



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

ANDRÉ SAMPAIO FERREIRA

**DENSIDADE MÍNIMA ÓTIMA DE SEMEADURA NO
DESEMPENHO PRODUTIVO DE GRÃOS E NO POTENCIAL
FISIOLÓGICO DE SEMENTES DE SOJA**

Londrina
2019

ANDRÉ SAMPAIO FERREIRA

**DENSIDADE MÍNIMA ÓTIMA DE SEMEADURA NO
DESEMPENHO PRODUTIVO DE GRÃOS E NO POTENCIAL
FISIOLÓGICO DE SEMENTES DE SOJA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor de Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Claudemir Zucareli
Co-orientador: Dr. Alvadi Antonio Balbinot
Junior

Londrina
2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

Ferreira, André Sampaio .

Densidade mínima ótima de semeadura no desempenho produtivo de grãos e no potencial fisiológico de sementes de soja / André Sampaio Ferreira. - Londrina, 2019. 100 f. : il.

Orientador: Claudemir Zucareli.

Coorientador: Alvadi Antonio Balbinot Junior.

Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Agrárias, , 2019.

Inclui bibliografia.

1. População de plantas - Tese. 2. Densidade de plantas mínima ótima - Tese. 3. Arranjo espacial de plantas - Tese. 4. Teores de óleo e proteína - Tese. I. Zucareli, Claudemir. II. Balbinot Junior, Alvadi Antonio . III. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Agrárias. . IV. Título.

ANDRÉ SAMPAIO FERREIRA

**DENSIDADE MÍNIMA ÓTIMA DE SEMEADURA NO DESEMPENHO
PRODUTIVO DE GRÃOS E POTENCIAL FISIOLÓGICO DE
SEMENTES DE SOJA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Agronomia.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Claudemir Zucareli
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Prof. Dr. Inês Cristina de Batista Fonseca
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Prof. Dr. Marcelo Augusto de Aguiar e Silva
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Dr. Osmar Conte
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária –
Embrapa Soja

Dr. Thiago Montagner Souza
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Londrina, 10 de maio de 2019.

Dedico este trabalho à minha amada esposa Katerine, que trilhou cada passo desta caminhada junto comigo, enfrentando e superando cada um dos obstáculos que se apresentaram.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Universidade Estadual de Londrina e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia desta instituição pela oportunidade concedida.

Agradeço à Embrapa Soja que disponibilizou todo o auxílio necessário para realização deste projeto.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudos e apoio financeiro.

Agradeço especialmente ao meu orientador, Prof. Dr. Claudemir, que ao longo dos últimos 10 anos, se dedicou a me ensinar tudo que sabe, com humildade, compreensão e amizade.

Também ao meu co-orientador Dr. Alvadi, pela longa parceria que me trouxe grande crescimento profissional e pessoal.

Não poderia deixar de agradecer também à Prof. Dra. Inês, por nunca ter medido esforços para me ajudar com tantas análises de dados ao longo desses 10 anos.

Ao professor Dr. Walmes Zeviani (UFPR) pela ajuda na análise estatística dos dados.

Agradeço também aos meus pais Álvaro e Déborah, pela educação que me deram e todo o esforço que fizeram para me proporcionar esta oportunidade.

À minha esposa Katerine, pelo amor, companheirismo e por todas as renúncias que fez e que permitiram que eu concluísse este trabalho.

Aos meus filhos Helena, Francisco e Marina, que alegam os meus dias e me deram a alegria de ser pai.

Aos meus irmãos Felipe e Francine, e suas famílias, que dividem comigo seus sofrimentos e suas alegrias.

Agradeço também aos meus sogros Marco e Eliane, por terem me acolhido como um filho e por toda ajuda que sempre nos dão.

Agradeço também de maneira especial a uma grande amiga que a Pós-Graduação me deu, Flávia Werner.

Finalmente agradeço a toda equipe de manejo do solo e da cultura da Embrapa Soja e a todos os estagiários que por lá passaram e que deram valiosa contribuição na condução deste trabalho.

FERREIRA, André Sampaio. **Densidade mínima ótima de semeadura no desempenho produtivo de grãos e potencial fisiológico de sementes de soja.** 2018. 100 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2018.

RESUMO

A redução da densidade de plantas é uma técnica que vêm sendo estudada com objetivo de elevar a rentabilidade da produção de soja sem necessariamente aumentar a produtividade. Isto é possível em função da elevada plasticidade da cultura em resposta a modificações na densidade. Semear a soja na densidade de semeadura mínima ótima (quantidade mínima de sementes necessária para alcançar a produtividade ótima) pode reduzir o custo de produção, desfavorecer o desenvolvimento de doenças, facilitar a aplicação de agroquímicos e reduzir o acamamento. Porém, a densidade de semeadura, ao alterar a arquitetura e a morfologia da soja, pode afetar a partição de fotoassimilados, e no caso da produção de semente, estas mudanças podem alterar a qualidade das sementes produzidas. O objetivo foi avaliar o desempenho produtivo, a produção de óleo e proteína nos grãos e a qualidade de sementes em duas cultivares de soja, em resposta à redução na densidade de plantas. O experimento foi conduzido a campo em Londrina-PR nas safras 2016/17 e 2017/18. O delineamento experimental foi de blocos casualizados em esquema fatorial 5 x 2, totalizando 10 tratamentos com 5 repetições. Os tratamentos foram constituídos de cinco densidades de semeadura (100, 80, 60, 40 e 20% do indicado pelo obtentor) e duas cultivares com tipo de crescimento indeterminado (BRS 1010 IPRO e NS 5959 IPRO). Foram avaliados: componentes de rendimento, índice de colheita, teores de óleo e proteína nos grãos, produtividade de grãos, produtividade de óleo, produtividade de proteína e o potencial fisiológico das sementes. Após a constatação da normalidade e homocedasticidade de variâncias dos resíduos, os dados foram submetidos a análise de variância com análise de regressão para o fator densidade de semeadura e comparação de médias pelo teste F para o fator cultivar. A massa de mil grãos é o principal componente do rendimento responsável pela redução da produtividade de grãos abaixo da densidade mínima ótima. Ambas cultivares demonstraram alta capacidade de produção de grãos nos ramos em resposta à redução da densidade de semeadura, o que confere a sua plasticidade fenotípica. Ambas as cultivares demonstraram alta plasticidade fenotípica, o que resultou em densidades mínimas ótimas para produção de grãos de 36% e 45% para a cultivar BRS 1010 IPRO e 52% e 71% para a NS 5959 IPRO em relação ao recomendado pelo obtentor. A redução da densidade de semeadura, para apenas 20% do recomendado, resulta em menor vigor de sementes. A redução da densidade de semeadura para valores até 40% da densidade não provoca impactos significativos sobre o potencial fisiológico das sementes. O potencial fisiológico das sementes é crescente conforme se avança do estrato inferior para o superior da planta.

Palavras-chave: População de plantas. Arranjo espacial de plantas. Componentes de rendimento. Densidade de plantas mínima ótima. Teor de óleo. Teor de proteína. Germinação. Vigor.

FERREIRA, André Sampaio. **Minimal optimal seeding rate on grains yield performance and seeds physiological potential**. 2019. 100 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2019.

ABSTRACT

The reduction of seeding rate is a technique that has been studied with the objective of increasing the profitability of soybean production without necessarily increase yield. This is possible because of the high plasticity of this crop in response to changes in plant density. Sowing soybeans at optimum minimum seeding rate (minimum seed quantity required to achieve optimum yield) can reduce production costs, disadvantage disease development, facilitate the application of agrochemicals, and reduce lodging. However, seeding rates, by alter soybean architecture and morphology, can affect the partitioning of photoassimilates, and in the case of seed production, these changes may modify the quality of the seeds produced. The objective was to evaluate the yield performance, oil and protein production in the grains and seed quality in two soybean cultivars, in response to the reduction in seeding rate. The experiment was conducted in field conditions at Londrina-PR in the 2016/17 and 2017/18 growing seasons. The experimental design was of randomized complete blocks in factorial scheme 5 x 2, totaling 10 treatments with 5 replications. The treatments consisted of five seeding rates (100, 80, 60, 40 and 20% of those indicated by the breeder) and two cultivars with indeterminate growth type (BRS 1010 IPRO and NS 5959 IPRO). The following characteristics were evaluated: yield components, harvest index, oil and protein contents in the grains, grain yield, oil yield, protein yield and the physiological quality of the seeds. After the normality and homoscedasticity of variances of the residues, be confirmed, the data were submitted to analysis of variance with regression analysis for the seeding rate factor and comparison of means by the F test for the cultivar factor. The mass of a thousand grains is the main component of the yield responsible for the reduction of grain yield below the optimum minimum density. Both cultivars showed high grain production capacity in the branches in response to the reduction of seeding rate which confers its phenotypic plasticity. Both cultivars showed high phenotypic plasticity, which resulted in minimum optimal seeding rate of 36% and 45% for BRS 1010 IPRO and 52% and 71% for NS 5959 IPRO, compared to that recommended by the breeder. The reduction of seed density, to only 20% of the recommended, results in lower seed vigor. Reducing seeding rate to values up to 40% of the recommended does not cause significant impacts on the physiological potential of the seeds. The physiological potential of the seeds is increasing as we move from the lower stratum to the upper stratum of the plant.

Key words: Plant density. Plant spatial arrangement. Yield components. Minimal optimal plant population. Oil concentration. Protein concentration. Germination. Vigor.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 3.1** – Precipitação pluvial e balanço hídrico climatológico sequencial, por decêndio, durante o período de condução dos experimentos. Londrina, Paraná, Brasil, Safras 2016/17 (A) e 2017/18 (B).....43
- Figura 3.2** – Altura de plantas de soja em duas safras agrícolas influenciadas pela redução da densidade de semeadura em relação à recomendada pelo obtentor. Médias de duas cultivares (BRS 1010 IPRO e NS 5959 IPRO). Londrina-PR.....50
- Figura 3.3** – Diâmetro do caule de plantas de soja em duas safras agrícolas influenciadas pela redução da densidade de semeadura em relação à recomendada pelo obtentor. Médias de duas cultivares (BRS 1010 IPRO e NS 5959 IPRO). Londrina-PR.51
- Figura 3.4** – Número de vagens de soja m^{-2} em duas safras agrícolas influenciadas pela redução da densidade de semeadura em relação à recomendada pelo obtentor. Médias de duas cultivares (BRS 1010 IPRO e NS 5959 IPRO). Londrina-PR. Diferenças estatísticas não significativas.52
- Figura 3.5** – Número de grãos por vagem de soja em duas safras agrícolas influenciadas pela redução da densidade de semeadura em relação à recomendada pelo obtentor. Médias de duas cultivares (BRS 1010 IPRO e NS 5959 IPRO). Londrina-PR53
- Figura 3.6** – Massa de mil grãos de soja em duas safras agrícolas influenciadas pela redução da densidade de semeadura em relação à recomendada pelo obtentor. Médias de duas cultivares (BRS 1010 IPRO e NS 5959 IPRO). Londrina-PR.....55
- Figura 3.7** – Grãos de soja oriundos dos ramos influenciados isoladamente pela redução da densidade de semeadura em relação à recomendada pelo obtentor na safra 2016/17 (A) e pela interação entre cultivar e redução da densidade de semeadura na safra 2017/18 (B). Londrina-PR.....56
- Figura 3.8** – Teor de proteína nos grãos de soja em duas safras agrícolas influenciadas pela redução da densidade de semeadura em relação à recomendada pelo obtentor. Médias de duas cultivares (BRS 1010 IPRO e NS 5959 IPRO). Londrina-PR.58
- Figura 3.9** – Produtividade de grãos de soja em resposta à redução da densidade de semeadura. Cultivares NS 5959 IPRO na primeira (A) e segunda safra (B), e BRS 1010 IPRO na primeira (C) e segunda safra (D). Londrina-PR, safras 2016/17 e

