA; HUNGRIA; 2014; CARCIOCHI et al., 2019). Por outro lado, estudos relatam que em altas densidades, a redução no número de vagens e de grãos, eleva o tamanho e peso dos grãos (COSTA, 2013; DERRETI et al., 2022).

Entretanto, ainda que não observadas restrições hídricas e/ou incidência de doenças foliares e insetos no estágio de enchimento de grãos, os resultados demonstram uma tendência de aumento no PMG para a maioria das cultivares conforme variações na densidade de plantas, contudo, com peso abaixo do informado pela empresa obtentora, com exceção de BMX Zeus que manteve peso próximo ao indicado, sendo pouco influenciado pelas densidades estudadas.

Os resultados para PMG indicam tendência de aumento no peso dos grãos para a maioria das cultivares, conforme variações na densidade de plantas. No entanto, os pesos identificados no estudo são menores dos que os pesos informados pela empresa obtentora, com exceção de BMX Zeus que manteve peso próximo ao portfólio, sendo um caractere pouco influenciado pelas densidades estudadas.

Deste modo, as cultivares apresentaram redução no número de vagens e grãos por planta com o aumento na densidade de plantas, contudo, a redução de ambos os caracteres elevou o peso dos grãos. Assim, conforme observado para rendimento de grãos (Figuras 4-A e 4-B), em altas densidades a tendência foi a formação de plantas de haste única, com menor

número de vagens, conseqüentemente, de grãos, todavia, o caractere que eleva a produtividade é o PMG, resultando em maior rendimento de grãos por área.

Para a variável NGVP (Tabela 6) em Pato Branco/PR, a cultivar com maior número de grãos por vagem foi BMX Zeus com 2,6 grãos, enquanto a cultivar com menor NGVP foi BMX Ativa com 2,1 grãos vagem⁻¹. Em Guarapuava/PR o maior NGVP também ocorreu com BMX Zeus com 2,6 grãos, contudo, não diferindo de DM57I52. Em Guarapuava/PR as cultivares apresentam maior NGVP quando comparado a Pato Branco/PR, com exceção para BMX Raio e BMX Zeus que não diferiram entre os locais. Assim como observado por Derreti et al. (2022), a cultivar BMX Zeus apresentou excelente NGVP, com 2,7 grãos por vagem.

Tabela 6 - Comparação de médias da variável número de grãos por vagem por planta (NGVP), de acordo com a interação significativa entre ambiente x cultivar

Cultivar	NGVP	
	Pato Branco/PR	Guarapuava/PR
BMX Raio	2,4 bA*	2,4 bA
BMX Zeus	2,6 aA	2,6 aA
BMX Ativa	2,1 cB	2,4 bA
DM57I52	2,4 bB	2,6 aA
BMX Vênus	2,3 bB	2,4 bA

*Médias seguidas da mesma letra, minúsculas na vertical e maiúsculas na horizontal, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Fonte: Autoria própria (2024)

O número de grãos por vagem é um componente determinado geneticamente, pouco afetado pelo ambiente, considerando que em média uma vagem forma de dois a três grãos, podendo produzir no mínimo 1 grão e no máximo 5 grãos vagem⁻¹ (BALBINOT JUNIOR et al., 2015b; COSTA, 2013; DERRETI et al., 2022; FERREIRA et al., 2020; MUNDSTOCK; THOMAS, 2005). A nível de ambiente, este carácter é influenciado pelo estresse hídrico durante os estádios R2 e R5 e pela presença de insetos sugadores como os percevejos (TAGLIAPIETRA et al., 2022), no entanto, ambas as situações não foram identificadas durante o desenvolvimento do experimento.

Entretanto, estudos descrevem influência da densidade de plantas sobre o NGVP, de modo que, densidades com 18 plantas m⁻¹ reduziram o número de grãos por vagem (MACHADO et al., 2018). Neste sentido, observou-se resposta linear negativa em função do aumento da população de plantas, evidenciando que o número de grãos se relaciona com o número de vagens, assim, a redução no total de vagens afeta diretamente o número de grãos vagem⁻¹ (MAUAD et al., 2010), por outro lado, a redução drástica no número de plantas eleva o número de grãos por vagem (FERREIRA et al., 2016; 2020). Contudo, Balbinot Junior et al. (2015b) identificou que o NGVP não variou entre as densidades, indicando forte influência do genótipo, enquanto o manejo afetou pouco o caractere.

3.2.3 Caracteres agronômicos da haste principal

A análise de variância dos caracteres agronômicos da haste principal (Tabela 7) demonstram interação significativa entre ambiente x densidade x cultivar para os caracteres M100GH, NVHm² e NGHm², enquanto NVH e NGH apresentaram interação significativa entre densidade x cultivar, todavia, apenas NVH apresentou interação significativa entre densidade x ambiente. A variável resposta NGVH não apresentou interação significativa entre os fatores estudados, no entanto, apresentou significância do efeito principal para os fatores ambiente e cultivar. Todos os caracteres apresentaram coeficiente de variação dentro do aceitável, indicando boa precisão experimental.

Tabela 7 - Resumo da análise de variância para as variáveis número de vagens na haste principal (NVH), número de grãos por vagem na haste principal (NGVH), número de grãos na haste principal (NGH), massa de 100 grãos na haste principal (M100GH, em g), número de vagens na haste principal por metro quadrado (NVHm²) e número de grãos na haste principal por metro quadrado (NGHm²) de acordo com a análise conjunta trifatorial para cinco densidades de plantas e cinco cultivares de soja em dois locais

Causas de variação	GL	Quadrado médio					
		NVH	NGVH	NGH	M100GH (g)	NVHm ²	NGHm ²
Bloco	2	14,90 ^{NS}	0,00 ^{NS}	286,48*	0,26 ^{NS}	1644,22 ^{NS}	23929,98 ^{NS}
Ambiente	1	3266,67*	0,21*	13594,56*	19,82*	9177791,57*	38047987,44*
Densidade	4	1485,81*	0,03 ^{NS}	9543,09*	15,49*	11857323,00*	75747121,03*
Cultivar	4	304,81*	0,13*	3210,86*	154,83*	933490,72*	7588024,25*
Amb * Dens	4	33,22*	0,01 ^{NS}	84,14 ^{NS}	1,78*	254093,95*	751191,35*
Amb * Cult	4	24,42 ^{NS}	0,01 ^{NS}	456,58*	0,42 ^{NS}	111001,62*	1043216,08*
Dens * Cult	16	25,72*	0,02 ^{NS}	231,69*	1,17*	59549,17*	591365,34*
Amb * Dens * Cult	16	11,68 ^{NS}	0,03 ^{NS}	104,74 ^{NS}	1,06*	38501,36*	487773,80*
Resíduo	98	12,86	0,02	75,37	0,36	4497,07	14908,58
CV (%)	-	7,85	4,99	7,65	3,28	3,71	2,7

CV (%) = coeficiente de variação. GL = grau de liberdade. *Significativo em nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste F. ^{NS} não significativo.

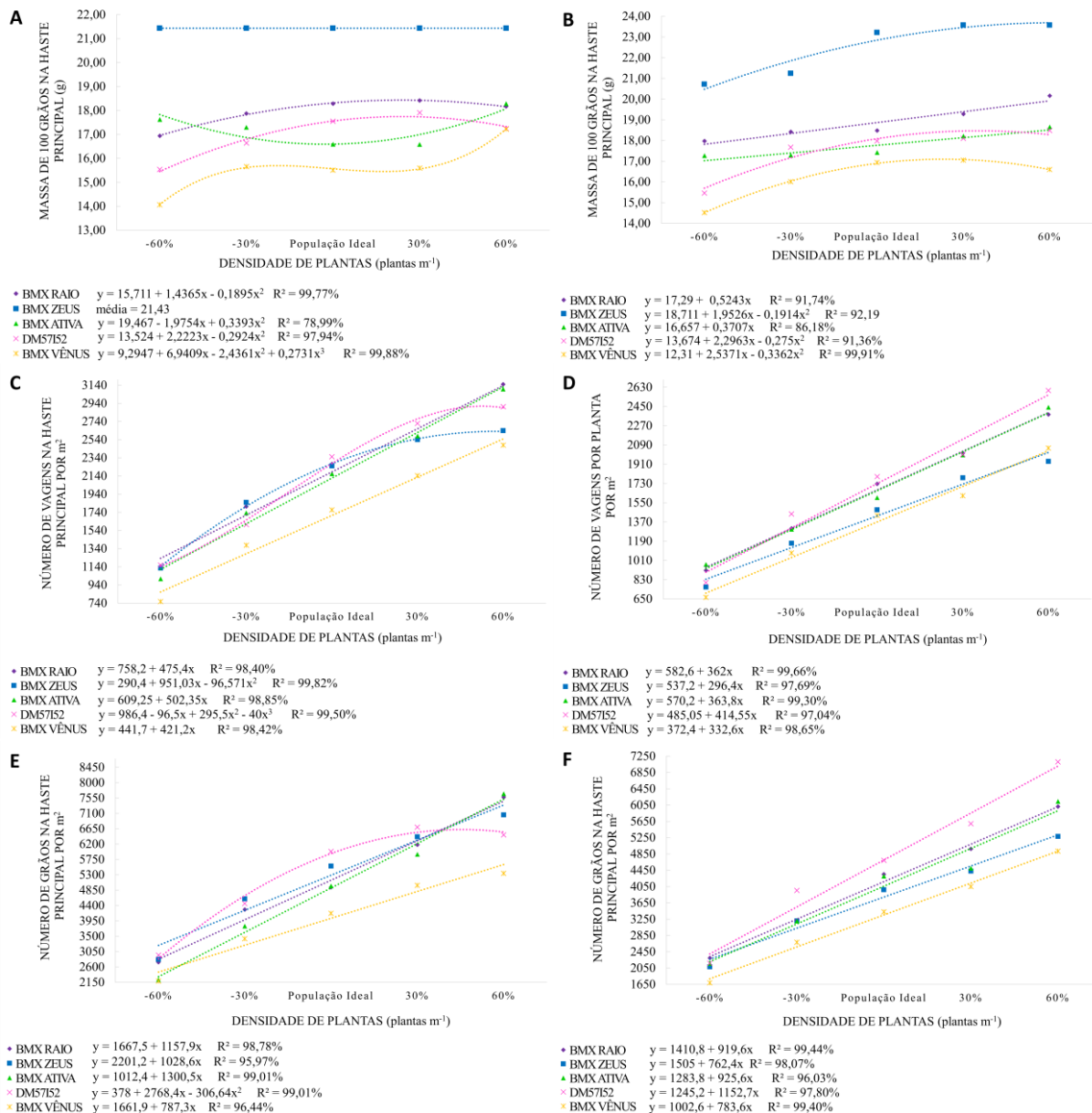
Autoria própria (2024)

Observando os resultados para massa de 100 grãos produzidos no caule principal, os resultados indicam que em Pato Branco/PR a cultivar BMX Raio apresentou ponto de máxima eficiência técnica na densidade com acréscimo de 30% no número de plantas (20 plantas m⁻¹), com massa de grãos de 18,43 g (Figura 7-A). Analisando a produção de vagens e grãos m⁻² os resultados demonstram que a produção de vagens na haste aumentou com o aumento na porcentagem de plantas, um acréscimo de 475,4 vagens m⁻¹ (Figura 7-C), por conseguinte, o número de grãos também apresentou aumento linear com o incremento na densidade, onde, a cada densidade adicionada, acrescenta-se a formação de 1.157,9 grãos m⁻² (Figura 7-E).