| | |
|--|----|
| 2017/18..... | 61 |
| Figura 3.10 – Produtividade de óleo de soja em resposta à redução da densidade de semeadura em relação à recomendada pelo obtentor. Cultivares NS 5959 IPRO na primeira (A) e segunda safra (B), e BRS 1010 IPRO na primeira (C) e segunda safra (D). Londrina-PR, safras 2016/17 e 2017/18..... | 62 |
| Figura 3.11 – Produtividade de proteína de soja em resposta à redução da densidade de semeadura em relação à recomendada pelo obtentor). Cultivares NS 5959 IPRO na primeira (A) e segunda safra (B), e BRS 1010 IPRO na primeira (C) e segunda safra (D). Londrina-PR, safras 2016/17 e 2017/18..... | 63 |
| Figura 4.1 – Balanço hídrico climatológico sequencial e temperaturas mínimas, médias e máximas do ar, por decêndio, durante o período de condução dos experimentos: Outubro de 2016 a Março de 2017. Londrina, PR... .. | 72 |
| Figura 4.2 – Desdobramento da interação entre densidade de semeadura e posição na planta para a germinação de sementes da cultivar de soja BRS 1010 IPRO de soja. Londrina-PR, safra 2016/17.... .. | 77 |
| Figura 4.3 – Germinação de sementes de soja da cultivar NS 5959 IPRO influenciada pela redução da densidade de semeadura. Londrina-PR, safra 2016/17... .. | 78 |
| Figura 4.4 – Desdobramento da interação entre densidades de semeadura e posição da semente na planta para a primeira contagem da germinação de sementes de soja da cultivar de soja NS 5959 IPRO. Londrina-PR, safra 2016/17..... | 81 |
| Figura 4.5 – Desdobramento da interação entre densidades de semeadura e posição da semente na planta para o comprimento de plântulas das cultivares de soja BRS 1010 IPRO e NS 5959 IPRO. Londrina-PR, safra 2016/17..... | 82 |
| Figura 4.6 – Desdobramento da interação entre densidades de semeadura e posição da semente na planta para a massa seca de plântulas das cultivares de soja BRS 1010 IPRO e NS 5959 IPRO. Londrina-PR, safra 2016/17..... | 83 |
| Figura 4.7 – Condutividade elétrica de sementes de soja das cultivares BRS 1010 IPRO e NS 5959 IPRO influenciada pela redução da densidade de semeadura. Londrina-PR, safra 2016/17.... .. | 84 |
| Figura 4.8 – Germinação de sementes de soja após teste de envelhecimento acelerado em resposta à redução da densidade de semeadura (100%, 80%, 60%, 40% e 20% do recomendado pelo obtentor). Cultivares BRS 1010 IPRO e NS 5959 IPRO. Londrina-PR, safra 2016/17..... | 85 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 3.1 – Densidade de plantas almejadas e estabelecidas das cultivares BRS 1010 IPRO e NS 5959 IPRO, avaliada no estágio V3 de desenvolvimento da soja. Londrina-PR, safras 2016/17 e 2017/18..... | 47 |
| Tabela 3.2 – Resumo da análise de variância com os respectivos valores de F e sua significância, média geral e coeficiente de variação para as características agrônômicas avaliadas: Londrina, PR. Safras 2016/17 e 2017/18..... | 48 |
| Tabela 3.3 – Características agrônômicas da soja influenciadas isoladamente pela cultivar em duas safras agrícolas. Médias de cinco densidades de semeadura. Londrina-PR. | 49 |
| Tabela 4.1 – Resumo da análise de variância com os respectivos valores de F, sua significância, e o coeficiente de variação para os testes de potencial fisiológico das sementes das cultivares BRS 1010 IPRO e NS 5959 IPRO em resposta à redução da densidade de semeadura e à posição da semente na planta. Londrina, PR. Safra 2016/17 | 75 |
| Tabela 4.1 – Resumo da análise de variância com os respectivos valores de F, sua significância, e o coeficiente de variação para os testes de potencial fisiológico das sementes das cultivares BRS 1010 IPRO e NS 5959 IPRO em resposta à redução da densidade de semeadura e à posição da semente na planta. Londrina, PR. Safra 2016/17 | 75 |
| Tabela 4.2 – Desdobramento da interação entre densidades de semeadura e posições na planta para as variáveis germinação de sementes, comprimento de plântulas e massa seca de plântulas na cultivar de soja BRS 1010 IPRO. Londrina-PR, safra 2016/17 | 78 |
| Tabela 4.3 – Efeito isolado da posição da semente na planta (terço inferior, médio e superior) no potencial fisiológico de sementes de soja das cultivares BRS 1010 IPRO e NS 5959 IPRO. Londrina-PR, safra 2016/17..... | 75 |
| Tabela 4.4 – Desdobramento da interação entre densidades de semeadura e posição da semente na planta para as variáveis primeira contagem da germinação, comprimento de plântulas e massa seca de plântulas na cultivar de soja NS 5959 IPRO. Londrina-PR, safra 2016/17..... | 80 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 13 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 15 |
| 2.1 | ASPECTOS GERAIS DA CULTURA DA SOJA | 15 |
| 2.2 | ECOFISIOLOGIA | 17 |
| 2.2.1 | Disponibilidade Hídrica | 18 |
| 2.2.2 | Fotoperíodo e Temperatura | 20 |
| 2.2.3 | Radiação Solar | 21 |
| 2.3 | ARRANJO ESPACIAL DE PLANTAS | 23 |
| 2.3.1 | Densidade de Plantas | 24 |
| 2.4 | QUALIDADE DE SEMENTES EM SOJA | 30 |
| | REFERÊNCIAS | 33 |
| 3 | ARTIGO A – DENSIDADE DE SEMEADURA MÍNIMA ÓTIMA PARA CULTIVARES DE SOJA COM TIPO DE CRESCIMENTO INDETERMINADO | 43 |
| 3.1 | INTRODUÇÃO | 45 |
| 3.2 | MATERIAL E MÉTODOS | 47 |
| 3.3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 51 |
| 3.4 | CONCLUSÕES | 70 |
| 3.5 | REFERÊNCIAS | 71 |
| 4 | ARTIGO B – POTENCIAL FISIOLÓGICO DE SEMENTES DE SOJA INFLUENCIADA PELA REDUÇÃO DA DENSIDADE DE SEMEADURA E POSIÇÃO DA SEMENTE NA PLANTA | 74 |
| 4.1 | INTRODUÇÃO | 76 |
| 4.2 | MATERIAL E MÉTODOS | 78 |
| 4.3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 82 |
| 4.4 | CONCLUSÕES | 94 |
| 4.5 | REFERÊNCIAS | 95 |
| 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 99 |

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas duas décadas houve aumento expressivo no custo dos insumos utilizados na semeadura da soja, em função do uso de novas tecnologias, como: sementes geneticamente modificadas, novos fungicidas, inseticidas e polímeros para tratamento de sementes, tratamento industrial de sementes e adubação com micronutrientes.

Além disso, a introdução de cultivares com tipo de crescimento indeterminado e maior precocidade em substituição às tradicionalmente adotadas (tipo de crescimento determinado e ciclo mais longo), com nova arquitetura de plantas e maior potencial produtivo tem trazido vários questionamentos quanto ao arranjo de plantas na cultura da soja.

Pesquisas recentes indicam que a alternativa mais viável para mitigar o alto custo das sementes geneticamente modificadas, é reduzir a densidade mínima de plantas necessária à obtenção da produtividade ótima - conceito de densidade de plantas mínima ótima - tendo em vista que a soja apresenta alta plasticidade fenotípica. A plasticidade consiste na capacidade de a planta alterar sua morfologia e componentes do rendimento, a fim de adequá-los à condição imposta pelo arranjo de plantas, permitindo ampla variação na população de plantas sem grandes alterações na produtividade.

Adicionalmente, a redução da densidade de plantas pode elevar a eficiência de penetração de agroquímicos na lavoura, sobretudo nas aplicações realizadas em estádios mais avançados, bem como evitar o acamamento e quebramento de plantas, tendo em vista que baixas densidades proporcionam menor altura de plantas e maior diâmetro do caule.

Mudanças no arranjo espacial, pela redução da densidade de plantas, podem influenciar a quantidade de radiação solar interceptada pelo dossel, afetando o processo fotossintético; a taxa de conversão da energia interceptada em biomassa; a partição de fotoassimilados para os grãos e a composição dos grãos. Os efeitos da densidade de plantas sobre esses fatores em cultivares modernas de soja precisam ser elucidados, fundamentando técnicas de manejo que associem altas produtividades com mínimo custo com sementes e seu tratamento.

Salienta-se, entretanto, que no caso da produção de sementes de soja, baixas populações de plantas podem prejudicar a qualidade fisiológica, pois nesta condição, embora haja pouca alteração na produtividade, a produção é oriunda em maior parte das ramificações, que tem menor força de demanda de fotoassimilados e podem produzir sementes menores que os da haste principal. No entanto, o entendimento dos efeitos da densidade de plantas e sua interação com diferentes cultivares sobre a qualidade de sementes oriundas das hastes ou dos ramos ainda é incipiente.

Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar o desempenho produtivo, os teores de proteína e óleo nos grãos e a qualidade de sementes em duas cultivares de soja, em resposta à redução na população de plantas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ASPECTOS GERAIS DA CULTURA DA SOJA

A soja é uma dicotiledônea pertencente à família *Fabaceae*, cultivada pelos chineses há cerca de cinco mil anos e foi introduzida no Brasil no final do século XIX, tendo apresentado expressão significativa a partir do final da década de 40, do século passado (MARCOS FILHO; GODOY; CÂMARA, 1982). Atualmente a soja é cultivada em quase todas as regiões do território nacional, e apresenta grande importância no sistema de produção agrícola brasileiro e mundial (PROQUE; CASSUCE; SILVA, 2014).

O grão de soja é consumido há milênios pelos povos orientais e atualmente no Sudeste Asiático a soja representa entre 20 e 60% da proteína ingerida pela população na forma de tofu, sopa de soja, pasta de soja fermentada, molho de soja e extrato de soja (AMARAL, 2006). No Ocidente a soja passou a ganhar importância a partir do século XVIII, em função do seu alto teor lipídico e protéico. Desde então, a cultura veio conquistando espaço e sendo introduzida na alimentação humana e animal, de forma que hoje representa a quarta maior cultura alimentícia em termos de produção de grãos e a maior importante fonte de proteína vegetal no mundo e é consumida tanto diretamente quanto inserida em alimentos industrializados (SRINIVASAN; KUMAR; LONG, 2016). A soja também vem sendo amplamente utilizada para produção de biocombustíveis em função do seu elevado teor de óleo, que após o processo de transesterificação pode ser transformado em biodiesel (HIRAKURI; LAZZAROTTO, 2014).

A produção mundial de soja na safra 2017/2018 foi de aproximadamente 337 milhões de toneladas com destaque para o Estados Unidos e Brasil que produziram 120 milhões de toneladas cada um. A Argentina (57 milhões de toneladas) e a China (12 milhões de toneladas), compõem a lista dos maiores produtores (USDA, 2019). A previsão para a safra 2018/2019 era de consolidação do Brasil como maior produtor mundial de soja, entretanto fatores meteorológicos durante a fase reprodutiva da cultura e pré-colheita reduzirão a produtividade brasileira e fizeram com que o Brasil não ultrapassasse os EUA nesta safra (CONAB, 2019).

Na safra 2017/18 o Brasil foi o maior exportador da oleaginosa, com

aproximadamente 50% das exportações mundiais (76 milhões de toneladas). Dentre os maiores consumidores, destaque para a China com consumo de 106 milhões de toneladas na última safra, seguida por EUA, Brasil e Argentina com respectivamente, 59, 47 e 43 milhões de toneladas (USDA, 2019).

No Brasil a soja apresenta-se como a cultura de grãos mais importante em produção e exportação. Na última safra a área cultivada foi de 35 milhões de hectares, que resultou em produção de aproximadamente 118 milhões de toneladas e produtividade média de 3.400 kg ha⁻¹. Para a safra 2018/19 as estimativas indicam aumento de 1,9% da área plantada, porém com redução da produção total em função da menor produtividade alcançada em relação à safra passada. A previsão de redução da produtividade brasileira de soja nesta safra se deve à ocorrência de estiagem durante a fase de desenvolvimento dos grãos e excesso de chuva na colheita nos Estados do Mato Grosso do Sul, Goiás e Paraná (CONAB, 2019).

Durante os anos 1980, o cultivo de soja liderou uma migração agrícola, saindo das tradicionais regiões de cultivo do Sul do país para o Brasil Central, sobretudo nos estados de Goiás e Mato Grosso. As condições climáticas nas grandes áreas do Cerrado Brasileiro, aliadas às novas tecnologias de manejo da cultura, propiciaram a obtenção de altas produtividades, fixando a região centro-oeste como uma das principais regiões produtoras da oleaginosa (HORVAT; WATANABE; YAMAGUCHI, 2015).

Desde os anos 2000, o cultivo da soja tem se expandido para uma nova fronteira agrícola chamada de MATOPIBA. Essa região, composta pelos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, tem aumentado a área cultivada e volume colhido e se vem consolidando como uma das principais regiões produtoras de grãos no Brasil (BACHA; CARVALHO, 2014).

Entretanto, a produção nacional de soja, ainda se concentra principalmente nas regiões Centro-Oeste e Sul, sendo os estados do Mato Grosso, Paraná e Rio Grande do Sul, respectivamente, os estados com maior área plantada e produção. Tais regiões foram responsáveis por aproximadamente 85% da produção de grãos de soja na safra safra 2017/18 (CONAB, 2018).

No Paraná a área cultivada com soja na safra 2017/2018 foi 4% maior do que na safra anterior, com aproximadamente 5,4 milhões de hectares, e produtividade média de 3.500 kg ha⁻¹ que resultou na produção de 19 milhões de

toneladas de grãos, 2,1% maior do que na safra 2016/2017 (CONAB, 2018).

Desde o início do século XXI, a sojicultura nacional experimentou muitas mudanças no que diz respeito à utilização de novas tecnologias, como a consolidação do sistema de semeadura direta na palha e o advento das cultivares transgênicas, além da introdução de cultivares com maior potencial produtivo. Entretanto, essas novas cultivares de soja apresentam tipo de crescimento, duração do ciclo e arquitetura de plantas diferentes das primeiras linhagens de soja introduzidas no Brasil, que juntamente com o aparecimento de novas pragas, plantas daninhas e doenças, demandam mudanças no sistema produtivo e manejo da cultura (PROCOPIO et al., 2013).

2.2 ECOFISIOLOGIA

A produtividade das culturas é definida pela constituição do genótipo, pelas condições impostas pelo ambiente de cultivo e pela interação entre o genótipo e ambiente (G x A) (CARGNIN et al., 2006). As culturas tem um potencial máximo de produtividade definido pela genética. No entanto, o ambiente impõe uma série de limitações ao genótipo e, frequentemente, a produção é menor do que o potencial (MELGES; LOPES; OLIVA, 1989).

De acordo com Foulkes, Reynolds e Silvester-Bradley (2009) as produtividades mundiais geralmente são de 20 a 40% menores do que o potencial produtivo das cultivares. Essa diferença é atribuída a um ambiente de desenvolvimento aquém do ideal, como por exemplo inadequadas condições de: incidência de radiação solar, temperatura, fotoperíodo, água e fertilidade do solo. Portanto o uso de práticas culturais de acordo com as descobertas científicas e recomendações técnicas podem levar a um maior aproveitamento dos recursos ambientais e conseqüentemente elevar a produtividade da soja em quase todas as regiões de cultivo.

A incapacidade de se obter produtividades ótimas quando são utilizadas cultivares adaptadas, é causada por estresses ambientais. Estresse ambiental é definido pelo excesso ou deficiência de um fator do ambiente, de grandeza suficientemente capaz de reduzir a produtividade ou a qualidade do produto (BOARD; KAHN, 2011).

Estresses ambientais são divididos em bióticos e abióticos. Os bióticos são causados por organismos vivos, tais como plantas daninhas, insetos praga, doenças e nematóides. Os fatores abióticos que mais afetam a produtividade de uma cultura são: luz, água, temperatura e nutrientes. A utilização da luz é o processo mais importante para a produtividade porque é através da fotossíntese que a planta acumula matéria orgânica em seus tecidos (ARGENTA; SILVA; SANGOI, 2001). Logo, para obtenção de altas produtividades é fundamental providenciar o melhor ambiente possível para o crescimento da soja, utilizando práticas de manejo que otimizem o aproveitamento dos recursos ambientais disponíveis.

2.2.1 Disponibilidade Hídrica

O déficit hídrico é um grave problema agrônômico que é condicionado não somente por ausência de precipitação pluvial mas também pela evapotranspiração do sistema solo-planta, profundidade e distribuição do sistema de raízes e a forma como a água da precipitação infiltra e permanece no perfil do solo. Adicionalmente à precipitação pluvial, os fatores que também interferem na ocorrência de déficit hídrico são: manejo do solo (plantio direto ou convencional), características genéticas das plantas (características do sistema de raízes, controle estomático, refletância das folhas, ajustes osmóticos, tamanho e angulação das folhas, etc), fatores climáticos (umidade relativa do ar, vento e temperatura) e características do solo (textura, estrutura, compactação, pH e declividade) (BOARD, KAHLON, 2011).

O déficit hídrico ocorre quando a perda de água pelas folhas excede o que é suprido pelas raízes a tal ponto que o potencial hídrico dessas folhas decresce a níveis que resultam em rupturas fisiológicas que reduzem a taxa de crescimento e rendimento das culturas (LOOMIS; CONNOR, 2011b). Os efeitos deletérios ocasionados pelo déficit hídrico estão relacionados ao fechamento estomático, redução das taxas transpiratória e fotossintética, redução da síntese de proteínas e aumento do estresse oxidativo nas células (TRIPATHI et al., 2015).

Outro fator importante do estresse hídrico é que a redução do potencial hídrico nos nódulos prejudica a fixação biológica do nitrogênio, provocando deficiência nutricional na cultura da soja e conseqüentemente redução da produtividade (PURCELL; SPECHT, 2004).

O suprimento de água para a cultura é importante durante todo o ciclo

de desenvolvimento, porém os períodos de germinação-emergência e floração-enchimento de grãos, são os mais sensíveis à ocorrência de estresses hídricos. Durante o primeiro período, tanto o excesso como o déficit de água são prejudiciais à uma boa uniformidade na emergência das plantas. A semente de soja necessita de absorver, no mínimo, 50% de seu peso em água para assegurar uma boa germinação. Nesta fase, o conteúdo de água no solo não deve exceder a 85% do total de água disponível nem ser inferior a 50% (EMBRAPA, 2011). Do acordo com Helms et al. (1996) o estabelecimento do estande pode ser dificultado se a água no solo for suficiente para causar embebição na semente mas não a germinação, o que resulta em densidades de plantas subótimas para a obtenção de altas produtividades.

A necessidade de água na cultura da soja vai aumentando com o desenvolvimento da planta, atingindo o máximo durante a floração-enchimento de grãos (7 a 8 mm dia^{-1}), decrescendo após este período. Déficits hídricos expressivos, durante a floração e enchimento de grãos, provocam alterações morfofisiológicas na planta, como o fechamento estomático, o movimento assimétrico do folíolo central e o enrolamento de folhas, causando graves prejuízos à produtividade e até à composição dos grãos (NAKAGAWA et al., 2018; TRIPATHI et al., 2015). O período entre a formação das vagens e enchimento dos grãos é especialmente sensível ao estresse hídrico (RITCHIE et al., 1994).

Estresse hídrico ocorrido no início do enchimento de grãos, também pode reduzir o número de grãos, mas o principal efeito da seca ocorrida neste período é no tamanho dos grãos (BREVEDAN; EGLI, 2003). Em casos em que ocorre déficit hídrico similar em diferentes períodos do desenvolvimento, a perda de rendimento é geralmente duas vezes maior para o período R1-R6 do que o R6-R7.

Baseado em resultados de diversos autores, Board e Kahlon (2013) concluíram que a redução do número de sementes por m^2 ocorrida em função do déficit hídrico é devida mais pela redução do número de vagens por m^2 do que do número de grãos por vagem. Além disso, tendo em vista que o número de vagens por nó é pouco afetado pelo estresse hídrico, pode-se afirmar que a redução no número de vagens e sementes por m^2 causada pela seca resulta principalmente da menor ramificação que provoca redução no número de nós por m^2 .

2.2.2 Fotoperíodo e Temperatura

A soja apresenta características peculiares na sua adaptação aos diferentes locais de cultivo, especialmente na reação ao fotoperíodo e temperatura do ar, que regulam a época da floração. Este aspecto é muito importante, pois determina a duração do período vegetativo, período este que tem alta relação com a produção de grãos (MUNDSTOCK; THOMAS, 2005).

Fotoperíodo e temperatura são importantes para o desenvolvimento da cultura da soja, por provocarem mudanças qualitativas ao longo do seu ciclo. As respostas a esses dois fatores não são lineares durante o ciclo de vida da cultura, pois existem subperíodos em que ela é incapaz de perceber esses sinais. O subperíodo vegetativo pode ser definido como pré-indutivo ou juvenil. Nesse período, entre a emergência e a primeira folha verdadeira (estádio V1) as plantas de soja são incapazes de perceber estímulo ao fotoperíodo (RODRIGUES et al., 2001).

A resposta da soja ao fotoperíodo é característica variável entre cultivares, ou seja, cada cultivar possui seu fotoperíodo crítico, acima do qual o florescimento é atrasado (CÂMARA, 1998). Por isso, a soja é considerada planta de dia curto. Plantas de dia curto são aquelas que florescem quando submetidas a fotoperíodos abaixo do seu fotoperíodo crítico. Quando expostas a fotoperíodos maiores que o seu fotoperíodo crítico, estas plantas crescem, mas não florescem.

Na cultura da soja, a sensibilidade fotoperiódica varia com o genótipo (RODRIGUES et al., 2001), e o grau de resposta ao estímulo fotoperiódico é o principal determinante da área de adaptação das diferentes cultivares. Cultivares que apresentam período juvenil longo possuem adaptabilidade mais ampla, possibilitando sua utilização em faixas mais abrangentes de latitudes e épocas de semeadura (FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007).

Assim como o fotoperíodo, a temperatura também é fator determinante para a floração da cultura. O florescimento só é induzido quando ocorrem temperaturas acima de 13 °C. As diferenças de data de floração, entre anos, apresentadas por uma cultivar semeada em uma mesma época são devidas a variações na temperatura (EMBRAPA, 2011). Assim a soja floresce antes do tempo quando ocorrem altas temperaturas, o que pode acarretar diminuição na altura da planta. Este problema pode ser agravado se, ao mesmo tempo, ocorrer insuficiência hídrica e/ou fotoperiódica durante a fase de crescimento (RODRIGUES et al., 2001).

Portanto, o crescimento, o desenvolvimento e, conseqüentemente, o rendimento de grãos resultam da interação entre a cultivar utilizada e os fatores do meio, decorrente da sensibilidade ao fotoperíodo e temperatura (MUNDSTOCK; THOMAS, 2005). Não menos importante é ajustar o ambiente e manejo cultural para altos rendimentos, quando se tem cultivares de elevado potencial de produtividade e adaptados à região de cultivo (GUBIANI, 2005).

Altas produtividades só são obtidas quando as condições ambientais são favoráveis em todos os estádios de crescimento da soja. Porém, para que se obtenham tais produtividades, é necessário conhecer práticas culturais compatíveis com a produção econômica, aplicáveis para maximizar a taxa de acúmulo de matéria seca nos grãos. As principais práticas culturais a serem consideradas visando o melhor desenvolvimento da cultura são: escolha de cultivares bem adaptados às regiões de cultivo, determinação adequada da época de semeadura, uso de espaçamentos entre fileiras e densidade de plantas adequados à cada cultivar e região, manejo da fertilidade do solo e da palhada, monitoramento e controle das plantas daninhas, pragas e doenças, além da redução ao mínimo possível das perdas na colheita (RITCHIE et al., 1994).

2.2.3 Radiação Solar

A taxa de radiação fotossinteticamente ativa interceptada pelo dossel é um dos mais importantes fatores na construção da produtividade da cultura da soja, devido sua grande influência na taxa fotossintética e na taxa de crescimento da cultura (LOOMIS; CONNOR, 2011a).

Didaticamente a fotossíntese vegetal pode ser simplificada em três etapas:

A primeira etapa é constituída do movimento do CO₂ atmosférico para dentro dos cloroplastos, na segunda etapa ocorrem as reações luminosas nas quais a absorção de ondas de radiação (faixas do azul e do vermelho do espectro visível) causam ionização de moléculas e resultam na produção de compostos de alta energia (ATP e NADPH), por fim, na terceira etapa ocorrem as reações de carboxilação, em que o ATP e NADPH gerados na etapa anterior são usados para a fixação do carbono atmosférico em compostos orgânicos (FAGERIA et al., 2006).

O rendimento máximo da soja é determinado pela otimização da capacidade da planta na interceptação da radiação solar e ou acúmulo de matéria seca durante o estágio vegetativo e o reprodutivo (WELLS, 1991 e 1993).

Para a soja, assim como outras culturas de metabolismo C_3 , a fotossíntese das folhas individuais aumenta assintoticamente até uma intensidade de $500 \mu \text{ mols m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (equivalente a 100 W m^{-2}). Esta intensidade é equivalente a cerca de 25% de pleno sol em muitas regiões de cultivo de soja (HAY; PORTER, 2006). No entanto esta relação não é transferida para as folhas em nível de dossel, tendo em vista que nesta condição ocorre sombreamento desigual para as folhas que se encontram no terço médio e inferior do dossel. As folhas do terço superior não elevam sua taxa fotossintética quando há elevação da radiação incidente acima dos 25% de sol pleno, portanto é necessário que as folhas dos terços médio e inferior, recebam mais luminosidade fotossintética ativa para que ocorra elevação da taxa fotossintética do dossel (HAY; PORTER, 2006).

O índice de área foliar (IAF) é a relação entre a área da folhagem e a superfície do solo por ela ocupada e é variável de acordo com espécies vegetais, clima, estações do ano e estágio de desenvolvimento da planta (MÜLLER, 1981; CÂMARA; HEIFFIG, 2000). A evolução do IAF ao longo do ciclo de desenvolvimento da soja é influenciada por diversos fatores, como genótipo, época de semeadura, densidade de plantas e condições ambientais, que podem alterar o crescimento foliar tanto na haste principal como nas ramificações (TAGLIAPETRA et al., 2018).

Para compreender a relação entre o IAF e a produtividade de grãos, é importante conhecer dois conceitos ecofisiológicos básicos: IAF crítico e IAF ótimo. O IAF crítico é definido pela relação da quantidade de folhas necessárias para que ocorra a interceptação de 95% da radiação solar incidente, pois a partir desse ponto, a taxa de aumento da fotossíntese líquida passa a ser decrescente. O IAF ótimo, por sua vez, representa o momento em que cessa o aumento da fotossíntese líquida (ZANON et al., 2018).

De acordo com Tagliapetra et al. (2018) de modo geral a haste principal é responsável por 85% do IAF total da planta, enquanto que as ramificações contribuem com 15%. Entretanto em condições específicas de genótipo, época de semeadura e densidade de plantas, as ramificações podem representar até 50% do IAF. De acordo com Zanon et al. (2015) a haste principal possui maior participação no

IAF total em cultivares de crescimento indeterminado do que nas de crescimento determinado, além disso os autores verificaram que a época de semedura modifica substancialmente a participação das ramificações na composição do IAF.

Além disso, os autores afirmam que o IAF ótimo para altas produtividades de soja (próximo de 6.000 kg ha⁻¹), para cultivares de crescimento indeterminado está próximo de 3,6 no estágio R1, chegando a 6,0 no estádios de enchimento de grãos. Quando o IAF é muito alto (acima de 8,0) ocorre redução da produtividade em função do excesso de área foliar, sombreamento entre as plantas, menor radiação interceptada pelo terço inferior, maior gasto energético para o crescimento vegetativo e maior ocorrência de pragas e doenças (ZANON et al., 2018).

De acordo com Dermody, Long e Delucia (2006) cultivares modernas de soja possuem em IAF médio entre 6 e 7 o que leva ao sombreamento da maioria das folhas do dossel, fazendo com que muitas delas possuam baixa taxa fotossintética. Esta condição leva a uma baixa de fotossíntese líquida em função da alta taxa respiratória, além de representar um investimento desnecessário da planta em produzir folhas que não dão o devido retorno em quantidade de fotossintatos (DREWRY et al., 2010). Srinivasan, Kumar e Long (2016) corroboraram estas evidências pois demonstraram que a redução do IAF, através da remoção de sete folhas recém emergidas durante o período de enchimento dos grãos em soja pode proporcionar aumento de produtividade de até 8%.

2.3 ARRANJO ESPACIAL DE PLANTAS

O arranjo de plantas pode ser modificado pela variação na densidade de plantas e pelo espaçamento entre linhas, alterando a área e a forma da área disponível para cada planta. Isto se reflete na competição intraespecífica, influenciando no rendimento de grãos da cultura (COX; CHERNEY, 2011; DE BRUIN; PEDERSEN, 2008; SILVA et al., 2015; THOMPSON et al., 2015; ZHOU; CHEN; OUYANG, 2015) e no aspecto fitossanitário, podendo alterar a ocorrência de doenças (LIMA et al., 2012), pragas (BUCHANAN et al., 2015), plantas daninhas (BIANCHI et al., 2010) e a eficiência na aplicação de agroquímicos (HOLTZ et al., 2014).

Diversas pesquisas já foram direcionadas à mudança do arranjo de plantas, com a redução dos espaçamentos entre fileiras mantendo-se ou não a mesma

densidade de plantas por unidade de área (PROCÓPIO et al., 2014; FERREIRA et al., 2018). Essas alterações no arranjo podem resultar em maiores rendimentos, devido ao aproveitamento mais eficiente da radiação solar, água e dos nutrientes, e menor infestação de plantas daninhas através do fechamento mais rápido do dossel (GUBIANI, 2005).

Os resultados positivos obtidos com os ajustes no arranjo de plantas das culturas estão associados, de acordo com Rambo et al. (2004) e Balbinot Jr. e Fleck (2005), a vários fatores, tais como: melhor uso da água, em razão do fechamento mais rápido do dossel e redução de perdas por evaporação; maior cobertura do solo; melhor distribuição horizontal de raízes; redução da competição intraespecífica; aumento do aproveitamento dos nutrientes presentes no solo; e maior interceptação da radiação solar pelas culturas.

Segundo Heiffig (2002), ao se reduzir o espaçamento entre fileiras sem o devido ajuste na densidade de plantas na fileira, pode-se contribuir para o acamamento da cultura. No entanto, se o ajuste resultar em poucas plantas por metro, as plantas poderão crescer menos em altura e ramificar mais.