Em Guarapuava/PR a resposta linear crescente demonstra que para BMX Raio o acréscimo na quantidade de plantas está diretamente associada ao acréscimo na massa de grãos da haste, um aumento de 0,52 g a cada 30% a mais de plantas (19 plantas m⁻¹) (Figura

7-B), do mesmo modo, o aumento na densidade eleva linearmente o NVHm² em 362 vagens por m² (Figura 7-D) e a produção de NGHm² em 919,6 grãos m⁻² (Figura 7-F) a cada incremento no número de plantas na área.

Figura 7 - Regressões entre cinco densidades de plantas e cinco cultivares de soja em dois locais, para as variáveis massa de 100 grãos na haste principal (M100GH, em g), número de vagens na haste principal por metro quadrado (NVHm²) e número de grãos na haste principal por metro quadrado (NGHm²). Pato Branco/PR = A, C e E; Guarapuava/PR = B, D e F



Fonte: Autoria própria (2024)

Em resumo, observa-se que para BMX Raio o adensamento de plantas eleva a competição pelos recursos do ambiente, diminuindo a formação nos ramos e concentrando a produção dos componentes de rendimento na haste principal, neste caso, os grãos apresentam maior peso. Além disso, o incremento na densidade de plantas elevou a produção de vagens

por m^2 e conseguinte, dos grãos por m^2 , assim, considerando que estes apresentam maior massa, compreende-se que apesar da contribuição por indivíduo ser menor, no adensamento de plantas têm-se maior produtividade a nível de área, corroborando com os resultados identificados para rendimento de grãos (Figuras 4-A e 4-B), os quais demonstram maior RG com densidades de 30 e 60% a mais de plantas.

Para BMX Zeus em Pato Branco/PR, a cultivar não apresentou ajuste de equação, assim, nas densidades estudadas a variável M100GH não foi alterada, com massa média de grãos de 21,43 g (Figura 7-A), contudo, a cultivar apresentou ponto de máxima eficiência técnica para NVHm² quando disposta a máxima densidade de plantas (24 plantas m^{-1}) (Figura 7-C), além de incremento linear no número de grãos de 1.028,6 grãos m^{-2} com o aumento na densidade populacional (Figura 7-E). Para Guarapuava/PR o ajuste quadrático indicou ponto de máxima eficiência técnica na máxima densidade (22 plantas m^{-1}) com massa de grãos de 23,69 g (Figura 7-B), enquanto o aumento na densidade de plantas resultou no crescimento linear da produção de vagens em 296,4 vagens/ m^2 (Figura 7-D) e de grãos em 762,4 grãos/ m^2 (Figura 7-F).

De modo geral, BMX Zeus apresentou maior massa de grãos quando comparada as demais cultivares. Ademais, assim como BMX Raio, a cultivar apresentou tendência de aumento na massa dos grãos com o incremento no número de plantas em Guarapuava/PR, porém, em Pato Branco/PR não houve diferença entre os tratamentos. Quanto a produção de vagens e grãos por área, o incremento na densidade elevou a produção de ambos os caracteres agrônômicos, o que explica a maior produtividade de grãos ter sido observada na maior densidade populacional (Figuras 4-A e 4-B), para estas cultivares.

Para a cultivar BMX Ativa em Pato Branco/PR, verifica-se ponto de mínima eficiência técnica na população ideal (15 plantas m^{-1}), com valor mínimo de 14,98 g nos grãos formados na haste principal (Figura 7-A), todavia, para a produção de vagens e grãos por m^2 observa-se resposta linear crescente, indicando que o adensamento de plantas ocasionou aumento da produção de NVHm² em 502,03 vagens (Figura 7-C) e de NGHm² em 1.300,5 grãos (Figura 7-E) a cada incremento de 30% no número de plantas.

Em Guarapuava/PR o aumento na densidade de plantas associou-se positivamente ao aumento na M100GH em 0,371 g (Figura 7-B), assim como, elevou a produção de vagens m^{-2} em 363,8 vagens (Figura 7-D) e de grãos m^{-2} em 925,6 grãos (Figura 7-F). Em resumo, os resultados demonstram que para BMX Ativa, conforme observado para as demais cultivares, o aumento no número de indivíduos na área elevou a produção de vagens e grãos por m^2 , devido a menor contribuição dos ramos, inclusive a não formação de ramos, de modo que,

maior rendimento de grãos ocorreu com o acréscimo de 30 e 60% de plantas na população (Figuras 4-A e 4-B).

Em Pato Branco/PR, para DM57I52 observa-se ponto de máxima eficiência na população de plantas com acréscimo de 30% (18 plantas m^{-1}) para o caractere M100GH com 17,75 g (Figura 7-A), enquanto para a formação de vagens por m^2 observa-se ponto de mínima eficiência na mínima densidade (6 plantas m^{-1}) com formação de 978 vagens m^{-2} e ponto de máxima na maior densidade (22 plantas m^{-1}) produzindo 2.908 vagens m^{-2} (Figura 7-C), conseqüentemente, para NGHm² o ponto de máxima também ocorre com o adensamento de 22 plantas m^{-1} , com produção de 6.626 grãos m^{-2} (Figura 7-E).

Em Guarapuava/PR comportamento semelhante foi identificado para M100GH, de modo que, o ponto de máxima eficiência ocorre com o incremento em 30% na densidade populacional (16 plantas m^{-1}) com massa de 18,47 g (Figura 7-B), enquanto que para NVHm² e NGHm² observa-se resposta linear crescente, indicando que o aumento no número de plantas ocasionou maior produção de vagens no caule, especificamente, um aumento de 414,55 vagens m^{-2} (Figura 7-D) e 1.152,7 grãos m^{-2} (Figura 7-C) a cada acréscimo na porcentagem de plantas.

Para DM57I52 o incremento em 30% na densidade de plantas foi suficiente para gerar maior massa de grãos, no entanto, assim como nas demais cultivares, ao elevar o número de indivíduos a planta passa a concentrar a formação de estruturas reprodutivas (flores, vagens e grãos) unicamente na haste principal, e elevou a massa dos grãos produzidos no caule. Ademais, ao aumentar a população de plantas também se eleva a produção de vagens e grãos m^{-2} , de modo que, associados ao aumento da massa de grãos, resultam em maior produtividade (Figuras 4-A e 4-B) por área, mesmo que apresentem menor produtividade por indivíduo.

A cultivar BMX Vênus em Pato Branco/PR apresentou para M100GH ponto de máxima eficiência técnica com redução em 30% na densidade de plantas (9 plantas m^{-1}) com 15,70 g, em contrapartida, o ponto de mínima ocorreu com o acréscimo de 30% na população (16 plantas m^{-1}) com 15,45 g (Figura 7-A), enquanto para os demais caracteres analisados a resposta linear crescente indica que o aumento na densidade de plantas elevou a produção de vagens em 421,2 g (Figura 7-C) e de grãos em 787,3 (Figura 7-E) por m^2 .

Por outro lado, em Guarapuava/PR o ponto de máxima eficiência para M100GH ocorreu com 30% a mais de plantas (16 plantas m^{-1}) com massa de 17,10 g (Figura 7-B), enquanto o ajuste linear crescente indicou que o aumento na densidade de plantas ocasionou

maior formação de vagens e grãos na haste m^{-2} , sendo este acréscimo de 332,6 vagens (Figura 7-D) e 783,6 grãos (Figura 7-C).

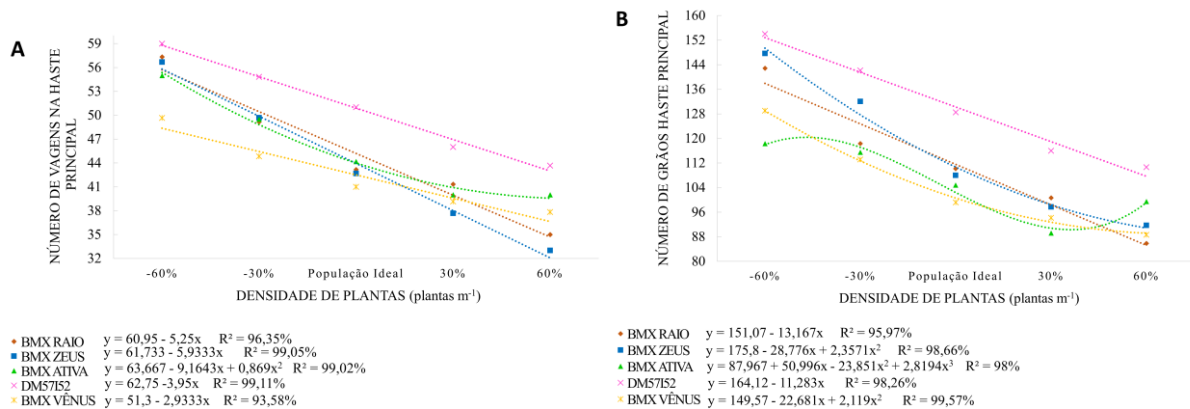
Quanto ao comportamento de BMX Vênus, os locais apresentaram resultados divergentes entre si para M100GH, sendo que, em Pato Branco/PR a maior massa de grãos ocorreu com a redução de 30% de plantas e a menor massa com acréscimo populacional de 30%. Possivelmente o resultado apresentado em Pato Branco/PR seja uma resposta a outros fatores além dos estudados, como problemas de emergência, estande de plantas e danos causados por animais (lebres), levando a análises e conclusões errôneas.

Considerando a influência do ambiente sobre a massa de grãos (COSTA, 2013) e a relação fonte-dreno (BUENO, 2023), na qual alterações na atividade das folhas influenciam o abastecimento dos grãos próximos, os resultados para massa de grãos na haste indicam que ao elevar a densidade eleva-se a massa, mesmo que a quantidade de folhas tenha diminuído com o adensamento de plantas, não afetando o enchimento de grãos.

A respeito do aumento no número de vagens e grãos por área observado com o adensamento de plantas, em especial analisando os resultados na haste principal, compreendemos o maior rendimento de grãos relatado nas densidades acima da ideal, considerando que o rendimento está linearmente correlacionado com o número de grãos por área (COSTA, 2013). Segundo Werner et al. (2021) o número de vagens e grãos m^{-2} diminuem na haste com a diminuição na densidade de plantas, enquanto eleva-se nos ramos, independentemente do tipo de crescimento e estatura de planta. Neste sentido, o aumento no número de plantas na área ocasiona maior número de hastes do que ramos, aumentando a participação do caule principal no rendimento de grãos (FERREIRA et al., 2016; WERNER et al., 2021).

Na interação entre densidade e cultivares para as variáveis NVH e NGH, verificou-se para BMX Raio ajuste linear decrescente para ambos os caracteres, portanto, o incremento no número de plantas ocasionou queda de 5,25 vagens no NVH (Figura 8-A), conseqüentemente, diminuindo a produção de grãos em 13,17 grãos (Figura 8-B). Enquanto para BMX Zeus, os resultados indicaram resposta linear decrescente para NVH, de modo que, o aumento na porcentagem de plantas diminuiu em 5,93 vagens no caule (Figura 8-A), enquanto para NGH o ponto de mínima eficiência técnica ocorreu na máxima densidade (entre 22 e 24 plantas m^{-1}) com produção de 88 grãos (Figura 8-B).

Figura 8 - Regressões entre cinco densidades de plantas e cinco cultivares de soja, para as variáveis número de vagens na haste principal (NVH, A) e número de grãos na haste principal (NGH, B)



Fonte: Autoria própria (2024)

Para BMX Ativa observou-se ponto de mínima eficiência técnica na máxima densidade de plantas (entre 22 e 24 plantas m^{-1}) com produção de 40 vagens (Figura 8-A), por conseguinte, para NGH o ponto de mínima eficiência ocorreu com o incremento em 30% na densidade populacional (entre 18 e 20 plantas m^{-1}) produzindo 90 grãos, enquanto o ponto de máxima ocorreu na menor densidade (6 plantas m^{-1}) alcançando a produção de 120 grãos haste $^{-1}$ (Figura 8-B).

Para DM57I52 observou-se resposta linear decrescente para ambas as variáveis, de modo que, o incremento no número de plantas diminuiu a produção de vagens e grãos na haste principal, em 3,95 vagens e 11,28 grãos, respectivamente. Na cultivar BMX Vênus observou-se ajuste linear decrescente para NVH, de modo que, o incremento no número de plantas diminuiu a produção de vagens no cule (Figura 8-A), enquanto, para NGH os resultados indicam que o ponto de mínima produção de grãos ocorreu na máxima densidade (20 plantas m^{-1}) com 89 grãos (Figura 8-B). Ademais, DM57I52 destacou-se como a cultivar com maior produção de vagens e grãos entre as cinco cultivares estudadas.

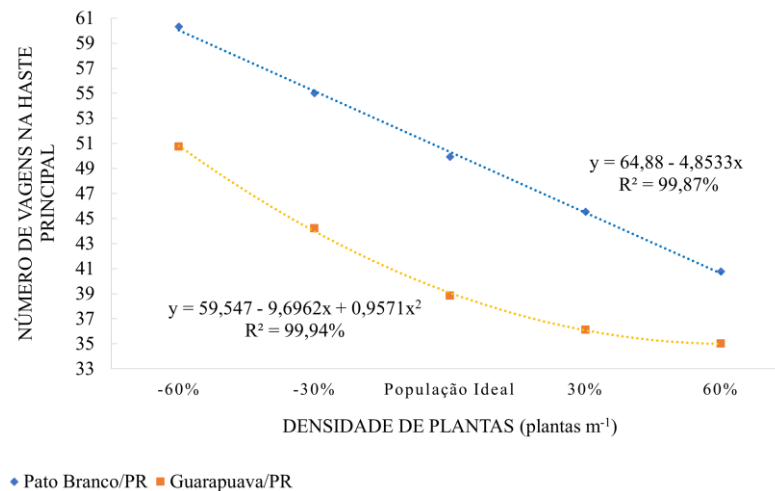
Mediante a isto, trabalhos enfatizam que o número de vagens na haste reduziu à medida que a densidade de plantas foi elevada, indicando que em altas densidades há redução da produção de vagens, consequentemente, de grãos produzidos em função da competição intraespecífica (DERETTI et al., 2022; FERREIRA et al., 2018). Entretanto, resultados divergentes foram encontrados por Procópio et al. (2013), sendo que, a redução na densidade de plantas diminuiu a produção dos componentes de rendimento nas hastes, corroborando com os identificados no presente estudo.

De forma geral, as cinco cultivares apresentaram comportamento semelhante para os caracteres agrônômicos da haste, demonstrando que o incremento no número de plantas acarretou na redução no número de vagens e de grãos no caule principal, em contrapartida, ao

e elevar a densidade de plantas também se elevou a produção de vagens e grãos por área e a massa dos grãos. Concluiu-se, portanto, que em altas densidades as cultivares estudadas obtiveram menor produção dos caracteres NVH e NGH por indivíduo, contudo, considerando a população de plantas m^{-2} estas produziram vagens e grãos suficientes e com maior massa para aumentar a produtividade.

Em relação a interação densidade x ambiente para o caractere NVH (Figura 9), em Pato Branco/PR, observou-se resposta linear decrescente indicando que o aumento na densidade de plantas ocasionou queda no número de vagens na haste, sendo assim, a cada incremento de planta as cultivares perderam em média 4,9 vagens $haste^{-1}$, enquanto em Guarapuava/PR os resultados demonstram que o ponto de mínima eficiência técnica ocorreu com o incremento em 60% na densidade populacional (entre 20 e 24 plantas m^{-1}), portanto, o número de vagens produzidos foi de 35 vagens. Em suma, o aumento no número de plantas reduziu a produção de vagens na haste, corroborando com os resultados observados por Balbinot Junior et al. (2015b).

Figura 9 - Regressões entre cinco densidades de plantas e dois locais de produção, para a variável número de vagens na haste principal (NVH)



Fonte: Autoria própria (2024)

Ao analisar a comparação de médias para o fator isolado cultivar (Tabela 8) para o caractere NGVH, a cultivar com maior número de grãos nas vagens foi BMX Zeus com 2,8 grãos $vagem^{-1}$, porém, não diferindo estatisticamente de DM57I52, enquanto as demais cultivares apresentaram menor produção, não diferindo entre si (2,6 grãos $vagem^{-1}$).

Tabela 8 - Comparação de médias da variável número de grãos por vagem na haste principal (NGVH), de acordo com a significância individual para o fator cultivar

Cultivar	NGVH
BMX Raio	2,6 b
BMX Zeus	2,8 a
BMX Ativa	2,6 b
DM57152	2,7 a
BMX Vênus	2,6 ab

*Médias seguidas da mesma letra, minúsculas na vertical, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Fonte: Autoria própria (2024)

Neste sentido, a comparação de médias para o fator isolado ambiente de produção (Tabela 9) para NGVH indicam que em Guarapuava/PR o número de grãos nas vagens foi de 2,7, enquanto em Pato Branco/PR esse valor foi de 2,6 grãos vagem⁻¹, novamente, indicando que, por mais que a análise indique diferença estatística entre os dois ambientes, o valor não é expressivo. Segundo Balbinot Junior et al. (2015b), a média dos grãos por vagem na haste assemelha-se aos valores identificados para número de grãos/vagem por planta, conforme observado no presente estudo. Ademais, em Pato Branco/PR, observou-se maior NGH com 123,03 grãos, diferindo de Guarapuava/PR com 103,99 grãos.

Tabela 9 - Comparação de médias das variáveis número de grãos por vagem na haste principal (NGVH) e número de grãos na haste principal (NGH), de acordo com a significância individual para o fator local

Locais	NGVH	NGH
Pato Branco/PR	2,6 b	123,03 a
Guarapuava/PR	2,7 a	103,99 b

*Médias seguidas da mesma letra, minúsculas na vertical, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Fonte: Autoria própria (2024)

3.2.4 Caracteres agronômicos dos ramos

Para os caracteres agronômicos dos ramos (Tabela 10), observou-se interação significativa entre ambiente x densidade x cultivar para NRP, NGVR, NGR, M100GR, NVRm² e NGRm². Os coeficientes de variação apresentaram boa precisão experimental, exceto a variável NRP.

Tabela 10 - Resumo da análise de variância para as variáveis número de ramos por planta (NRP), número de grãos por vagem nos ramos (NGVR), número de grãos nos ramos (NGR), massa de 100 grãos nos ramos (M100GR, em g), número de vagens nos ramos por metro quadrado (NRPm²) e número de grãos nos ramos por metro quadrado (NGRm²) de acordo com a análise conjunta trifatorial para cinco densidades de plantas e cinco cultivares de soja em dois locais

Causas de variação	GL	Quadrado médio					
		NRP	NGVR	NGR	M100GR (g)	NVRm ²	NGRm ²
Bloco	2	0,26 ^{NS}	0,05 ^{NS}	12,54 ^{NS}	0,11 ^{NS}	670,62 ^{NS}	1018,62 ^{NS}
Ambiente	1	371,31*	15,84*	337322,17*	1,95*	44418148,33*	258892830,00*
Densidade	4	105,52*	5,45*	338928,60*	0,39 ^{NS}	8762805,33*	49789809,40*
Cultivar	4	19,37*	1,51*	48835,52*	132,76*	10061018,97*	38606326,08*
Amb * Dens	4	1,66 ^{NS}	1,19*	45083,93*	1,11*	1363605,01*	7859452,60*
Amb * Cult	4	3,37*	0,77*	9227,09*	2,92*	1870421,21*	9865053,71*
Dens * Cult	16	1,78*	0,72*	5768,09*	2,43*	394540,46*	822563,71*
Amb * Dens * Cult	16	1,83*	0,48*	2190,39*	1,42*	232985,47*	1229863,13*
Resíduo	98	0,82	0,02	10,67	3,08*	2555,15	3817,90
CV (%)	-	24,05	7,27	3,2	4,02	4,13	2,28

CV (%) = coeficiente de variação. GL = grau de liberdade. *Significativo em nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste F. ^{NS} não significativo.