Por outro lado, para Procópio et al. (2014) a utilização de espaçamento entre linhas reduzido, mantendo-se a mesma população de plantas por área, aumenta a distância entre as plantas da mesma fileira. Isso resulta em distribuições de plantas mais equidistantes em relação aos arranjos de plantas com maiores espaçamentos entre fileiras. Essa condição mais equidistante resulta em menor competição por luz no início do ciclo, reduzindo o sombreamento entre as plantas de soja.

2.3.1 Densidade de Plantas

A soja possui tolerância a uma ampla variação na população de plantas, alterando-se mais sua morfologia que o rendimento de grãos (BOARD, 2000, GAUDENCIO et al., 1990). Esta característica é definida como plasticidade fenotípica (PROCÓPIO et al., 2013). Pesquisas documentaram que 95% das máximas produtividades observadas foram obtidas com densidades de semeadura variando entre 73 e 815 mil sementes ha⁻¹ (COX; CHERNEY, 2011; DE BRUIN; PEDERSEN,

2008; EGLI, 1988; ELMORE, 1998; OPLINGER; PHILBROOK, 1992).

Vários trabalhos têm demonstrado que variações na densidade de plantas de soja influenciam a arquitetura das plantas e o número de vagens por planta, mas, por outro lado, há reduzida variação na produtividade de grãos por área (PROCÓPIO et al. 2013; BALBINOT JUNIOR et al. 2015ab). Esse resultado é função da alta plasticidade fenotípica da cultura, a qual consiste na capacidade da planta em alterar a sua morfologia e os componentes do rendimento, a fim de adequá-los à condição imposta pelo arranjo de plantas, permitindo a manutenção da produtividade em ampla faixa de densidade (COX; CHERNEY 2011).

Alterações morfológicas em função da densidade de plantas têm sido relatadas para a cultura da soja em termos de altura de planta (KOMORI et al., 2004; MARCHIORI et al., 1999; MARTINS et al., 1999; PAIVA; TEÓFILO; MARTINS, 1992) número de ramificações (HEIFFIG, 2002; MARCHIORI et al., 1999; MARTINS et al., 1999), número de vagens por planta (KUSS et al., 2008; PEIXOTO et al., 2000; TOURINO; REZENDE; SALVADOR et al., 2002) e número de grãos por vagem (HEIFFIG, 2002; TOURINO; REZENDE; SALVADOR, 2002). Quando em baixa densidade de plantas, tais alterações frequentemente são eficientes em compensar a redução do número de indivíduos por área aumentando a produção de grãos por indivíduo e garantindo a manutenção da produtividade (BOARD; KAHN, 2013).

Os componentes primários do rendimento da soja compreendem: número de plantas por área, número de vagens por planta, número de grãos por vagem e massa do grão (MUNDSTOCK; THOMAS, 2005). O número de vagens por planta é o componente mais afetado pela modificação da densidade de plantas. Isto se deve a grande faixa de variação que pode ser obtida neste componente, em função do ambiente, o que garante parte da plasticidade fenotípica da soja (ROBINSON et al., 2009).

O número de vagens por planta é dependente da quantidade de flores produzidas e fixadas durante os estádios R1 a R5. Já o número de grãos por vagem é pouco variável em função do ambiente de cultivo e a massa do grão apresenta valor característico de cada cultivar podendo variar com as condições ambientais e de manejo às quais a cultura seja submetida. Ferreira et al. (2017) e Werner et al. (2017) observaram que alterações na densidades de plantas podem alterar a massa dos grãos produzidos. De acordo com os autores, quando a condição ambiental é

favorável durante o período de crescimento vegetativo, seguido de déficit hídrico associado a altas temperaturas no período de enchimento de grãos, as lavouras cultivadas em maiores densidades possuem sistema radicular mais vertical e profundo que resulta em maior massa de mil grãos.

Em contrapartida, lavouras com densidades de plantas reduzidas, podem ter o sistema radicular mais horizontal, ou superficial, tornando-se mais suscetível a períodos de estresse hídrico. Adicionalmente, em safras desfavoráveis ao crescimento e desenvolvimento da soja, a densidade mínima necessária para se obter a produtividade ótima tende a aumentar, pois as plantas possuem menor plasticidade fenotípica em função da escassez de recursos ambientais (BOARD, 2000). Corassa et al. (2018) avaliaram a redução da densidade de plantas de soja em diferentes ambientes e concluíram que em ambientes com maior potencial produtivo a soja possui maior plasticidade fenotípica, e portanto, a densidade de plantas mínima ótima é menor do que em ambientes de baixo potencial produtivo.

O período de enchimento dos grãos, que se inicia no estágio R4, é o período mais crítico de desenvolvimento da planta quanto à determinação do rendimento de grãos. Estresses (umidade do solo, luz, deficiências nutricionais, geada, acamamento ou desfolha) ocorrendo a qualquer momento entre os estágios R4 a R6 reduzirão mais a produção do que a ocorrência do mesmo estresse em qualquer outro período do desenvolvimento (RITCHIE et al., 1994). Portanto, quando a soja é cultivada em densidades menores, é fundamental que as condições ambientais sejam favoráveis ao desenvolvimento vegetal durante este período, tendo em vista que a escassez de recursos pode afetar de maneira mais negativa as lavouras que possuem menor quantidade de plantas por área, tendo em vista que nessa condição a plasticidade fenotípica é menor (BOARD, 2000; CORASSA et al., 2018).

O advento da biotecnologia, agregou alta tecnologia às sementes de soja, no entanto tais avanços tem elevado consideravelmente o custo das sementes. De acordo com Board e Kahlon (2013) a alternativa mais rentável para mitigar os custos com sementes na lavoura é reduzir a densidade mínima de plantas para obtenção da produtividade ótima (conceito de densidade de plantas mínima ótima). Estudos tem demonstrado (BALL; PURCELL; VORIES, 2000; DE BRUIN; PEDERSEN, 2008) que a população de plantas mínima ótima é menor (produtividade

ótima pode ser obtida com menores densidades populacionais de plantas) quando o desenvolvimento das plantas ocorre sob condições favoráveis.

Diversas pesquisas na literatura nacional e internacional apontam para a redução na densidade de plantas (BÜCHLING et al., 2017; COX; CHERNEY; SHIELDS, 2010; DE BRUIN; PEDERSEN, 2008; LEE; EGLI; TEKRONY, 2008) baseada no retorno econômico em função da habilidade compensatória da planta de soja (BOARD, 2000; ROBINSON et al., 2009; THOMPSON et al., 2015), que propicia obtenção de produtividades semelhantes às semeadas em altas densidades (DE BRUIN; PEDERSEN, 2008; LEE; EGLI; TEKRONY, 2008; PROCOPIO et al., 2013, 2014).

Gaspar; Mitchell e Conley (2015) avaliaram a produtividade e rentabilidade do cultivo de soja com densidades de plantas variando entre 98 e 345 mil sementes ha^{-1} , em 18 ambientes de produção nos Estados Unidos para uma cultivar de crescimento indeterminado. Os resultados demonstraram que lavouras com densidades acima da mínima ótima não apresentam acréscimos significativos de produtividade e portanto resultam em menor retorno econômico do investimento. Adicionalmente, os autores observaram que a densidade mínima ótima para garantir o retorno econômico é variável em função do preço das sementes e do preço da soja, sendo que em condições de semente mais cara ou soja mais barata, a densidade mínima economicamente ótima é menor.

Já Buchling et al. (2017) avaliaram 9 cultivares de soja com tipo de crescimento determinado e indeterminado em densidades de plantas variando entre 150 e 450 mil plantas ha^{-1} nos Estados do Paraná e Rio Grande do Sul, e constataram pouca influência da densidade de plantas sobre a produtividade, demonstrando o potencial da redução da densidade de plantas para redução do custo de produção e aumento da rentabilidade.

A faixa populacional de 300 a 400 mil plantas de soja por hectare, oficialmente recomendada para o Brasil desde os anos 1980, em algumas regiões, vem diminuindo para valores entre 200 e 300 mil plantas por hectare, ora mantendo, ora perdendo produtividade conforme a interação com cultivar, época de semeadura e ambiente de produção (HEIFFIG, 2002).

Atualmente a recomendação da densidade de semeadura para cada cultivar pelas empresas obtentoras considera o espaçamento tradicionalmente

utilizado pelos agricultores, de 0,4 a 0,5 m, no entanto, salienta-se que, para definição da densidade deve-se considerar o espaçamento adotado, pois enquanto o espaçamento altera o espaçamento das plantas entre as fileiras, a densidade altera o espaçamento das plantas na mesma fileira (SILVA et al., 2011). Portanto eventuais modificações no espaçamento entre as fileiras, devem ser acompanhadas por estudos que avaliem uma possível interação com a densidade de semeadura.

Adicionalmente, deve-se considerar que não existe um espaçamento e uma densidade de plantas de soja ideal para todos os ambientes e cultivares, sendo relevante a observação da interação entre o espaçamento e densidade de plantas para várias condições de cultivo (CALISKAN et al., 2007).

De acordo Suhre et al. (2014) as máximas produtividades são obtidas em ambientes em que ocorre o fechamento completo do dossel até o início do desenvolvimento das vagens, estágio R3, adicionalmente, a produtividade da soja sofre significativa redução se o fechamento do dossel não ocorrer até o início do enchimento de grãos.

Portanto, em baixas densidades de plantas, cultivares com maior habilidade para emitir ramificações garantindo o fechamento do dossel, a fim de interceptar o máximo de radiação incidente durante as fases críticas do desenvolvimento reprodutivo, podem ser mais eficientes em compensar a redução do número de indivíduos e manter altos níveis de produtividade. Rigsby e Board (2003) constataram que existem diferenças substanciais na capacidade dos diferentes genótipos em ramificar e produzir grãos nos ramos em densidades abaixo das recomendadas.

O uso de populações muito acima da indicada, além de acarretar aumento nos gastos com sementes, pode levar ao acamamento de plantas, dificultar a penetração de agroquímicos no dossel e não proporcionar acréscimo no rendimento de grãos. Já a adoção de populações abaixo da indicada favorece o desenvolvimento de plantas daninhas e pode resultar em elevadas perdas no momento da colheita (VAZQUEZ; CARVALHO; BORBA, 2008). Marchiori et al. (1999) e Procópio et al., (2014) constataram que, quanto maior a população de plantas de soja na linha, maior a altura final das plantas, menor o diâmetro da haste principal e menor o número de ramificações por planta.

Oz (2008) obteve aumento no número de ramificações por planta com

a redução da densidade populacional, mas o rendimento de grãos não foi afetado com densidades entre 140 e 280 mil plantas ha⁻¹. A diminuição do número de ramificações por planta pode estar relacionada com a competição intraespecífica, a qual é aumentada com o incremento do número de plantas por área, alterando diretamente o número de ramos por planta (SOUZA et al., 2010).

A mudança na distribuição das plantas na lavoura pode afetar a massa seca de folhas por planta. De acordo com Procópio et al. (2014), quando as plantas estão mais bem distribuídas na área de produção, pode haver menor necessidade de produção de folhas, pela melhor distribuição das raízes na área e menor competição intraespecífica por luz, fato que acontece com maior intensidade quando se acumula maior número de plantas na fileira.

Nesse contexto, as principais variações morfofisiológicas que ocorrem na parte aérea das plantas em função da densidade vem sendo amplamente estudadas ao longo de décadas, mas as alterações no crescimento e distribuição de raízes no perfil do solo frente à densidade ainda permanecem pouco compreendidas.

O estudo da plasticidade fenotípica de raízes em resposta a modificações na densidade de plantas é muito difícil em função da natureza do sistema radicular que se encontra abaixo do solo. Entretanto, algumas pesquisas documentaram a influência da densidade de plantas sobre a orientação espacial e distribuição vertical do sistema radicular no perfil do solo em diferentes culturas agrícolas (GRIMES; MILLER; WILLEY, 1975; MASON et al., 1982; SADRAS et al., 1989).

Em revisão feita por Gundel et al., (2014), os autores identificaram evidências em diversas pesquisas, de que a densidade de plantas resulta em mudanças na distribuição vertical das raízes e em alguns casos no padrão de crescimento horizontal. Para esses autores, os efeitos da proximidade de plantas (competição intraespecífica) sobre o crescimento e desenvolvimento das raízes podem ter significativa influência na eficiência com que as culturas utilizam os recursos do solo. Desta forma, lavouras com menores densidades de plantas, possuem uma distribuição mais horizontal no perfil, enquanto que altas densidades de plantas levam a exploração mais profunda do solo. Tais comportamentos são expressos principalmente em função da alteração nos padrões qualitativos da luz, sobretudo baixa relação entre a radiação no comprimento do vermelho e vermelho distante,

percebidos pelos fitocromos na parte aérea.

Assim, o aprofundamento das raízes provocado pela competição intraespecífica, pode levar a uma maior exploração de água e nutrientes em camadas mais profundas do solo, o que pode garantir um adequado fornecimento de água caso ocorram períodos de baixa disponibilidade hídrica. Essas evidências são corroboradas por Ferreira et al. (2016) e Werner et al. (2016), em experimentos realizados no Paraná, em ambientes com restrição hídrica durante o período de enchimento dos grãos, em que houve maior massa de grãos e produtividade da soja cultivada em maiores densidades de plantas.

Neste sentido, a avaliação do sistema radicular das culturas ainda é necessária para aprimorar o entendimento da interação solo-planta-atmosfera, sendo a base para a adoção de práticas de manejo, como a densidade de plantas, que visem incrementar a exploração do solo pelas raízes em busca de água e nutrientes (BORDIN et al. 2008; FAN et al. 2016), o que pode resultar em incrementos de produtividade /ou da estabilidade produtiva (WHITE; KIRKEGAARD, 2010).

2.4 QUALIDADE DE SEMENTES EM SOJA

A qualidade das sementes de soja consiste basicamente no somatório de todos os atributos genéticos, físicos, fisiológicos e sanitários que afetam a capacidade de originar plantas de alta produtividade. Estes fatores podem influenciar a qualidade durante o processo de produção no campo, antes e durante a operação de colheita, secagem, beneficiamento e armazenamento (FRANÇA NETO; KRZYZANOWSKI, 2004)

De acordo com Popinigis (1985) a qualidade física é caracterizada pela proporção de componentes físicos, presentes nos lotes, tais como: sementes puras, sementes silvestres, outras sementes cultivadas e materiais inertes. A condição física é caracterizada pelo grau de umidade, cor, tamanho, aparência, densidade, danos mecânicos, danos causados por insetos e infecções por doenças.

Já a qualidade fisiológica é caracterizada por dois parâmetros: viabilidade e vigor. A viabilidade é medida principalmente pelo teste de germinação e visa determinar a máxima germinação do lote de sementes sob condições favoráveis. O vigor de sementes é o reflexo de um conjunto de características que determinam

sua qualidade fisiológica, ou seja, a capacidade de apresentar desempenho adequado quando expostas às diferentes condições ambientais (MARCOS FILHO, 1999).

Sementes de alto vigor apresentam maior velocidade nos processos metabólicos, propiciando emissão mais rápida e uniforme da raiz primária no processo de germinação e maior taxa de crescimento, produzindo plântulas com maior tamanho inicial (SCHUCH, 1999; MUNIZZI et al, 2010).

O desenvolvimento da semente pode ser dividido em três fases. A fase I é caracterizada pelo crescimento inicial, devido à divisão celular e ao aumento rápido no peso fresco das sementes. Na fase II ocorre acúmulo de material de reserva na semente. O teor de água diminui enquanto a matéria seca substitui a água nas células. Posteriormente, a fase III compreende a dessecação ou a desidratação das sementes, em função do declínio rápido no teor de água e da redução do peso fresco. Por fim ocorre uma redução gradual no metabolismo da semente e o embrião passa para um estado quiescente (BEWLEY et al., 2013).

As sementes de maior tamanho ou mais densas são aquelas que possuem, normalmente, embriões bem formados e com maiores quantidades de reservas, sendo potencialmente as mais vigorosas (CARVALHO; NAKAGAWA, 2012; POETA; BORRÁS; ROTUNDO, 2016). A maior quantidade de reserva aumenta a probabilidade de sucesso no estabelecimento da plântula (HAIG; WESTOBY, 1991), pois permite a sobrevivência por maior tempo em condições ambientais desfavoráveis. No entanto, há resultados controversos quanto aos efeitos do tamanho das sementes em sua qualidade fisiológica (MOURTZINIS et al., 2015; PADUA et al., 2010; PEREIRA; PEREIRA; DIAS, 2013; PICCININ et al., 2012; SOARES et al., 2013).

O desenvolvimento da semente depende do suprimento de fotoassimilados, e isso pode ser influenciado pela posição da vagem na planta (PADUA et al., 2010). Portanto, a densidade de plantas, ao alterar a arquitetura e a morfologia, (BALBINOT JUNIOR et al., 2015b; GASPAR; CONLEY, 2015;), pode afetar a partição de fotoassimilados, sobretudo entre ramos e haste principal e, conseqüentemente, o tamanho e a qualidade das sementes produzidas.

Ferreira et al. (2016) e Werner et al. (2016) demonstraram que variações na densidade de plantas podem alterar o tamanho e a massa das sementes produzidas, sobretudo quando ocorrem condições ambientais favoráveis ao crescimento da soja no período vegetativo seguido de estresse hídrico associado a

altas temperaturas no período de formação das sementes. De acordo com os autores, a acentuação da competição intraespecífica provocada por altas densidades resulta em maior aprofundamento do sistema radicular no período vegetativo, fazendo com que estas plantas possuam maior capacidade de suportar o déficit hídrico. Com isso, nessas condições, maiores densidades de plantas favorecem a produção de sementes com maior tamanho e massa. Entretanto, quando as condições foram favoráveis ao desenvolvimento da soja durante todo o ciclo, não houve diferenças entre as densidades, sobre o tamanho e massa das sementes.

Fatores relacionados ao ambiente de produção no qual as sementes são produzidas e a densidade de plantas podem alterar a qualidade fisiológica das sementes. Vazquez, Carvalho e Borba (2008) avaliaram duas cultivares de soja em densidades variando entre 160 e 400 mil plantas ha^{-1} e concluíram que a qualidade fisiológica de sementes de soja não é influenciada unicamente pela densidade de plantas, entretanto, caso a redução da densidade proporcione maior infestação de plantas daninhas, estas podem reduzir a qualidade fisiológica. Em contrapartida, Baron et al. (2018) identificaram diferenças entre o vigor de sementes de soja em resposta a diferentes densidades de plantas.

Adicionalmente, Bellaloui et al. (2014) constataram que densidades de plantas variando de 60 a 600 mil plantas ha^{-1} em quatro cultivares de soja podem alterar o teor de proteína, ácidos oleicos, açúcares e minerais (P e B) nas sementes. Assim, é provável, que tais alterações também exerçam impactos sobre o desempenho germinativo das sementes.

REFERÊNCIAS

AMARAL, V.M.G. **A importância da soja como alimento funcional para qualidade de vida e saúde**. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual de Campinas. 2006.

ARGENTA, G.; SILVA, P. R. F.; SANGOI L. Arranjo de plantas em milho: análise do estado da arte. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 6, p. 1075-1084, 2001.

BACHA, C.J.C; CARVALHO, L.V. What explains the intensification and diversification of Brazil's agricultural production and exports from 1990 to 2012? **IRIBA Working Paper**, v.02, 2014. Disponível em: <http://www.brazil4africa.org/wp-content/uploads/publications/working_papers/IRIBA_WP02_What_Explains_The_Intl_ntensificat_and_diversification_of_Brazil's_Agricultural_Production_and_Exports.pdf> . Acesso em 16/05/2015

BALBINOT JUNIOR, A.A.; FLECK, N.G. Manejo de plantas daninhas na cultura do milho em função do arranjo espacial de plantas e características dos genótipos. **Ciência Rural**, v.35, n.1, p.245-252, 2005.

BALBINOT JUNIOR, A.A.; PROCOPIO, S.O.; COSTA, J.M.; KOSINSKI, C.L.; PANISON, F.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J.C. Espaçamento reduzido e plantio cruzado associados a diferentes densidades de plantas de soja. **Semina Ciências Agrárias**, v.36, n.5, p.2977-2986, 2015b.

BALBINOT JUNIOR, A.A.; PROCÓPIO, S.O.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J.C.; PANISON, F. Semeadura cruzada em cultivares de soja com tipo de crescimento determinado. **Semina Ciências Agrárias**, v. 36, n.3, p.1215-1226, 2015a.

BALL, R.A.; PURCELL, L.C.; VORIES, T.C. Optimizing soybean plant population for a short-season production system in the Southern USA. **Crop Science**, v. 40, n.3, p.757-764, 2000.

BELLALOU, N.; MENGISTU, A.; WALKER, E.R.; YOUNG, L.D. Soybean seed composition as affected by seeding rates and row spacing. **Crop Science**, v.54, n.4, p.1782-1795, 2014.

BEWLEY, J.D.; BRADFORD, K.; HILHORST, H.; NONOGAKI, H. **Seeds: physiology of development, germination and dormancy**. 3 ed. New York: Springer, 2013. 392p.

BIANCHI, M.A.; FLECK, N.G.; LAMEGO, F.P; AGOSTINETTO, D. Papéis do arranjo de plantas e do cultivar de soja no resultado da interferência com plantas competidoras. **Planta Daninha**, v. 28, n. spe, p. 979-991, 2010.

BOARD, J. E.; KAHN, C. S. Soybean Yield Formation: What Controls It and How It Can Be Improved. In: EL-SHEMY, H.A. (ed). **Soybean physiology and biochemistry**. InTech, 2011.p. 1-37.

BOARD, J.E. Light interception efficiency and light quality affect yield compensation of soybean at low plant populations. **Crop Science**, v.40, n.5, p.1285-1294, 2000.

BOARD, J.E.; HARVILLE, B.G. Explanations for greater light interception in narrow vs. wide-row soybean. **Crop Science**, v. 32, n. 1, p. 198-202, 1992.

BOARD, J.E.; KAHN, C.S. Morphological responses to low plant population differ between soybean genotypes. **Crop Science**, v.53, n.3, p.1109-1119, 2013.

BORDIN I.; NEVES, C.S.P.; MEDINA, C.C.; SANTOS, J.C.F.; TORRES, E.; URQUIAGA, S. Matéria seca, carbono e nitrogênio de raízes de soja e milho em plantio direto e convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, n.12, p.1785-1792, 2008.

BREVEDAN, R.E.; EGLI, D.B. Short periods of water stress during seed filling, leaf senescence, and yield of Soybean. **Crop Science**, v. 43, n. 6 p. 2083-2088, 2003.

BUCHANAN, A. L.; ZOBEL, E.; HINDS, J.; ROSARIO-LEBRON, A.; HOOKS, C. R.R. Can row spacing influence arthropod communities in soybean? Implications of early and late planting. **Environmental entomology**, v.44, n.3, p.557-561, 2015.

BÜCHLING, C.; OLIVEIRA NETO, A. M.; GUERRA, N.; BOTTEGA, E. L. Uso da plasticidade fenotípica como estratégia para a redução da população de plantas em cultivares de soja. **Revista Agrarian**, v.10, n.35, p.22-30, 2017.

CALISKAN, S.; ARSLAN, M.; UREMIS, I.; CALISKAN, M.E. The effects of row spacing on yield and yield components of full season and double-cropped soybean. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, v.31, n.3, p.147-154, 2007.

CÂMARA, G.M.S. **Ecofisiologia da soja e rendimento**. In: CÂMARA, G.M.S. Soja: tecnologias da produção. Piracicaba: ESALQ, 1998. p.256-77.

CÂMARA, G.M.S.; HEIFFIG, L.S. Fisiologia, ambiente e rendimento da cultura da soja. In: CÂMARA, G.M.S. **Soja: tecnologia da produção**. Piracicaba: ESALQ/LPV, 2000. p. 81- 120.

CARGNIN, A.; SOUZA, M.A.; CARNEIRO, P.C.S.; SOFIATTI, V. Interação entre genótipos e ambientes e implicações em ganhos com seleção em trigo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n.6, p. 987-993, 2006.

CARVALHO, N.M.; NAKAGAWA, J. **Sementes: ciência, tecnologia e produção**. 5.ed. Jaboticabal: FUNEP, 2012, 590p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos. Safra 2018/2019. Sétimo levantamento**. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>>. Acesso em: 25/04/2019.

CORASSA, G.M.; AMADO, T.J.C.; STRIEDER, M.L.; SCHWALBERT, R.; PIRES, J.L.F.; CARTER, P.R.; CIAMPITTI, I.A. Optimum soybean seeding rates by yield environment in Southern Brazil. **Agronomy Journal**, v.110, n.6, p.1-9, 2018.

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

COX, W.J.; CHERNEY, J.H.; SHIELDS, E. Soybeans compensate at low seeding rates but not at high thinning rates. **Agronomy Journal**, v. 102, n.4, 1238-1243, 2010.

DE BRUIN, J.L.; PEDERSEN, P. Effect of row spacing and seeding rate on soybean yield. **Agronomy Journal**, v.100, n.3, p.704-10, 2008.

DERMODY, O.; LONG, S.P.; DELUCIA, E.H. How does elevated CO₂ or zone affect the leaf-area index of soybean when applied independently. **New Phytologist**, v.169, p145-155, 2006.

DREWRY, D.T.; KUMAR, P.; SONG, S.; BERNACCHI, C.; LIANG, X.Z.; SIVALAPAN, M. Ecohydrological responses of dense canopies to environmental variability: 1. Interplay between vertical structure and photosynthetic pathway. **Journal of Geophysical Research**, v.115, n.4, p.1-25, 2010

EGLI, D.B. Plant density and soybean yield. **Crop Science**, Madison, v.28, n. 6, p.977-981, 1988.

ELMORE, R.W. Soybean cultivar responses to row spacing and seeding rates in rainfed and irrigated environments. **Journal of Production Agriculture**, v.11, n. 3, p.326-331, 1998.

EMBRAPA: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Tecnologias de Produção de Soja - Região Central do Brasil 2012 e 2013**. Londrina: Embrapa Soja, 2011. 261 p.

FAGERIA, N.K.; BALIGAR, V.C.; CLARK, R.B. Photosynthesis and crop yield. In: FAGERIA, N.K.; BALIGAR, V.C.; CLARK, R.B. **Physiology of Crop Production**, New York: Food Products Press, 2006. p. 95-116,

FAN J.; MCCONKEY; B.; WANG, H.; JANZEN, H. Root distribution by depth for temperate agricultural crops. **Field Crops Research**, v.189, n.2, p. 68-74, 2016.

FARIAS, J.R.B.; NEPOMUCENO, A.L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2007. 10 p. (Embrapa Soja – circular técnica, 48)

FERREIRA, A. S.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; WERNER, F.; ZUCARELI, C. Plant spatial arrangement affects grain production from branches and stem of soybean cultivars. **Bragantia**, v.77, n. 4, 2018.

FERREIRA, A. S.; ZUCARELI, C.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; WERNER, F.; COELHO, A. E. Size, physiological quality and green seed occurrence influenced by seeding rate in soybeans. **Semina Ciências Agrárias**, v.38, n.2, p. 595-606, 2017.

FERREIRA, A.S.; BALBINOT JUNIOR, A.A.; WERNER, F.; ZUCARELI, C.; FRANCHINI, J.C.; DEBIASI, H. Plant density and mineral nitrogen fertilization influencing yield, yield components and concentration of oil and protein in soybean grains. **Bragantia**, v. 75, n.3, p. 362-370, 2016.

FOULKES, M.J.; REYNOLDS, M.P.; SYLVESTER-BRADLEY, R. Genetic

improvement of grain crops: Yield potential. In: SADRAS, V.O.; CALDERINI, D.F. **Crop Physiology: Applications for genetic improvement and agronomy**. Elsevier, Burlington, 2009. P.355-385.

FRANÇA NETO, J.B.; KRZYZANOWSKI, F.C. O controle de qualidade inserido no sistema de produção de sementes. Brasília: ABRASEM, 2004. p. 34-38.

GASPAR, A.P.; CONLEY, S.P. Responses of canopy reflectance, light interception, and soybean seed yield to replanting suboptimal stands. **Crop Science**, v.55, p.377-385, 2015.

GASPAR, A.P.; MITCHELL, P.D.; CONLEY, S.P. Economic risk and profitability of soybean fungicide and insecticide seed treatments at reduced seeding rates. **Crop Science**, v.55, n.2, p.924-933, 2015.