Autoria própria (2024)

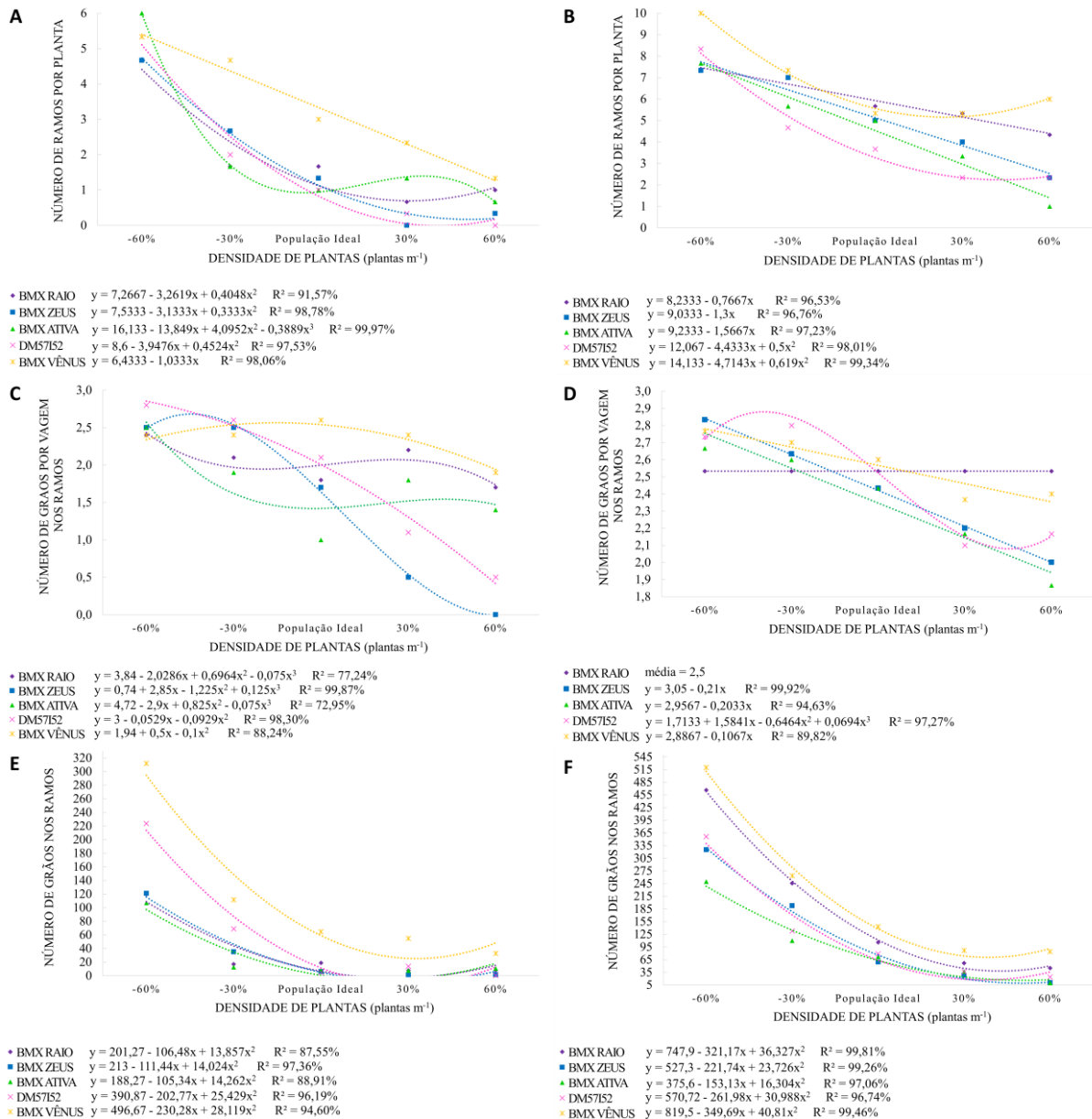
Na cultivar BMX Raio para as variáveis NRP, NGVR, NGR e M100GR, em Pato Branco/PR observou-se ponto de mínima eficiência técnica com o incremento em 30% na densidade de plantas (20 plantas m⁻¹) com produção de 1 ramo por planta (Figura 10-A), por consequência, não houve produção de grãos (Figura 10-E). Quanto a M100GR observa-se que o incremento no número de indivíduos apresentou queda de 0,37 g na massa de grãos (Figura 10-A), ademais, quanto ao NGVR, a cultivar apresentou ponto de mínima com a redução em 30% na densidade (11 plantas m⁻¹), formando 1,9 grãos vagem⁻¹ e maior produção de grãos por vagem com a adição de 30% de plantas (20 plantas m⁻¹), formando 2,1 grãos vagem⁻¹ (Figura 10-C).

Para Guarapuava/PR a cultivar apresentou redução no número de ramos com o aumento na densidade, representando uma queda de 0,8 ramos a cada adição de 30% de plantas (Figura 10-B) e menor produção de grãos com o incremento em 30% na densidade populacional (19 plantas m⁻¹) com 44 grãos (Figura 10-F), enquanto o NGVR e M100GR não apresentaram variações em seus resultados, com produção média de 2,5 grãos vagem⁻¹ (Figura 10-D) e massa média de grãos de 17,22 g em todas as densidades estudadas (Figura 11-B).

Portanto, para BMX Raio o adensamento de plantas, resultante do aumento da população, ocasionou plantas com reduzida formação de ramos. Nas maiores densidades a cultivar apresentou menor engalhamento, chegando a apresentar haste única devido a competição por recursos, principalmente radiação solar. Entretanto, para M100GR e NGVR, os dois locais apresentaram resultados divergentes, sendo que, em Pato Branco/PR o incremento na quantidade de plantas impactou em uma menor massa de grãos, enquanto

aumentou o número de grãos $vagem^{-1}$, por outro lado, em Guarapuava/PR a variação na densidade não apresentou influência nos caracteres.

Figura 10 - Regressões entre cinco densidades de plantas e cinco cultivares de soja em dois locais para as variáveis número de ramos por planta (NRP), número de grãos por vagem nos ramos (NGVR) e número de grãos nos ramos (NGR). Pato Branco/PR = A, C e E; Guarapuava/PR = B, D e F



Fonte: Autoria própria (2024)

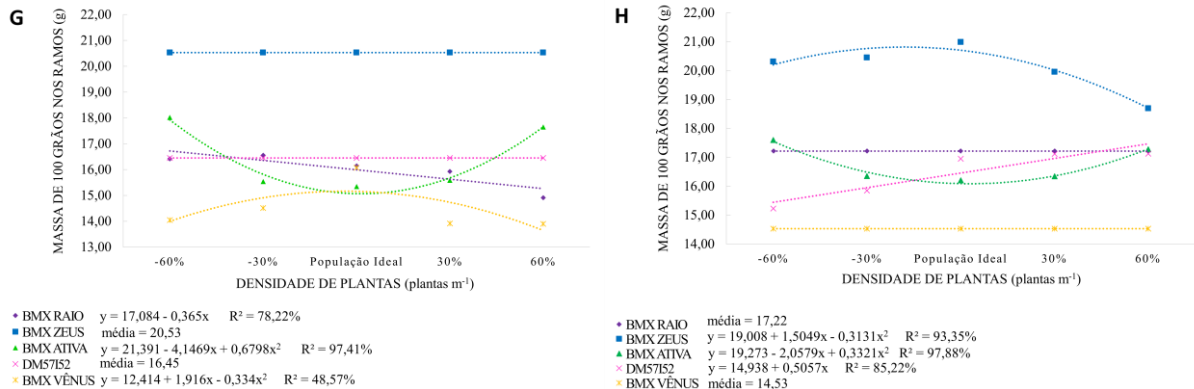
Em Pato Branco/PR a cultivar BMX Zeus apresentou ponto de mínima eficiência técnica quando submetida a máxima densidade populacional ($24 \text{ plantas m}^{-1}$), não produzindo ramos na planta (Figura 10-A), consequentemente, não produziu grãos $vagem^{-1}$ (Figura 10-C), contudo, a redução em 30% na densidade de plantas ($11 \text{ plantas m}^{-1}$) apresentou ponto de máxima eficiência produzindo 2,7 grãos por vagem. Ademais, o incremento em 30% no número de plantas ($20 \text{ plantas m}^{-1}$) ocasionou ponto de mínima para NGR, outrossim, não

produzindo grãos (Figura 10-E), enquanto a massa de grãos não alterou com as variações na densidade, apresentando média de 20,53 g (Figura 11-A).

Figura 11 - Regressões entre cinco densidades de plantas e cinco cultivares de soja em dois locais, para a variável massa de 100 grãos (M100GR, em g). Pato Branco/PR = A; Guarapuava/PR = B

A

B



Fonte: Autoria própria (2024)

Para Guarapuava/PR a cultivar BMX Zeus demonstrou queda de 1,3 ramos por planta (Figura 10-B) e de 0,2 grãos vagem⁻¹ (Figura 10-D) com o incremento na densidade de plantas, além de que, a máxima densidade (22 plantas m⁻¹) pode ser associada ao ponto de mínima para NGR com produção de 12 grãos (Figura 10-F), todavia, o ponto de máxima ocorreu com a redução em 30% (9 plantas m⁻¹) no número de plantas, alcançando massa de grãos de 20,82 g (Figura 11-B).

Neste sentido, compreende-se que para BMX Zeus o aumento na densidade de plantas diminuiu a formação de ramos na planta, consequentemente, reduziu o número de grãos nos ramos, considerando inclusive a possibilidade de não formar ramos. Os resultados indicam que nas menores densidades a cultivar apresenta maior formação de grãos vagem⁻¹, possivelmente pela maior entrada de luz na planta contribuindo no desenvolvimento dos componentes de rendimento, induzindo a formação de ramos, por conseguinte, de vagens, de grãos e grãos por vagem, com maior massa de grão, de modo que, os dados demonstram que o oposto também é aplicável, ao ponto de que o aumento na densidade de plantas diminuiu a formação de grãos por vagem e diminui a massa dos grãos.

Observando o comportamento de BMX Ativa em Pato Branco/PR, a cultivar apresentou ponto de mínima eficiência técnica com a população ideal (15 plantas m⁻¹) produzindo 1 ramo por planta, por outro lado, o ponto de máxima ocorreu com menos de 30% na quantidade de plantas (11 plantas m⁻¹) produzindo 2 ramos por planta (Figura 10-A), por conseguinte, o NGVR e M100GR apresentaram ponto de mínima também na população ideal,

com produção de 1,4 grãos vagem⁻¹ (Figura 10-C) e massa de 15,07 g (Figura 11-A). No entanto, os resultados indicaram que a adição em 30% a mais de plantas (20 plantas m⁻¹) associou-se ao ponto de máxima eficiência, com formação de 1,5 grãos vagem⁻¹, porém, quando observa-se o NGR com o aumento em 30% no número de indivíduos não há formação de grãos (Figura 10-E).

Para Guarapuava/PR o aumento na densidade populacional ocasionou redução de 1,6 ramos por planta (Figura 10-B) e redução de 0,20 grãos nas vagens (Figura 10-D), por conseguinte, na máxima densidade (22 plantas m⁻¹) ocorreu ponto de mínima no NGR com formação de 18 grãos nos ramos (Figura 10-E), e assim como em Pato Branco/PR, o ponto de mínima para M100GR ocorreu com o uso da população ideal (14 plantas m⁻¹) com massa de grãos de 16,08 g (Figura 11-B).

Mediante a isso, verifica-se que para BMX Ativa em Pato Branco/PR a população ideal ocasionou pontos de mínima eficiência técnica para NRP, NGVR e M100GR, ao ponto de que a redução na densidade aumentou a formação de ramos, enquanto a adição de plantas ocasionou redução do número de grãos, assim, reduzindo a participação dos ramos na produtividade por planta. Contudo, em Guarapuava/PR, a cultivar demonstrou que o incremento na quantidade de plantas reduziu a formação de ramos e de grãos/vagem, enquanto na máxima densidade não há formação de grãos provenientes dos ramos, todavia, o uso da população ideal foi associado à redução na massa dos grãos.

Na cultivar DM57I52 em Pato Branco/PR, observou-se ponto de mínima eficiência técnica com o aumento de 30% na densidade populacional (18 plantas m⁻¹) não produzindo ramos (Figura 10-A) e não formando grãos (Figura 10-E), por outro lado, na mínima densidade (6 plantas m⁻¹) a cultivar apresentou ponto de máxima eficiência com a formação de 3 grãos por vagem (Figura 10-C), enquanto a massa de grãos não sofreu alterações ao ser submetida as densidades estudadas, mantendo média de 16,45 g (Figura 11-A).

Em Guarapuava/PR a cultivar apresentou ponto de mínima também com o aumento de 30% na densidade (16 plantas m⁻¹) produzindo 2 ramos por planta (Figura 10-B), enquanto a adição de 60% na população (20 plantas m⁻¹) ocasionou ponto de mínima para NGVR e NGR, com formação de 2,1 grãos vagem⁻¹ (Figura 11-D) e 36 grãos ramos⁻¹ (Figura 10-F). Neste sentido, a redução em 30% no número de indivíduos (9 plantas m⁻¹) gerou ponto de máxima eficiência para NGVR com formação de 2,9 grãos vagem⁻¹, por sua vez, a massa de grãos apresentou ajuste linear crescente indicando aumento de 0,51 g a cada incremento de 30% na densidade de plantas (Figuras 10-F e 11-B).

Nos dois locais de condução a cultivar DM57I52 apresentou menor formação de ramos, de grãos e de grãos por vagem com o incremento de plantas acima da densidade ideal, ao ponto de que, a redução da densidade resultou em maior formação de grãos vagem⁻¹. Porém, para o caractere M100GR observa-se comportamento divergente, sendo que em Pato Branco/PR não houve diferença na massa dos grãos nas densidades estudadas, enquanto em Guarapuava/PR o aumento no número de plantas ocasionou aumento na massa de grãos.

A cultivar BMX Vênus em Pato Branco/PR apresentou resposta linear decrescente para NRP, de modo que, a adição de plantas na população ocasionou queda de 1 ramo por planta (Figura 10-A), bem como, para NGR, a adição em 30% na densidade (16 plantas m⁻¹) gerou ponto de mínima eficiência com produção de 25 grãos nos ramos (Figura 10-E), enquanto, o ponto de máxima para NGVR e M100GR ocorreu na população ideal (13 plantas m⁻¹), formando 2,5 grãos por vagem (Figura 10-C) e massa de 15,16 g (Figura 11-A).

Analisando a cultivar em Guarapuava/PR observa-se ponto de mínima para NRP e NGR com o incremento de 30% (16 plantas m⁻¹) na quantidade de plantas, produzindo 5 ramos por planta (Figura 10-B) e um total de 74 grãos (Figura 10-F), assim como, a adição na quantidade de plantas diminuiu a produção de grãos por vagem em 0,11 (Figura 10-D), contudo, a massa de grãos não foi alterada com as variações de densidade, apresentando média de 14,53 g (Figura 11-B).

Deste modo, para BMX Vênus observou-se que o adensamento de plantas diminuiu a formação de estruturas secundárias, devido a competição intraespecífica das plantas por recursos ambientais, conseqüentemente, os ramos não contribuem nos componentes de rendimento nas maiores densidades populacionais, e quando forma ramos e grãos, estes apresentam redução na massa de grão. Em contrapartida, nas menores densidades os resultados indicam comportamento inverso, considerando que o maior espaçamento para seu desenvolvimento morfológico, a planta produz mais ramos, por conseguinte, formando maior volume de grãos. Entretanto, em Guarapuava/PR o caractere M100GR não apresentou alteração nas densidades estudadas.

Desta forma, considerando que as cinco cultivares estudadas apresentaram comportamento semelhante para os caracteres agronômicos para ramos, compreende-se que o aumento no número de plantas ocasionou menor formação do número de ramos ou ausência destes, em consequência, diminuindo a produção de vagens e grãos, de modo que, os ramos apresentaram menor participação na produtividade de grãos (Figuras 4-A e 4-B), em contrapartida, ao elevar a densidade a participação dos componentes produzidos na haste influenciaram mais no rendimento.

A literatura corrobora que a formação de ramos varia com a cultivar, a nutrição, a disponibilidade de recursos como água, temperatura e incidência de luz no baixeiro, assim como, pelo espaço disponível, de forma que uma planta pode produzir de zero a oito ramos (MUNDSTOCK; THOMAS, 2005; TAGLIAPIETRA et al., 2022), portanto, mesmo sendo uma característica determinada geneticamente, os fatores ambientais e o manejo influenciam em sua formação (BUENO, 2023; MACHADO et al., 2018).

Deste modo, os estudos informam que quanto maior o adensamento de plantas menor o número de ramos, considerando a menor disponibilidade dos recursos devido a maior competição por água e nutrientes, mas principalmente pela menor incidência de luz no baixeiro da planta, de modo que, as plantas até conseguem produzir ramos, mas estes são estruturas pequenas, improdutivas ou com baixa formação de vagens e grãos (BALBINOT JUNIOR et al., 2018).

Por outro lado, ao diminuir a população de plantas muda-se o cenário, elevando-se a formação de ramos mesmo em cultivares com baixa capacidade de ramificação, atribuída a maior incidência de radiação no baixeiro, maior espaçamento para o desenvolvimento das estruturas e menor competição pelos recursos do ambiente, ademais, ramos produtivos garantem estrutura para a formação de vagens e grãos (BUENO, 2023), considerando sua relação direta entre número de ramos com número de vagens na planta (DERRETI et al., 2022; TAGLIAPIETRA et al., 2022).

Estudos indicam a formação de 20% a mais de ramos por planta nas densidades mais baixas, formando 2,5 ramos planta⁻¹, enquanto em altas densidades a formação foi de 2,05 ramos planta⁻¹ (BOARD, 2000; COX; CHERNEY, 2011). Sendo assim, o aumento na população resultou na redução do número de ramos, resultado atribuído a menor disponibilidade dos recursos por indivíduo (BALBINOT JUNIOR et al., 2015a; BOMTEMPO et al., 2021; MACHADO et al., 2018; PROCÓPIO et al., 2013). Ademais, o maior número de ramos por planta em baixas densidades elevam a participação dos ramos na produtividade, demonstrando que o principal mecanismo de compensação em densidades reduzidas é a emissão de ramos e a formação de ramos maiores (BALBINOT JUNIOR et al., 2015b).

Neste sentido, Mauad et al. (2010) observou resposta linear negativa para número de ramos, considerando que a competição intraespecífica por recursos determina a maior ou menor quantidade de ramos, de modo que, nas maiores densidades o excessivo número de plantas diminuiu a disponibilidade de fotoassimilados para a formação dos ramos, portanto, a planta direciona maior parte dos fotoassimilados no desenvolvimento do caule principal,

consequentemente, aumentando a altura e diminuindo a emissão de ramos laterais. Werner et al. (2016) corrobora que o número de ramos por planta diminuiu linearmente com o aumento da densidade populacional.

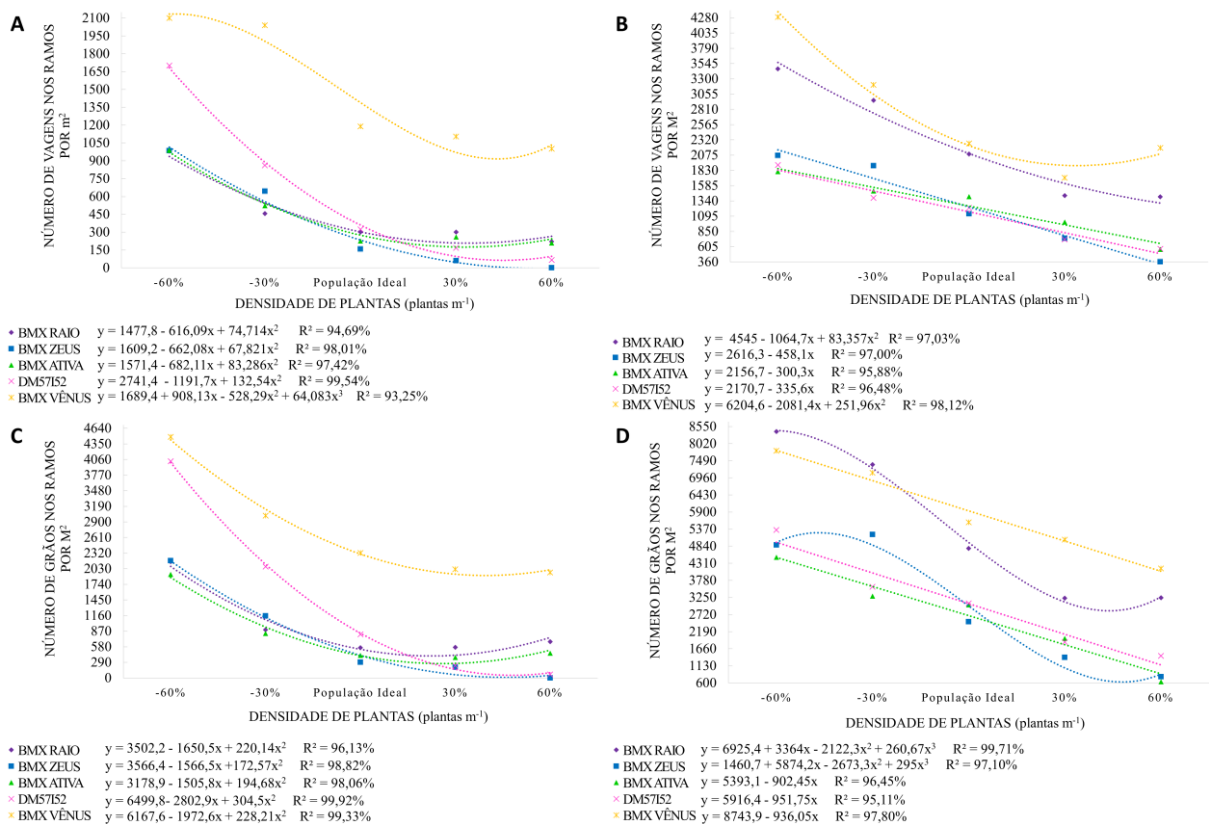
Quanto a produção de grãos nos ramos, diversos trabalhos indicam que o aumento na densidade de plantas reduziu o número de vagens e de grãos nos ramos, enquanto a redução na densidade aumentou a produção de ambos os caracteres (FERREIRA et al., 2018; WERNER et al., 2021). Segundo Procópio et al. (2013) a redução na quantidade de plantas elevou a produção de vagens, consequentemente, o número de grãos, com contribuição de 31,40% no PMG, enquanto na maior densidade a contribuição dos ramos foi de 13,30%.