GAUDENCIO, C.A.A.; GAZZIERO, D.L.P.; JASTER, F.; GARCIA, A; WOBETO, C. **População de plantas de soja no sistema de semeadura direta para o centro-sul do estado do Paraná**. Londrina: Embrapa, CNPso, 1990. 4p. (Comunicado Técnico 47).

GRIMES, D.W.; MILLER, R.J.; WILEY, P.L. Cotton and corn root development in two field soils of different strength characteristics. **Agronomy Journal**, v.67, n.3, p.519-523, 1975.

GUBIANI, E.I. **Crescimento e rendimento da soja em resposta a épocas de semeadura e arranjo de plantas**. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

GUNDEL, P. E.; PIERIK, R.; MOMMER, L.; BALLARÉ, C. L. Competing neighbors: Light perception and root function. **Oecologia**, v.176, n.1, p.1-10, 2014.

HAIG, D.; WESTOBY, M. Seed size, pollination casts and angiosperm success. **Evolutionary Ecology**, v.5, p.231-247, 1991.

HAY, R.; PORTER, J. **The physiology of crop yield**. 2 ed. Singapore: Blackwell Publishing, 2006.

HEIFFIG, L.S. **Plasticidade da cultura da soja (Glycine max (L) Merrill) em diferentes arranjos espaciais**. Dissertação (Mestrado) Esalq. Piracicaba, 2002.

HELMS, T.C.; DECKARD, E.; GOOS, R.J.; ENZ, J.W. Soybean seedling emergence influenced by days of soil water stress and soil temperature. **Agronomy Journal**, v. 88, n. 4, p. 657–661, 1996.

HIRAKURI, M. H.; LAZZAROTTO, J. J. **O agronegócio da soja nos contextos mundial e brasileiro**. 2014. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/990000/1/Oagronegociodasojanoscontextosmundialebrasileiro.pdf>. Acesso em: 07 abr. 2018

HOLTZ, V.; COUTO, R.F.; OLIVEIRA, D.G.; DOS REIS, E.F. Deposição de calda de

pulverização e produtividade da soja cultivada em diferentes arranjos espaciais. **Ciência Rural**, v. 44, n. 8, p. 1371-1376, 2014.

HORVAT, R.; WATANABE, M.; YAMAGUCHI, C.K. Fertilizer consumption in the region MATOPIBA and their reflections on Brazilian soybean production. **International Journal of Agriculture and Forestry**, v.5, n.1, p.52-59, 2015.

KOMORI, E.; HAMAWAKI, O.T.; SOUZA, M.P; SHIGIHARA, D.; BATISTA, A.M. Influencia da época de semeadura e população de plantas sobre características agrônômicas na cultura da soja. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.20, n.3 p.13-19, 2004.

KUSS, R.C.R.; KONIG, O.; DUTRA, L.M.C.; BELLÉ, R.A.; ROGGIA, S.; STURMER, G.R. Populações de plantas e estratégias de manejo de irrigação na cultura da soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 4, p. 1133-1137, 2008.

LEE, C.D.; EGLI, D.B.; TEKRONY, D.M. Soybean response to plant population at early and late planting dates in the Mid-South. **Agronomy Journal**, v.100, n. 4, p.971-976, 2008.

LIMA, S.F; ALVAREZ, R.C.F.; THEODORO, G.F.; BAVARESCO, M.; SILVA, K.S. Efeito da semeadura em linhas cruzadas sobre a produtividade de grãos e a severidade da ferrugem asiática da soja. **Bioscience Journal**, v.28, n.6, p.954-962, 2012.

LOOMIS, R.S.; CONNOR, D.J. Community concepts. In: CONNOR, D.J.; LOOMIS, R.S.; CASSMAN, K.G. **Crop ecology: Productivity and management in agricultural systems**. 2 ed. Cambridge, Cambridge Univ. Press, 2011. p.44-69.

LOOMIS, R.S.; CONNOR, D.J. Water relations. In: CONNOR, D.J.; LOOMIS, R.S.; CASSMAN, K.G. **Crop ecology: Productivity and management in agricultural systems**. 2 ed. Cambridge, Cambridge Univ. Press, 2011. p. 229-260.

MARCHIORI, L.F.S.; CÂMARA, G.M.S.; PEREIRA, C.P.; MARTINS, M.C. Desempenho vegetativo de cultivares de soja *Glycine max* (L.) Merrill em épocas normal e safrinha. **Scientia Agricola**, v. 56, n. 2, p. 383-390, 1999.

MARCOS FILHO, J.; GODOY, O.P.; CÂMARA, G.M.S. Tecnologia da produção. In: CÂMARA, G.M.S. et al. **Produção, pré-processamento e transformação agroindustrial**. São Paulo: Secretaria da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia, 1982. p. 1-39.

MARCOS FILHO, J. Testes de vigor: Importância e utilização. In: KRZYZANOWSKI, F. C.; VIEIRA, R. D.; FRANÇA NETO, J. B. (ed.). **Vigor de sementes: conceitos e testes**. Londrina: ABRATES, 1999, cap.1, p.1-21.

MARTINS, M.C.; CÂMARA, G.M.S.; PEIXOTO, C.P.; MARCHIORI, L.F.S.; LEONARDO, V.; MATTIAZZI, P. Épocas de semeadura, densidades de plantas e desempenho vegetativo de cultivares de soja. **Scientia Agricola**, v. 56, n. 4, p. 851-858, 1999.

- MASON, W.K.; ROWSE, H.R.; BENNIE, A.T.P; KASPAR, T.C.; TAYLOR, H.M. Responses of soybeans to two row spacings and two soil water levels. II water use, root growth and plant water status. **Field Crops Research**, v.5, n.1, p. 15-29, 1982.
- MELGES, E., LOPES, N.F., OLIVA, M.A. Crescimento, produção de matéria seca e produtividade da soja submetida a quatro níveis de radiação solar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.9, p.1073-1080, 1989
- MINOLTA, C. Manual for chlorophyll meter SPAD-502. Osaka: Minolta Radiometric Instruments Divisions, 1989. 22p.
- MOURTZINIS, S.; GASKA, J. M.; PEDERSEN, P.; CONLEY, S. P. Effect of seed mass and emergence delay on soybean yield and quality. **Agronomy Journal**, v. 107, n.1, p.181-186, 2015.
- MÜLLER, L. Fisiologia. In: MIYASAKA, S.; MEDINA, J.L. **A soja no Brasil**. Campinas, 1981. p. 109 - 129.
- MUNDSTOCK, C. M.; THOMAS, A. L. **Soja: Fatores que afetam o crescimento e o rendimento dos grãos**. UFRGS, Departamento de plantas de Lavoura da Universidade do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005. 31p.
- MUNIZZI, A; BRACCINI.; A.L.; RANGEL, MA. S; SCAPIM; CA; ALBRECHT, L.P. Qualidade de sementes de quatro cultivares de soja, colhidas em dois locais no estado de Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Sementes**, v.32, n.1, p.176-185, 2010.
- NAKAGAWA, A.C.S.; ITOYAMA, H.; ARIYOSHI, Y.; ARIO, N.; TOMITA, Y.; KONDO, Y.; IWAYA-INOUE, M.; ISHIBASHI, Y. Drought stress during soybean seed filling affects storage compounds through regulation of lipid and protein metabolism. **Acta Physiologiae Plantarum**, v.40, p.111, 2018.
- OPLINGER, E.S.; PHILBROOK, B.D. Soybean planting date, row width and seeding rate response in three tillage systems. **Journal of Production Agriculture**, v.5, n. 1, p.94-99, 1992
- OZ, M. Nitrogen rate and plant population effects on yield and yield components in soybean. **African Journal of Biotechnology**, v. 7, n. 24, p. 4464-4470, 2008.
- PADUA, G. P.; ZITO, R. K.; ARANTES, N. E.; FRANÇA NETO, J de B. Influência do tamanho da semente na qualidade fisiológica e na produtividade da cultura da soja. **Revista Brasileira de Sementes**, v.32, n.3, p.09-16, 2010.
- PAIVA, J.B.; TEÓFILO, E.M.; MARTINS, J.B.P. Densidade de plantio da cultura da soja, *Glycine max* (L.) Merrill, no estado do Ceará. **Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v.23, n. 1, p.103-107, 1992.
- PEIXOTO, C.P.; CÂMARA, G.M.S.; MARTINS, M.C.; MARCHIORI, L.F.S.; GUERZONI, R.A.; MATTIAZZI, P. Épocas de semeadura e densidade de plantas de soja: I. Componentes da produção e rendimentos de grãos. Piracicaba: **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 57, n. 1, p. 89 - 96, 2000.

PEREIRA, W. A.; PEREIRA, S. M. A.; DIAS, D. C. F. S. Influence of seed size and water restriction on germination of soybean seeds and on early development of seedlings. **Journal of Seed Science**, v.35, n.3, p.316-322, 2013.

PICCININ, G. G.; DAN, L. G. M; RICCI, T. T.; BRACCINI, A. L.; BARBOSA, M. C; TANA, B. M.; NETO, A. H, BAZO, G. L. Relação entre o tamanho e a qualidade fisiológica e sanitária de sementes de soja. **Revista Agrarian**, v.5, n.15, p.20-28, 2012.

POETA; F.; BORRÁS, L.; ROTUNDO, J.L. Variation in seed protein concentration and seed size affects soybean crop growth and development. **Crop Science**, v.56, n.6, p.3196-3208, 2016.

POPINIGIS, F. **Fisiologia da semente**. 2 ed. Brasília: AGIPLAN, 1985. 289 p.

PROCOPIO, S.O.; BALBINOT JUNIOR, A.A.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J.C.; PANISON, F. Plantio cruzado na cultura da soja utilizando uma cultivar de hábito de crescimento indeterminado. **Revista de Ciências Agrárias (Belém)**, v.56, n.4, p.319-325, 2013.

PROCOPIO, S.O.; BALBINOT JUNIOR, A.A.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J.C.; PANISON, F. Semeadura em fileira dupla e espaçamento reduzido na cultura da soja. **Agro@ambiente online**, v.8, n.2, p.212-221, 2014.

PROQUE, A.L.; CASSUCE, F.C.C.; SILVA, E.H. Interações de Estados Unidos e Brasil no mercado mundial de soja em grão: Uma análise dinâmica baseada nas trajetórias estocásticas das exportações. **Organizações Rurais e Agroindustriais**, v.16, n.4 (edição especial), n.518-531, 2014.

PURCELL, L.C.; SPECHT, J.E. Physiological traits for ameliorating drought stress. In: BOERMA, H.R.; SPECHT, J.E. **Soybeans: Improvement, production and uses**. 3 ed. Madison, American Society of Agronomy, 2004.

RAMBO, L.; COSTA, J.A.; PIRES, J.L.F.; PARCIANELLO, G.; FERREIRA, F.G. Estimativa do potencial de rendimento por estrato do dossel da soja, em diferentes arranjos de plantas. **Ciência Rural**, v.34, n.1, p.33-40, 2004.

RIGSBY, B.; BOARD, J.E. Identification of soybean cultivars that yield well at low plant populations. **Crop Science**, v.43, n.1, p234-239, 2003.

RITCHIE, S.W.; HANWAY, J.J.; THOMPSON, H.E.; BENSON, G.O. **How a soybean plant develops**. Ames, Iowa State University of Science and Technology: Cooperative Extension Service, 1994. 20p. (Special Report, 53).

ROBINSON, A.P.; CONLEY, S.P.; VOLENEC, J.J.; SANTINI, J.B. Analysis of high yielding, early-planted soybean in Indiana. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 1, p. 131-139, 2009.

RODRIGUES, O.; DIDONET, A.D.; LHAMBY, J.C.B.; BERTAGNOLLI, P.F.; LUZ, J.S. Resposta quantitativa do florescimento da soja à temperatura e fotoperíodo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, n.3, p. 431-437, 2001.

SADRAS, V.O.; HALL, A.J.; TRAPANI, N.; VILELLA, F. Dynamics of rooting and root-length: leaf-area relationships as affected by plant population in sunflower crops. **Field Crops Research**, v.22, n.1, p. 45-47, 1989.

SCHUCH, L.O.B. **Vigor das sementes e aspectos da fisiologia da produção em aveia-preta (Avena strigosa Schreb.)**. 1999. 127f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Sementes) – Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel” - Universidade Federal de Pelotas. 1999.

SHAW, R.H.; WEBER, C.R. Effects of canopy arrangements on light interception and yield of soybeans. **Agronomy Journal**, v. 59, n. 2, p. 155-159, 1967.

SILVA, G.S.; CECÍLIO FILHO, A.B.; BARBOSA, J.C.; ALVES, A.U. Espaçamentos entrelinhas e entre plantas no crescimento e na produção de repolho roxo. **Bragantia**, v.70, n.3., p.538-543, 2011.

SILVA, P.R.A.; TAVARES, L.A.F.; SOUSA, S.F.G.; CORREIA, T.P.S; RIQUETTI, N.B. Rentabilidade na semeadura cruzada da cultura da soja. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n.3, p.293-297, 2015.

SRINIVASAN, V.; KUMAR, P.; LONG, S.P. Decreasing, not increasing, leaf area will raise crop yields under global atmospheric change. **Global Change Biology**, v.23, n.4, p.1626-1635, 2016.

SOARES, M. M.; OLIVEIRA, G. L.; SORIANO, P. E.; SEKITA, M. C.; SEDIYAMA, T. Performance of soybean plants as function of seed size: II. Nutritional stress. **Journal of seed science**, v.35, n.4, p.419-427, 2013

SOUZA, C.A.; GAVA, F.; CASA, R.T.; BOLZAN, J.M.; KUHNEM JUNIOR, P.R. Relação entre densidade de plantas e genótipos de soja Roundup Ready TM. **Planta Daninha**, v.28, n.4, p.887-896, 2010.

SUHRE, J.J.; WEIDENBENNER, N.H.; ROWNTREE, S.C.; WILSON, E.W.; NAEVE, S.L.; CONLEY, S.P.; CASTEEL, S.N.; DIERS, B.W.; ESKER, P.D.; SPECHT, J.E.; DAVIS, V.M. Soybean yield partitioning changes revealed by genetic gain and seeding rate interactions. **Agronomy Journal**, v. 106, n.5, p.1631-1642, 2014.

TAGLIAPETRA, E.L.; STRECK, N.A.; ROCHA, T.S.M.; RICHTER, G.L.; SILVA, M.R.; CERA, J.C.; GUEDES, J.V.C.; ZANON, A. J. Optimum leaf area index to reach soybean yield potential in subtropical environment. **Agronomy Journal**, v.110, n.3, p.932-938, 2018.

THOMPSON, N.M.; LARSON, J.A.; LAMBERT, D.M.; ROBERTS, R.K.; MENGISTU, A.; BELLALLOUI, N.; WALKER, E.R. Mid-South soybean yield and net return as affected by plant population and row spacing. **Agronomy Journal**, v.107, n.3, p.979-989, 2015.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology – Laboratory of Climatology, 1955 104p. (Publications in Climatology, vol III, n.1).

TOURINO, M.C.C.; REZENDE, P.M.; SALVADOR, N. Espaçamento, densidade e uniformidade de semeadura na produtividade e características agronômicas da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, n.8 p.1071-1077, 2002.

TRIPATHY, P.; RABARA, R.C.; SHULAEV, V.; SHEN, Q.J.; RUSHTON, P.J. Understanding water-stress responses in soybean using hydroponics system – a systems biology perspective. **Frontiers in Plant Science**, v.6, p.1145, 2015.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE – USDA. **World agricultural supply and demand estimates report**. 2018. Disponível em: <<http://www.usda.gov/oce/commodity/wasde/latest.pdf>>. Acesso em: 31 jul 2018.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE – USDA. **World agricultural supply and demand estimates report**. 2019. Disponível em: <<https://www.usda.gov/oce/commodity/wasde/wasde0519.pdf>>. Acesso em: 08 maio 2019.

VAZQUEZ, G.H.; CARVALHO, N.M.; BORBA, M.M.Z. Redução na população de plantas sobre a produtividade e a qualidade fisiológica da semente de soja. **Revista Brasileira de Sementes**, v.30, n.2, p.01-11, 2008.

WELLS, R. Dynamics of soybean growth in variable planting patterns. **Agronomy Journal**, v.1, n.81, p.44-48, 1993.

WELLS, R. Soybean growth response to plant density: relationships among photosynthesis, leaf área, and light interception. **Crop Science**, v.31, n.3, p.775-756, 1991.

WERNER, F.; BALBINOT JUNIOR, A.A.; AGUIAR E SILVA, M.A.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J.C. Soybean growth affected by seeding rate and ineral nitrogen. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.20, n. 8, p. 734-738, 2016.

WERNER, F.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; FERREIRA, A. S.; AGUIAR E SILVA, M. A.; MANDARINO, J. M. G.; ZUCARELI, C. Size chlorophyll retention and protein and oil contents of grains from soybean plants in different plant spatial arrangements. **Semina Ciências Agrárias**, v.38, p.85-96, 2017.

WHITE R.G.; KIRKEGAARD J.A. The distribution and abundance of wheat roots in a dense, structured subsoil – implications for water uptake. **Plant, Cell and Environment**, v.33, n.2, p.133–148, 2010.

ZANON, A. J.; SILVA; M. R.; TAGLIAPIETRA, E. L.; CERA, J. C.; BEXAIRA, K. P.; RICHTER, G. L.; DUARTE JUNIOR, A. J.; ROCHA, T. S. M.; WEBER, P. S.; STRECK, N. A. **Ecofisiologia da soja visando altas produtividades**. Santa Maria: [s.n], 2018. 136 p.

ZANON, A. J.; STRECK, N. A.; RICHTER, G. L.; BECKER, C. C.; ROCHA, T. S. M.; CERA, J. C.; WINCK, J. E. M.; CARDOSO, A. P.; TAGLIAPIETRA, E. L.; WEBER, P. S. Contribuição das ramificações e a evolução do índice de área foliar em cultivares modernas de soja. **Bragantia**, v.74, n.3, p.279-290, 2015.

ZHOU, X.B.; CHEN, Y.H.; OUYANG, Z. Spacing between rows: effects on water-use efficiency of double-cropped wheat and soybean. **Journal of Agricultural Science**, v. 153, n.1, p.90-101, 2015.

3.ARTIGO A- DENSIDADE DE SEMEADURA MÍNIMA ÓTIMA EM CULTIVARES DE SOJA COM TIPO DE CRESCIMENTO INDETERMINADO

Resumo – Semear a soja na densidade de semeadura mínima ótima consiste em utilizar a mínima quantidade de sementes necessária para alcançar a produtividade ótima. Isto é possível em função da plasticidade fenotípica da cultura em resposta à densidade de plantas. Porém, as cultivares possuem diferenças no potencial de ramificação, que expressa a plasticidade fenotípica. O objetivo foi avaliar os impactos da redução da densidade de semeadura sobre o desempenho produtivo, e quantificar a densidade mínima ótima para produção de grãos, óleo e proteína para cultivares de soja com potencial de ramificação contrastantes. O experimento foi conduzido a campo em Londrina-PR em duas safras. O delineamento experimental foi de blocos casualizados em esquema fatorial 5 x 2 com 5 repetições. Os tratamentos foram: cinco densidades de semeadura (100, 80, 60, 40 e 20% do indicado pelo obtentor) e duas cultivares com tipo de crescimento indeterminado (BRS 1010 IPRO e NS 5959 IPRO). Avaliou-se: altura de plantas, diâmetro do caule, número de vagens por m², número de grãos por vagem, grãos oriundos dos ramos, índice de colheita, teores de óleo e proteína e a produtividade de grãos, óleo e proteína. Os dados foram submetidos a análise de variância com análise de regressão para o fator densidade de semeadura e comparação de médias pelo teste F para o fator cultivar. O número de vagens por m² e o número de grãos por vagem foram os componentes responsáveis pelo efeito compensatório da soja em resposta à redução da densidade. A massa de mil grãos é o principal componente do rendimento responsável pela redução da produtividade de grãos abaixo da densidade mínima ótima. As duas cultivares demonstraram elevada produção de grãos nos ramos em resposta à redução da densidade de semeadura, o que confere a sua plasticidade fenotípica. As cultivares alcançaram densidade de semeadura mínima ótima abaixo da faixa recomendada pelo obtentor. A BRS 1010 IPRO tem maior potencial para redução da densidade de semeadura do que a NS 5959 IPRO. Para a cultivar NS 5959 IPRO a densidade mínima ótima para a produtividade de grãos foi maior do que para a produtividade de óleo, e menor do que para a produtividade de proteína.

Palavras-chave: *Glycine max* (L. Merrill). Densidade de plantas. População de plantas. Redução da densidade. Teor de óleo. Teor de proteína.

MINIMAL OPTIMAL SEEDING RATE IN SOYBEAN CULTIVARS WITH INDETERMINATE GROWTH TYPE

Abstract - Sowing the soybean crop at minimal optimal seeding rate consists of using the minimum amount of seed required to achieve optimal yield. This is possible as a function of the phenotypic plasticity of the crop in response to plant density. However, the cultivars have differences in the branching potential, which expresses the phenotypic plasticity. The objective was to evaluate the impacts of reducing seeding rate on yield performance and to quantify the minimal optimal seeding rate for grain, oil and protein production for soybean cultivars with contrasting branching potential. The experiment was conducted in field conditions at Londrina-PR in two growing seasons. The experimental design was of randomized blocks in factorial scheme 5 x 2, with 5 replications. The treatments consisted of five seeding rates (100, 80, 60, 40 and 20% of those indicated by the breeder) and two cultivars with indeterminate growth type (BRS 1010 IPRO and NS 5959 IPRO). It was evaluated: plant height, stem diameter, number of pods per m², number of grains per pod, mass of a thousand grains, grains from the branches, harvest index, oil and protein content, yield of grains, oil and protein. Data were submitted to analysis of variance with regression analysis for the seeding rate factor and means comparison by the F test for the cultivar factor. The number of pods per m² and the number of grains per pod were the components responsible for the compensatory effect in response to lowering seeding rate. The mass of a thousand grains is the main yield component responsible for reduction of grains yield below the minimal optimal seeding rate. The two cultivars showed high production of grains in the branches in response to reduction of seeding rate, which confers their phenotypic plasticity. The cultivars reached minimal optimal seeding rate below the range recommended by the breeder. The BRS 1010 IPRO has higher potential for reduction of seeding rate than the NS 5959 IPRO. For the NS 5959 IPRO cultivar, the minimal optimal seeding rate for grains yield was higher than for the oil yield and lower than for the protein yield.

Key-words: *Glycine max* (L. Merrill). Plant density. Plant population. Reduction of density. Oil content. Protein content.

3.1 INTRODUÇÃO

A cultura da soja (*Glycine max* L. Merrill) representa atualmente a principal cultura agrícola do Brasil, com a maior área plantada e maior volume produzido entre todos os cultivos (CONAB, 2019). Além disso, o Brasil é o principal exportador de soja no mercado internacional, e também um dos principais consumidores desta oleaginosa (USDA, 2018). Desta forma, técnicas de manejo que proporcionam aumento de produtividade ou redução do custo de produção da soja, representam uma importante ferramenta para aumento da eficiência produtiva e competitividade da agricultura brasileira.

A redução da densidade de plantas é uma técnica que vêm sendo estudada com objetivo de elevar a rentabilidade da produção de soja através da redução do custo de produção sem necessariamente alterar a produtividade de grãos (DE BRUIN; PEDERSEN, 2008; THOMPSON et al., 2015). Busca-se com esta técnica, semear a soja na densidade de semeadura mínima ótima (quantidade mínima de sementes necessária para alcançar a produtividade ótima) o que pode além de reduzir o custo com sementes, desfavorecer o desenvolvimento de doenças na lavoura, facilitar a aplicação de agroquímicos e reduzir o acamamento (CARPENTER; BOARD, 1996).

A soja possui alta plasticidade fenotípica em resposta à redução da densidade de semeadura, que consiste na capacidade da planta alterar sua morfologia a fim de compensar o menor número de indivíduos por área pela maior produção por planta (FERREIRA et al., 2018). Os principais fatores que motivam a redução da densidade de plantas de soja são: acréscimo no custo de aquisição e tratamento de sementes (GASPAR et al., 2017; HIRAKURI et al., 2017), a baixa penetração de agroquímicos no dossel nas densidades atualmente utilizadas (HOLTZ et al., 2014) e a manutenção da produtividade de grãos pela expressão da capacidade compensatória. .

Entretanto, nas últimas duas décadas o mercado tem optado por cultivares que possuem maior precocidade, tipo de crescimento indeterminado e arquitetura foliar compacta (folíolos menores, com inclinação mais vertical, e menor ramificação) o que pode reduzir a plasticidade fenotípica em relação às cultivares mais antigas, com crescimento determinado e maior ramificação (PROCÓPIO et al., 2013;

RIGSBY; BOARD, 2003).

Levantamentos feitos pela CONAB (2016) constataram que de 2005 a 2015, na média de todos os Estados produtores, a participação das sementes na composição do custo operacional da produção de soja, cresceu 3,14%. Na safra 2018/19 as sementes representaram cerca de 12% (6,3 sc ha⁻¹) do custo operacional de soja na região Centro-Sul do Brasil (IMEA, 2019). O aumento do custo com sementes se deve principalmente à biotecnologia que conferiu maior valor agregado às sementes geneticamente modificadas.

A densidade mínima ótima pode variar drasticamente em função das condições ambientais. Em safras desfavoráveis ao crescimento e desenvolvimento da soja, a densidade mínima ótima tende a aumentar, pois as plantas apresentam menor plasticidade fenotípica em função da escassez de recursos ambientais (BOARD, 2000; CORASSA et al. 2018).

Além disso, de acordo com Board e Kahlon (2013) existem diferenças substanciais na capacidade dos genótipos ramificarem e produzirem grãos nos ramos em densidades sub-ótimas. Desta forma, genótipos com maior potencial de ramificação e produção de grãos nos ramos, tendem a apresentar menor densidade ótima do que aqueles com arquitetura compacta.

Adicionalmente, Bellaloui et al. (2014) demonstraram que a modificação da densidade de plantas pode alterar a composição dos grãos, sobretudo redução do teor de proteínas, com resultados variáveis entre genótipos e condições ambientais. Assim, também se faz necessário investigar, além do efeito na produtividade de grãos, o impacto da redução da densidade de plantas sobre os teores de óleo e proteína nos grãos, e na produtividade destes compostos.

O objetivo deste trabalho foi avaliar os impactos da redução da densidade de semeadura sobre o desempenho produtivo, e quantificar a densidade mínima ótima para produção de grãos, óleo e proteína para cultivares de soja com potencial de ramificação contrastantes.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram conduzidos na mesma área agrícola no município de Londrina-PR (23° 19' 54" S, 51° 19' 99" O, altitude 620 m), nas safras 2016/17 e 2017/18. O solo da área experimental foi manejado em Sistema Plantio Direto pelos últimos 15 anos e foi classificado como Latossolo distroférico (SANTOS et al., 2018). O solo apresentava os seguintes atributos na camada 0 – 0,2 m, antes da implantação dos experimentos: 15,3 g dm⁻³ de C orgânico; pH (CaCl₂) 5,9; 20,3 mg dm⁻³ de P (Mehlich-1); 0,56 cmol_c dm⁻³ de K trocável; 5,2 cmol_c dm⁻³ de Ca trocável; 2,6 cmol_c dm⁻³ de Mg trocável; 5,4 mg dm⁻³ de S e 70% de saturação por bases. A granulometria do solo é composta por 710, 82 e 208 g kg⁻¹ de argila, silte e areia, respectivamente.