Os resultados publicados também indicam que a redução na densidade de plantas eleva a massa dos grãos, devido a maior disponibilidade de água, nutrientes e luz, possibilitando a maior produção por indivíduo e maior número de ramos (BALBINOT JUNIOR et al., 2015a; 2015b; BOARD; KAHN, 2013; FERREIRA et al., 2018; DE LUCA; HUNGRIA, 2014). Entretanto, Procópio et al. (2013) apresenta resposta divergente, considerando que a porcentagem de grãos nos ramos é maior em baixas densidades, assim, têm-se menor demanda por fotoassimilados quando comparado ao caule, justificando a maior massa de grãos produzidos nos ramos em altas densidades.

Comparando os resultados quanto a produção de vagens e grãos nos ramos, entretanto, considerando a produção por metro quadrado (Figura 12), observou-se em Pato Branco/PR que a cultivar BMX Raio para o caractere $NVRm^2$ apresentou ponto de mínima eficiência técnica com o acréscimo em 30% no número de plantas ($20 \text{ plantas m}^{-1}$), formando $208 \text{ vagens m}^{-2}$ (Figura 12-A), por conseguinte, $NGRm^2$ apresentou ponto de mínima na mesma densidade, produzindo 409 grãos m^{-2} (Figura 12-C).

Para Guarapuava/PR a cultivar apresentou ponto de mínima eficiência para $NVRm^2$ quando submetida a máxima densidade ($24 \text{ plantas m}^{-1}$) produzindo $1.305 \text{ grãos m}^{-2}$ (Figura 12-B), todavia, para $NGRm^2$ a cultivar apresentou ponto de mínima com o incremento em 30% na população de plantas ($19 \text{ plantas m}^{-1}$) com $2.839 \text{ grãos m}^{-2}$ e ponto de máxima com a mínima densidade (6 plantas m^{-1}) com produção de $8.430 \text{ grãos m}^{-2}$ (Figura 12-D).

Figura 12 - Regressões entre cinco densidades de plantas e cinco cultivares de soja em três locais, para as variáveis número de vagens nos ramos secundários por metro quadrado (NVRm²) e número de grãos nos ramos secundários por metro quadrado (NGRm²). Pato Branco/PR = A e C; Guarapuava/PR = B e D



Fonte: Autoria própria (2024)

Para a cultivar BMX Zeus os resultados demonstraram que em Pato Branco/PR o NVRm² possuiu ponto de mínima eficiência na maior densidade de plantas (24 plantas m⁻¹), não formando vagens (Figura 12-A) e grãos (Figura 12-C). Para Guarapuava/PR a cultivar apresentou comportamento linear decrescente, sendo que, o aumento na densidade diminuiu a produção de vagens/m² (Figura 12-B), enquanto NGRm² indicou ponto de mínima eficiência na máxima densidade populacional (22 plantas m⁻¹) com formação de 629 grãos m⁻² e ponto de máxima na mínima densidade (5 plantas m⁻¹) produzindo 5.257 grãos m⁻² (Figura 12-D).

Para a cultivar BMX Ativa em Pato Branco/PR, os resultados demonstraram ponto de mínima eficiência técnica com o acréscimo em 30% na população (20 plantas m⁻¹), formando 175 vagens m⁻² (Figura 12-A) e 267 grãos m⁻² (Figura 12-C), enquanto em Guarapuava/PR observou-se que o acréscimo na porcentagem de plantas possui comportamento linear decrescente, assim, o aumento no número de plantas diminuiu em 300,3 vagens (Figura 12-B) e 902,45 grãos por m² (Figura 12-D).

Analisando DM57I52 em Pato Branco/PR quanto a variável NVRm², o ponto de mínima eficiência técnica ocorreu com a adição em 30% na quantidade de plantas (18 plantas

m^{-1}) produzindo 175 vagens m^{-2} (Figura 12-A), enquanto para $NGRm^2$ a adição de 60% a mais de plantas (22 plantas m^{-1}) gerou ponto de mínima com produção de 50 grãos nos ramos (Figura 12-C). Para Guarapuava/PR verificou-se comportamento linear decrescente para a produção de vagens por m^{-2} , de modo que, ao aumentar a densidade de plantas ocorre uma redução de 335,6 vagens m^{-2} (Figura 12-B), conseqüentemente, diminuindo em 951,75 grãos por m^2 (Figura 12-B), de modo que, ao elevar o número de indivíduos, diminui-se a formação de vagens e grãos na área.

Por fim, para BMX Vênus em Pato Branco/PR, a adoção de densidade 30% superior a população ideal (16 plantas m^{-1}) apresentou ponto de mínima eficiência para $NVRm^2$ formando 916 vagens, enquanto na mínima densidade de plantas (5 plantas m^{-1}) a cultivar alcançou o ponto de máxima com 2.135 vagens m^{-2} (Figura 12-A), mediante a isto, para $NGRm^2$ o ponto de mínima ocorreu também com o uso de 30% a mais de plantas, formando 1.905 grãos m^2 (Figura 12-C). Em Guarapuava/PR a cultivar apresentou ponto de mínima com a adição em 30% na população de plantas (18 plantas m^{-1}), com 1.906 vagens m^{-2} (Figura 12-B), enquanto para $NGRm^2$ a resposta linear decrescente indica que o aumento na densidade diminuiu a formação de grãos nos ramos (Figura 12-D).

Em suma, os resultados para haste e ramos corroboram com os identificados na literatura, sendo que, o principal mecanismo de compensação da soja é o incremento na quantidade de vagens devido a maior contribuição dos ramos, demonstrando a capacidade de alterações na morfologia e dos caracteres agronômicos pela alta plasticidade fenotípica da soja. Neste sentido, o caractere número de vagens nos ramos é determinante para cultivares com crescimento indeterminado (BALBINOT JUNIOR et al., 2018). No entanto, nas altas densidades as plantas diminuem a participação dos ramos, aumentando a contribuição da haste principal na produção por planta, enquanto nas menores densidades os ramos são as estruturas mais significativa (FERREIRA et al., 2018; FERREIRA et al., 2020; WERNER et al., 2021).

De acordo com Werner et al. (2021) a redução na densidade elevou o número de vagens m^{-2} , em contrapartida, Derreti et al. (2022) menciona que a redução na densidade não afetou o número de vagens por área ou o rendimento de grãos, apesar de incrementar o número de vagens nos ramos, indicando que a soja suporta reduções sem afetar a produtividade. Contudo, no presente estudo os resultados demonstram que a redução na densidade de fato elevou a produção de vagens nos ramos, mas também afetou o número de vagens na área, especialmente o rendimento, indicando que as cultivares analisadas foram afetadas pela baixa densidade de plantas.

Portanto, todas as cultivares analisadas para os dois locais apresentaram resposta semelhante para as variáveis estudadas. Portanto, o aumento na população de plantas acima da densidade ideal ocasionou menor formação de vagens e grãos nos ramos, consequência da baixa capacidade de ramificação das plantas quando submetidas a um menor espaçamento enquanto competem por água, nutrientes e radiação para completar seu ciclo de desenvolvimento. Deste modo, compreende-se que ao reduzir o número de plantas na área, têm-se uma maior produção dos caracteres agrônômicos por indivíduo, ocasionada pela capacidade de compensação da soja em aumentar a produção dos componentes de rendimento nestas condições.

Todavia, quando comparamos o comportamento dos mesmos caracteres na haste principal e nos ramos, associando aos resultados apresentados para rendimento de grãos (Figuras 4-A e 4-B), estabelece-se uma relação de que, por mais produtiva que uma planta seja quando cultivada em baixa densidade, a produtividade por indivíduo não é suficiente para compensar o baixo número de plantas por área, por isso, a máxima produtividade foi alcançada com o uso de alta densidade de plantas.

3.2.5 Altura de planta, distância entrenós e número de nós por planta

Conforme a análise de variância para os caracteres gerais altura de planta, distância entrenós e número de nós na haste (Tabela 11), não houve interação significativa entre os três fatores estudados, no entanto, verificou-se interação significativa entre densidade x cultivar para ALTP e NNP, entre ambiente x densidade para ALTP e DISTEN, bem como, interação entre ambiente x cultivar para as três variáveis respostas. Quanto ao coeficiente de variação, os caracteres apresentaram baixo coeficiente, indicando boa precisão experimental.

Tabela 11 - Resumo da análise de variância para as variáveis altura de planta (ALTP, em m), distância entrenós (DISTEN, em cm) e número de nós por planta (NNP), de acordo com a análise conjunta trifatorial para cinco densidades de plantas e cinco cultivares de soja em dois locais

Causas de variação	GL	Quadrado Médio		
		ALTP (m)	DISTEN (cm)	NNP
Bloco	2	0,00 ^{NS}	0,56 ^{NS}	0,35 ^{NS}
Ambiente	1	0,25*	0,03 ^{NS}	43,74*
Densidade	4	0,04*	9,03*	22,04*
Cultivar	4	0,43*	5,62*	157,41*
Ambiente * Densidade	4	0,01*	1,98*	2,67 ^{NS}
Ambiente * Cultivar	4	0,05*	0,91*	8,40*
Densidade * Cultivar	16	0,00*	0,30 ^{NS}	3,54*
Ambiente * Densidade * Cultivar	16	0,00 ^{NS}	0,34 ^{NS}	1,21 ^{NS}
Resíduo	98	0,00	0,27	1,29
Coefficiente de variação (%)	-	3,37	8,20	9,07

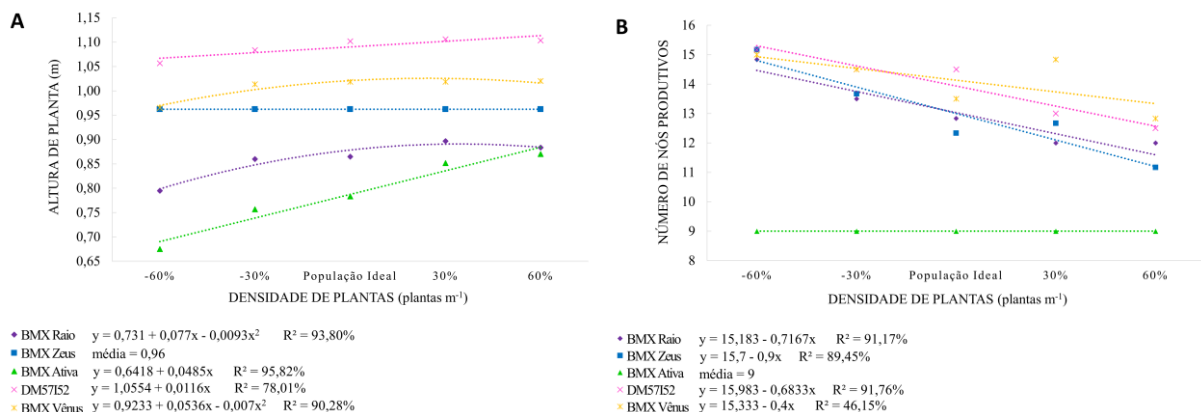
GL = grau de liberdade. *Significativo em nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste F. ^{NS} não significativo.

Autoria própria (2024)

Para os caracteres ALTP e NNP (Figura 13), os resultados indicam que para BMX Raio o caractere altura de planta possui ponto de máxima eficiência técnica com o acréscimo de 30% na densidade de plantas (20 plantas m⁻¹) acarretando plantas com 0,89 cm (Figura 13-A) e resposta linear decrescente para NNP, de modo que, o incremento no número de plantas diminuiu o número de nós produtivos na haste principal em 0,7 nós (Figura 13-B).

Neste sentido, observou-se resultado semelhante para BMX Vênus, considerando que a cultivar apresentou ponto de máxima eficiência técnica com a adição de 30% sobre a população ideal (16 plantas m⁻¹), desenvolvendo plantas com 1,03 cm de altura (Figura 13-A), enquanto para NNP o incremento na densidade populacional ocasionou menor número de nós, outrossim, diminuindo-se em 0,4 nós planta⁻¹ (Figura 13-B).

Figura 13 - Regressões entre cinco densidades de plantas e cinco cultivares de soja, para as variáveis altura de planta (ALTP, em m = A) e número de nós por planta (NNP = B)



Fonte: Autoria própria (2024)

Assim sendo, ambas as cultivares apresentam maior altura de planta com o incremento populacional de 30%, demonstrando que o adensamento ocasiona plantas mais

altas devido a competição intraespecífica por recursos, enquanto a adição de plantas diminui a quantidade de nós produtivos no caule, acarretando menor produção de vagens e grãos.

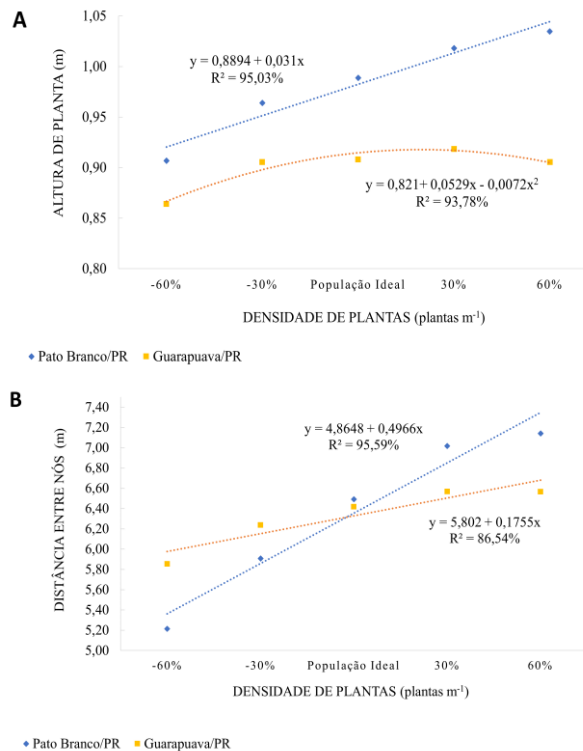
Resultado semelhante foi observado para DM57152, considerando que o ajuste linear crescente para ALTP elevou a altura de planta, de forma que o aumento na porcentagem de plantas ocasionou incremento de 0,01 cm (Figura 13-A). Já para NNP o aumento na densidade diminuiu o número de nós em 0,7 nós planta⁻¹ (Figura 13-B). Assim, o aumento no número de indivíduos elevou a competição por espaçamento e recursos (água, nutrientes e luz), assim, alongando o caule principal e diminuindo o número de nós produtivos.

No entanto, quando analisamos BMX Zeus a cultivar não apresentou alterações na altura das plantas com a variação na densidade populacional, mantendo altura média de 0,96 cm (Figura 13-A), enquanto o número de nós diminuiu com o incremento na densidade, com redução de 0,9 nós a cada acréscimo na quantidade de plantas (Figura 13-B). Porém, BMX Ativa apresentou comportamento inverso, no qual o ajuste linear crescente para ALTP indicou que o aumento no número de plantas elevou a altura em 0,05 cm (Figura 13-A), apesar de que, as variações na densidade não apresentaram efeito sobre o número de nós produtivos, com NNP médio de 9 nós no caule principal (Figura 13-B).

Neste sentido, outros autores relatam resultados semelhantes, nos quais, o caractere altura de planta apresentou efeito linear positivo, de modo que, o incremento na densidade aumentou a altura das plantas devido ao aumento da competição intraespecífica, principalmente por radiação, levando ao estiolamento do caule nas maiores densidade (MAUAD et al. 2010; SCHMITZ, 2018). Todavia, além de elevar a altura das plantas, o aumento na população reduziu o número de nós na haste, atribuído a menor disponibilidade dos recursos por indivíduo (BOMTEMPO et al., 2021; PROCÓPIO et al., 2013).

Para os caracteres ALTP e DISTEN (Figura 14), observou-se que em Pato Branco/PR o ajuste linear crescente indicou que o aumento na densidade populacional elevou a altura de planta (Figura 14-A) e aumentou a distância entrenós (Figura 14-B). Este comportamento pode ocorrer pelo adensamento de indivíduos competindo por recursos do ambiente, de modo que, para concluir seu ciclo, as plantas crescem em altura para interceptar radiação solar, realizar fotossíntese e produzir fotoassimilados, enquanto aprofunda raízes em busca de água e nutrientes, conseqüentemente, a soja aumenta a distância entrenós, devido ao alongamento da haste em busca dos recursos necessários ao desenvolvimento (BOMTEMPO et al., 2021).

Figura 14 - Regressões entre cinco densidades de plantas e dois locais, para as variáveis altura de planta (ALTP, em m = A) e distância entrenós (DISTEN, em cm = B)



Fonte: Autoria própria (2024)

Comportamento similar foi identificado em Guarapuava/PR, de modo que, para ALTP o ponto de máxima eficiência técnica indicou que a adição em 30% na quantidade de plantas ocasionou altura de 0,92 cm (Figura 14-A), assim como, a resposta linear crescente para DISTEN comprova que o incremento na densidade populacional elevou a distância entrenós (Figura 14-B). Neste sentido, na literatura são relatados casos em que o aumento na densidade elevou a altura final de cultivares determinadas e indeterminadas (BOMTEMPO et al., 2021).

De acordo com Werner et al. (2016) a ALTP apresenta resposta linear crescente, de modo que, segundo Balbinot Junior et al. (2015b), em altas densidades ocorre maior alocação de fotoassimilados na formação das hastes, aumentando a altura das plantas, enquanto, baixas densidades populacionais reduzem a altura, eliminando o sombreamento entre plantas (BOARD; KAHLON 2013). Assim, o aumento na densidade de plantas eleva a ALTP, por conseguinte, aumenta a distância dos entrenós, atribuído à redução da qualidade da luz decorrente do adensamento populacional, de modo que, as plantas colocam mais folhas captando energia, ocasionando alongamento dos entrenós, podendo inclusive reduzir a emissão de ramos (BOARD, 2000; MUNSDTOCK; THOMAS, 2005; PROCÓPIO et al., 2013).

Quanto a ALTP e NNP (Tabela 12) referente a interação significativa ambiente x cultivar, observa-se que em Pato Branco/PR, a cultivar com maior altura foi DM57I52 com 1,11 m, diferindo das demais, enquanto a menor estatura foi de BMX Ativa com 0,81 cm. Em Guarapuava/PR a cultivar DM57I52 também apresentou maior altura com 1,07 cm, porém, a menor altura de planta foi de 0,77 em BMX Ativa e de 0,78 cm em BMX Raio. Assim, em Pato Branco/PR as plantas apresentaram maior ALTP em todas as cultivares, com exceção para BMX Vênus que não apresentou diferença estatística entre os locais.

Tabela 12 - Comparação de médias para as variáveis altura de planta (ALTP, em m) e número de nós por planta (NNP), de acordo com a interação significativa entre local x cultivar

Cultivar	ALTP		NNP	
	Pato Branco/PR	Guarapuava/PR	Pato Branco/PR	Guarapuava/PR
BMX Raio	0,94 cA*	0,78 dB	14 aA	12 bB
BMX Zeus	1,05 bA	0,88 cB	14 aA	12 bB
BMX Ativa	0,81 dA	0,77 dB	9 bA	8 cB
DM57I52	1,11 aA	1,07 aB	14 aA	14 aA
BMX Vênus	1,00 bA	1,01 bA	14 aA	14 aA

*Médias seguidas da mesma letra, minúsculas na vertical e maiúsculas na horizontal, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Autoria própria (2024)

Para o caractere NNP, em Pato Branco/PR as cultivares apresentaram média de 14 nós planta⁻¹, com exceção de BMX Ativa que apresentou de 9 nós por planta, enquanto em Guarapuava/PR a DM57I52 e BMX Vênus apresentaram 14 nós planta⁻¹ e BMX Ativa 8 nós planta⁻¹. Todavia, o número médio de nós ficou abaixo do considerado ideal para a cultura, de 16 a 20 nós por planta (MUNDSTOCK; THOMAS, 2005), no entanto, deve-se considerar a influência da temperatura (TAGLIAPIETRA et al., 2022), considerando as temperaturas amenas durante a safra 2022/23.

Na soja, a altura das plantas depende da cultivar e do hábito de crescimento, bem como, do ambiente, considerando a disponibilidade de água, temperatura, disponibilidade de nutrientes e dias nublados (BUENO, 2023). Na literatura a altura ideal de plantas para lavouras de alta produtividade é de 1,04 m, característica relacionada ao índice de área foliar e eficiência no uso da radiação, enquanto o crescimento excessivo acima de 1,20 m ocasiona senescência das folhas devido à falta de radiação, diminuindo a diferenciação do meristema em flores e vagens, reduzindo a produtividade (PEGORARO, 2023; TAGLIAPIETRA et al., 2022), já na baixa estatura ocorre menor número de nós, por conseguinte, um baixo número de vagens, além de dificultar a colheita mecanizada.

Deste modo, os resultados indicam que em Pato Branco/PR as plantas apresentaram maior altura de planta do que em Guarapuava/PR, corroborando com as observações a campo que indicam acamamento das parcelas quando submetidas ao adensamento de plantas. Outros

estudos também identificaram acamamento nas maiores densidades de plantas (BALBINOT JUNIOR et al., 2015; MAUAD et al., 2010) com populações de 16 e 18 plantas m^{-1} , bem como a ocorrência de caule fino e entrenós mais finos e longos. Por outro lado, alguns autores não observaram ocorrência de acamamento em nenhuma densidade estudada (BALBINOT JUNIOR et al., 2015; BOMTEMPO et al., 2021; COSTA, 2013).

Diante a isto, em altas densidades há tendência de haver maior crescimento em altura e menor espessura do caule, tornando as plantas mais susceptíveis ao acamamento, contudo, o risco eleva-se em regiões de maior altitude, enquanto em baixas altitudes e com solos com baixa fertilidade, as cultivares apresentam baixa taxa de crescimento levando a um porte de planta adequado (BALBINOT JUNIOR et al., 2015b). Ademais, solos com alta fertilidade e boa disponibilidade hídrica também podem acarretar acamamento (MUNDSTOCK; THOMAS, 2005).

4 CONCLUSÃO

Conclui-se que o incremento de 30% e 60% na densidade de plantas apresentou maior rendimento de grãos, independente do potencial de engalhamento das cultivares de soja estudadas e dos locais testados. Aferiu-se também que em altas densidades os genótipos apresentaram maior participação da haste principal no rendimento de grãos, enquanto o número de ramos foi reduzido. A visto disso, ainda que as cultivares apresentaram menor número de vagens e grãos por planta, o incremento na densidade populacional elevou o peso de grãos, de modo que, o rendimento de grãos aumentou em consequência do maior PMG e da maior produtividade dos componentes agronômicos por área.

No entanto, mesmo que os resultados indiquem aumento de produtividade associada a elevada densidade de plantas, deve-se atentar a possíveis recomendações aos produtores, visto que aumentar a população de plantas demanda acréscimo nos custos de produção e exige atenção quanto as condições do ambiente e ao manejo fitossanitário, podendo afetar negativamente o rendimento de grãos.

REFERÊNCIAS

- ALVES COSTA, H. V. A. **Efeito da densidade de semeadura nos caracteres produtivos da soja no sul do Tocantins**. Dissertação de Mestrado—Gurupi - TO: Universidade Federal do Tocantins, 2020.
- ASSEFA, Y. et al. Major Management Factors Determining Spring and Winter Canola Yield in North America. v. 58, p. 1–16, 2018.
- BALBINOT JUNIOR, A. A. et al. Espaçamento reduzido e plantio cruzado associados a diferentes densidades de plantas em soja. v. 36, n. 5, p. 2977–2986, 2015a.
- BALBINOT JUNIOR, A. A. et al. **Densidade de plantas na cultura da soja**. Embrapa Soja. 2015b. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1028747>>. Acesso em: 16 dez. 2023
- BALBINOT JUNIOR, A. A. et al. Analysis of phenotypic plasticity in indeterminate soybean cultivars under different row spacing. p. 648–654, 2018.
- BALEST, D. S. **Densidade de plantas agrônômica ótima de soja para altas produtividades em ambiente subtropical**. Dissertação de Mestrado—Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2021.
- BERGAMIN, M.; CANCIAN, M. A. E.; CASTRO, P. R. C. Soja. Em: **Ecofisiologia de cultivos anuais: trigo, milho, soja, arroz e mandioca**. São Paulo: Nobel, 1999.
- BOARD, J. E.; KAHN, C. S. Morphological responses to low plant population differ between soybean genotypes. v. 53, p. 1109–1119, 2013.
- BOMTEMPO, G. L.; MATSUO, É.; ODA, M. DO C. Vegetative and productive performance of two soybean cultivars at different plant densities. v. 7, p. 1–12, 2021.
- BORÉM, A.; MIRANDA, G. V. Interação Genótipo x Ambiente. Em: **Melhoramento de Plantas**. 6. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2013. p. 523.
- BRASMAX. **Brasmax Zeus IPRO: O poder do máximo rendimento de soja**. Brasmax Genética, 2018. Disponível em: <<https://www.brasmaxgenetica.com.br/blog/brasmax-zeus/>>. Acesso em: 7 jan. 2024
- BRASMAX. **Folder Brasmax Sul 2023.**, 2023. Disponível em: <https://d335luupugsy2.cloudfront.net/cms%2Ffiles%2F49036%2F1669054389FOLDER_BRASMAX_SUL_2023_18x24cm_16pg_A14_PS_REVISO_PS_PROVA.pdf>. Acesso em: 7 jan. 2024
- BUCHLING, C. et al. Uso da plasticidade morfológica como estratégia para a redução da população de plantas em cultivares de soja. v. 10, n. 35, 2017.
- BUENO, D. **Arquitetura vegetal: Engalhamento e a produtividade em soja**. Agrotecnico, 2023. Disponível em: <https://www.agrotecnico.com.br/engalhameno-em-soja/#google_vignette>. Acesso em: 7 jan. 2024
- CARCIOCHI, W. D. et al. Soybean seed yield response to plant density by yield environment in North America. v. 111, n. 4, p. 1923–1932, 2019.
- CONAB. **Conab atualiza a estimativa da safra de grãos 2023/2024, que dev chegar a 316,7 milhões de toneladas**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/ultimas->

notícias/5258-conab-atualiza-a-estimativa-da-safra-de-graos-2023-2024-que-deve-chegar-a-316-7-milhoes-de-toneladas>. Acesso em: 24 dez. 2023.

CORASSA, G. M. et al. Optimum soybean seeding rates by yield environment in Southern Brazil. v. 110, n. 6, p. 2430–2438, 2018.

COSTA, É. D. **Arranjo de plantas, características agronômicas e produtividade de soja**. Dissertação de Mestrado—Botucatu: Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, 2013.

COX, W. J.; CHERNEY, J. H. Growth and yield responses of soybean to row spacing and seeding rate. v. 103, n. 1, p. 123–128, 2011.

DE LUCA, M. J.; HUNGRIA, M. Plant density and soybean symbiosis. v. 71, n. 3, p. 181–187, 2014.

DE LUCA, M. J.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Feasibility of Lowering Soybean Planting Density without Compromising Nitrogen Fixation and Yield. v. 106, p. 2018–2024, 2014.

DERETTI, A. F. H. et al. Resposta de cultivares de soja à redução na densidade de plantas no planalto norte catarinense. v. 21, n. 2, p. 123–136, 2022.

DONMARIO. **Cultivar DM57I52 IPRO - estabilidade e alto potencial de ramificação**. 2020. Disponível em: <<https://blog.donmario.com.br/cultivar-dm57i52-ipro-estabilidade-e-alto-potencial-de-ramificacao/>>. Acesso em: 7 jan. 2024

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. Stages of Soybean Development. Special Report 80. Cooperation Extension Service, Agriculture and Home Economic Experiment Station. Iowa State University, Ames, 1977.

FERREIRA, A. S. et al. Plant spatial arrangement affects grain production from branches and stem of soybean cultivars. v. 77, n. 4, p. 567–576, 2018.

FERREIRA, A. S. et al. Minimum optimal seeding rate for indeterminate soybean cultivars grown in the tropics. v. 1, n. 12, p. 2092–2102, 2020.

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. **Package “ExpDes.pt”**. 2021.

HAMMAN, W. P. et al. Comparison of variable-rate prescriptions and optimum seeding rate in soybean. v. 7, n. 2, p. 1–9, 2021.

HIRAKURI, M. L.; LAZZAROTTO, J. J. **O agronegócio da soja nos contextos mundial e brasileiro**. Embrapa Soja, 2014.

MACHADO, B. Q. V. et al. Agronomic performance of soybean genotypes submitted to different population densities in the city of Uberlândia - MG. **Científica**, v. 46, n. 3, p. 264–273, 1 ago. 2018.

MANDA, N.; MATAA, M. Responses of soybeans (*Glycine max* (L) Merrill) associated with variable plant density stress applied at different phenological stages: Plasticity or elasticity? v. 19, n. 6, p. 307–319, 2020.

MASINO, A. et al. Spatial and temporal plant-to-plant variability effects on soybean yield. v. 98, p. 14–24, 2018.

MAUAD, M. et al. Influência da densidade de semeadura sobre características agronômicas na cultura da soja. v. 3, n. 9, p. 175–181, 2010.

MORO, F. DA S. et al. Produtividade de grãos de soja e seus componentes sob diferentes densidades de semeadura. v. 25, n. 2, p. 314–319, 2021.

MUNDSTOCK, C. M.; THOMAS, A. L. **Soja: fatores que afetam o crescimento e o rendimento de grãos**. Porto Alegre: Evangraf, 2005.

OLIVOTO T, Lúcio AD (2020). “metan: An R package for multi-environment trial analysis.” *Methods in Ecology and Evolution*, **11**(6), 783-789. doi:10.1111/2041-210X.13384.

PEGORARO, C. P. **Componentes agronômicos ótimos da soja: construindo uma lavoura produtiva**. *Maissoja*, 28 dez. 2023. Disponível em: <<https://maissoja.com.br/componentes-agronomicos-otimos-da-soja-construindo-uma-lavoura-produtiva/>>. Acesso em: 7 jan. 2024

PROCÓPIO, S. DE O. et al. Plantio cruzado na cultura da soja utilizando uma cultivar de hábito de crescimento indeterminado. v. 56, n. 4, p. 319–325, 2013.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. 2020. Disponível em: <<https://www.rstudio.com/>>

SCHMITZ, P. E. K. **A Thesis Submitted to the Graduate Faculty of the North Dakota State University of Agriculture and Applied Science**. Mestrado - Fargo - Dakota: North Dakota State University of Agriculture and Applied Science, 2018.

TAGLIAPIETRA, E. L. et al. **Ecofisiologia da soja: visando altas produtividades**. 2. ed. Santa Maria: [s.n.]. v. 16

TODESCHINI, M. H. **Progresso genética da soja no Brasil quanto à caracteres fisiológicos e agronômicos**. Pato Branco: Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), 2018.

USDA. **Soybean 2023 World Production**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer/cropview/commodityView.aspx?cropid=2222000>>. Acesso em: 24 dez. 2023.

WERNER, F. et al. Soybean groth affected by seeding rate and mineral nitrogen. v. 20, n. 8, p. 734–738, 2016.

WERNER, F. et al. Grain, oil, and protein production on soybean stems and braches under reduced densities. v. 16, n. 1, p. 1–9, 2021.