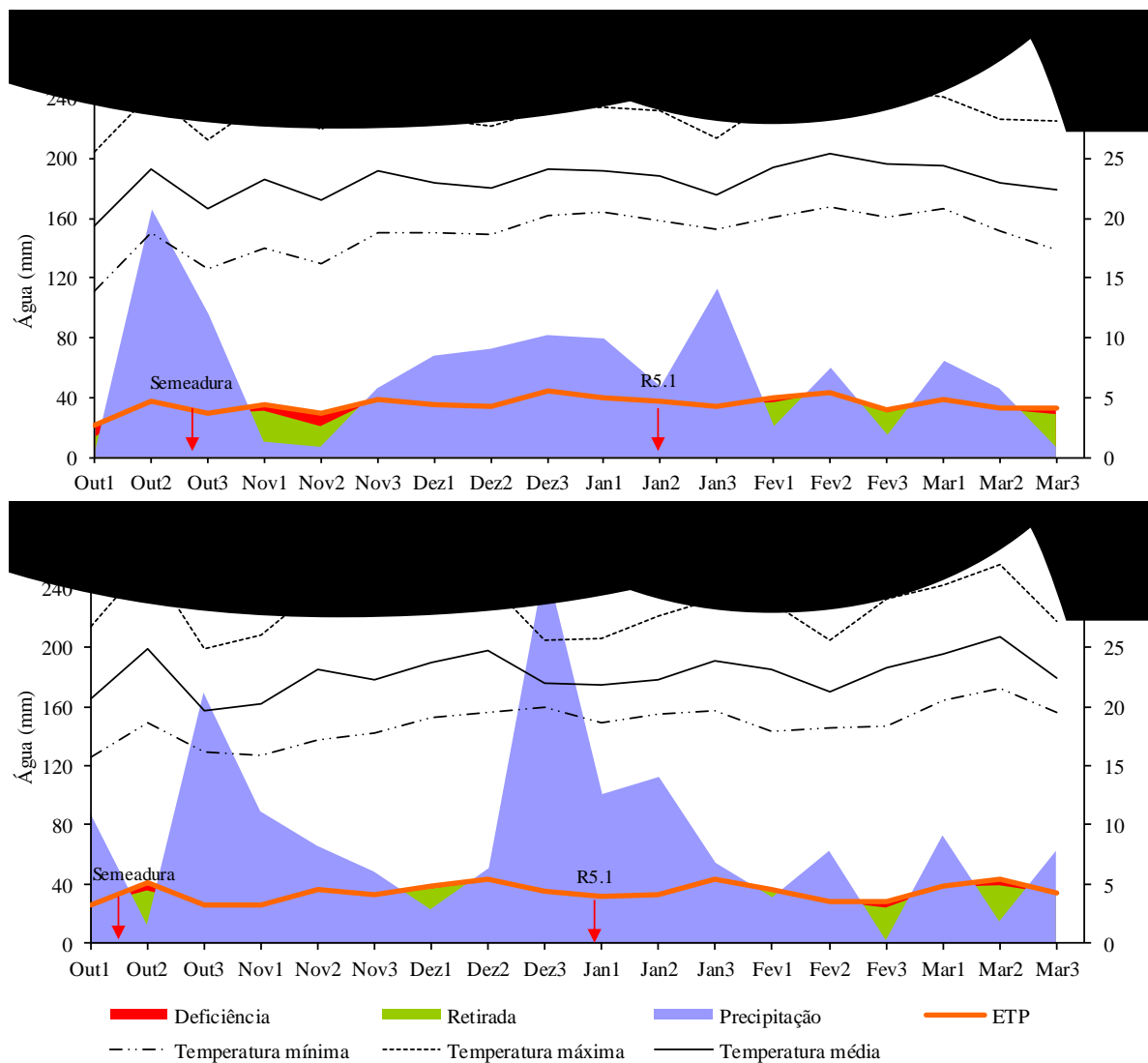
O delineamento experimental foi de blocos completos casualizados em esquema fatorial 5 x 2, com cinco repetições. Os tratamentos consistiram de cinco densidades de plantas (100, 80, 60, 40 e 20 % em relação à densidade recomendada pelo obtentor) e duas cultivares de soja com tipo de crescimento indeterminado (BRS 1010 IPRO e NS 5959 IPRO). A BRS 1010 IPRO é uma cultivar com maior porte, e potencial de ramificação do que a NS 5959 IPRO, que é considerada uma cultivar de arquitetura foliar compacta. A contrastância entre essas cultivares, faz com que a densidade de semeadura recomendada para cada uma delas sejam discrepantes.

A faixa de densidade de semeadura recomendada para as cultivares BRS 1010 IPRO e NS 5959 IPRO na região em que foi conduzido o experimento é de 265 a 310 e 380 a 420 mil plantas ha⁻¹, respectivamente. Para definição das densidades de semeadura, foi considerado como recomendado, o valor máximo dentro da faixa recomendada para cada cultivar. Portanto os tratamentos foram constituídos das seguintes densidades de semeadura: 310, 248, 186, 124 e 62 mil sementes viáveis ha⁻¹, para a cultivar BRS 1010 IPRO e 420, 336, 252, 168 e 84 mil sementes viáveis ha⁻¹ para a cultivar NS 5959 IPRO.

O clima da região é classificado como subtropical úmido (Cfa), de acordo com a classificação de Köppen. Os dados de precipitação pluvial e temperatura do ar de ambas as safras foram obtidos em estação agrometeorológica, distante cerca de 500 m do experimento e estão apresentados na Figura 3.1. Adicionalmente, foi calculado o balanço hídrico climatológico sequencial (BHCS), de acordo com a

metodologia proposta por Thornthwaite e Mather (1955), considerando a capacidade de água disponível de 75 mm (Figura 1).

Figura 3.1 – Precipitação pluvial e balanço hídrico climatológico sequencial, por decêndio, durante o período de condução dos experimentos. Londrina, Paraná, Brasil, Safras 2016/17 (A) e 2017/18 (B).



A sementeira foi realizada nos dias 28 de outubro de 2016 e 06 de outubro de 2017, utilizando uma sementeira-adubadora equipada com sulcadores do tipo disco duplo defasado, e dosadores de sementes do tipo disco perfurado com dupla fileira de furos. A sementeira foi regulada para semear a densidade almejada em cada tratamento, corrigida pelo poder germinativo das sementes. O espaçamento

entre fileiras adotado foi de 0,45 m. As parcelas mediram 10,0 m de comprimento e 5,0 m de largura, totalizando 50,0 m². A área útil colhida foi de 7,5 m² na parte central da parcela.

As sementes foram tratadas com Standak Top[®] (piraclostrobina + tiofanato metílico + fipronil – 3 mL kg⁻¹ de sementes) e inoculante líquido Gelfix 5[®] (5x10⁹ unidades formadoras de colônia de bactérias fixadoras de N mL⁻¹ – 2 mL kg⁻¹ de sementes) no momento da semeadura. O controle de pragas, doenças e plantas daninhas, seguiu as recomendações técnicas da cultura e foi igual para todos os tratamentos.

A densidade de plantas emergida foi avaliada após a completa emergência das plantas (estádio V3), contabilizando-se as plantas emergidas em 3 m lineares em dois locais de cada parcela, totalizando 6 m lineares por parcela.

Para as avaliações fitométricas e de componentes do rendimento foram coletadas, em cada parcela, as plantas presentes em 1,0 m linear. Foram determinados: a altura de plantas, o diâmetro do caule, o número de vagens m⁻², o número de grãos por vagem, a massa de mil grãos, a massa de grãos oriunda dos ramos, o índice de colheita aparente (ICA) e os teores de óleo e proteína nos grãos.

O ICA não considera a massa de folhas senescidas, e foi calculado através da equação: massa seca de grãos/(massa seca de grãos + massa seca da palha) (HAY, 1995).

Os teores de proteína e óleo foram determinados em grãos íntegros pela técnica da Refletância do Infravermelho Próximo (NIR), conforme descrito por Heil (2010). Os grãos inteiros e limpos foram submetidos a leituras, em equipamento da marca Thermo, modelo Antaris II, dotado de esfera de integração com resolução de 4 cm⁻², média de 32 scans e background a cada leitura. Para a predição, foram utilizados modelos matemáticos desenvolvidos pela Embrapa Soja para teores de proteína - 180 padrões, coeficiente de correlação (r) = 0,97, erro padrão da calibração (RMSEC) = 0,64 e óleo - 170 padrões, r = 0,98 e RMSEC = 0,45.

A produtividade foi avaliada pela colheita mecanizada de todas as plantas presentes na área útil, com teor de água nos grãos corrigido para 130 g de água por quilograma de grãos. Foi determinada a produtividade de óleo e proteína, multiplicando-se a produtividade de grãos de cada parcela, pelos teores destes compostos nos grãos da respectiva parcela. Os resultados foram expressos em kg de

grãos ha⁻¹, kg de óleo ha⁻¹ e kg de proteína ha⁻¹.

A análise estatística dos dados foi feita através da análise do teste de Shapiro-Wylk para constatar a normalidade, Teste de Hartley para homocedasticidade das variâncias, análise de variância com comparação pelo teste F, para o fator cultivar, e análise de regressão para a densidade de plantas ($p < 0,05$).

Para as produtividades de grãos, de óleo e de proteína, efetuou-se o desdobramento mesmo não havendo interação significativa, conforme sugerido por Perecin e Cargneluti Filho (2008) e Barbin (2013). Este procedimento possibilita uma análise mais detalhada do comportamento de cada cultivar e revela resultados importantes do ponto de vista prático. Para essas variáveis optou-se pelo ajuste da regressão segmentada, também conhecida como linear-platô, em função do comportamento biológico da soja em resposta à redução da densidade de semeadura. Para as demais variáveis, adotou-se a regressão linear ou polinomial de segundo grau.

O método de regressão linear segmentada com platô possui dois segmentos, o primeiro descreve uma reta crescente até um determinado valor P da curva que é o platô de resposta, e a partir desse, o valor assume uma constante P , já que o aumento da densidade não proporciona ganho de produtividade a partir deste ponto. Para estimar a densidade mínima ótima, utilizou-se o seguinte modelo:

$$Y_i = \begin{cases} \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i & \text{se, } X_i \leq X_c \\ P + \varepsilon_i & \text{se, } X_i > X_c \end{cases} \quad (1)$$

em que Y_i é a produtividade estimada; X_i é a densidade de semeadura, X_c é a densidade ótima para a qual o modelo linear se transforma em um platô, em relação a abscissa; P é a produtividade no ponto correspondente ao platô; β_0 representa o intercepto e β_1 o coeficiente angular, do segmento linear e ε_i é o erro associado a Y_i considerados independentes e normalmente distribuídos com média 0 e variância constante.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na primeira safra embora tenha havido um moderado déficit hídrico durante os dois primeiros decêndios de novembro, houve adequado volume (1009 mm) e distribuição da precipitação pluvial ao longo do ciclo da cultura. No primeiro e no terceiro decêndio de fevereiro a precipitação pluvial foi menor do que a evapotranspiração, entretanto o volume de água armazenado no solo foi suficiente para suprir a cultura e garantir a retirada de água do solo, em ambos períodos (Figura 3.1a).

Já na segunda safra houve um período de déficit hídrico de baixa intensidade, logo após a emergência da cultura, no segundo decêndio de outubro. Da mesma forma que na primeira safra, houve adequada distribuição da precipitação pluvial e um volume total de 1321 mm de água. Nas duas safras, as temperaturas mínimas, médias e máximas, estiveram próximas das médias históricas e não representaram impedimento para o desenvolvimento da soja (SIBALDELLI; FARIAS, 2017; 2018).

Em ambas as safras a densidade de plantas estabelecidas foi inferior à densidade almejada para as duas cultivares (Tabela 3.1). O estabelecimento de um estande com menor número de plantas do que o calculado no planejamento da semeadura é comum em condições de campo (SUHRE et al., 2014). Entretanto a cultivar NS 5959 IPRO na segunda safra, apresentou percentual de emergência muito abaixo do almejado em todos os tratamentos. Este fato pode ter ocorrido em função de diferenças no vigor das sementes, tendo em vista que ambas as cultivares foram semeadas no mesmo dia, com a mesma semeadora e com correção da quantidade de sementes pelo percentual germinativo. Ressalta-se, que o déficit hídrico ocorrido dias após a semeadura representa uma condição típica em que se manifesta o efeito negativo do baixo vigor das sementes.

Cox e Cherney (2011) também obtiveram densidade de plantas emergidas, muito abaixo do almejado na semeadura. Para estes autores, muitos fatores bióticos e abióticos interferem no estabelecimento do estande, tais como: inadequado funcionamento da semeadora, problemas sanitários e fisiológicos das sementes, danos em plântulas ocasionados por insetos praga, compactação do solo e estresses hídricos e térmicos.

Tabela 3.1 – Densidade de plantas almejadas e estabelecidas das cultivares BRS 1010 IPRO e NS 5959 IPRO, avaliada no estágio V3 de desenvolvimento da soja. Londrina-PR, safras 2016/17 e 2017/18.

| | Densidade almejada* | Densidade estabelecida* | |
|-----------------|---------------------|-------------------------|---------|
| | | 2016/17 | 2017/18 |
| BRS 1010 | 310,00 | 275,55 | 267,40 |
| | 250,00 | 235,55 | 234,44 |
| | 185,00 | 156,67 | 171,85 |
| | 125,00 | 123,33 | 133,33 |
| | 60,00 | 65,55 | 69,63 |
| NS 5959 | 420,00 | 373,33 | 302,22 |
| | 335,00 | 296,66 | 228,89 |
| | 250,00 | 218,89 | 162,22 |
| | 170,00 | 170,00 | 115,55 |
| | 85,00 | 84,44 | 66,67 |

* mil plantas ha⁻¹

O resumo da análise de variância, a média geral dos dados, o coeficiente de variação e a significância pelo valor de F, para ambas as safras estão apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Resumo da análise de variância com os respectivos valores de F e sua significância, média geral e coeficiente de variação para as características agrônômicas avaliadas: Londrina, PR. Safras 2016/17 e 2017/18.

| Fontes de Variação | safra 2016/17 | | | | | | | |
|--------------------|---------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|--|
| | GL | AP | DC | NV | NGV | MMG | GOR | |
| Cultivar (C) | 1 | 35,26** | 34,50** | 0,04 ^{ns} | 2,28 ^{ns} | 49,07** | 11,32** | |
| Densidade (D) | 4 | 2,60 ^{ns} | 54,02** | 0,22 ^{ns} | 0,93 ^{ns} | 2,6* | 54,95** | |
| Bloco | 4 | 3,7 | 1,5 | 1,3 | 0,4 | 0,3 | 53,8 | |
| C x D | 4 | 0,97 ^{ns} | 7,25 ^{ns} | 0,06 ^{ns} | 2,15 ^{ns} | 0,39 ^{ns} | 87,81 ^{ns} | |
| Média | | 99,32 | 8,86 | 1414,28 | 2,45 | 139,5 | 28,19 | |
| CV (%) | | 13,1 | 10,14 | 16,86 | 2,89 | 7,00 | 28,93 | |
| | | ICA | TOL | TPR | PROD | PROL | PROT | |
| Cultivar (C) | 1 | 29,15** | 8,51** | 90,44** | 40,79** | 22,59** | 65,14** | |
| Densidade (D) | 4 | 0,92 ^{ns} | 1,50 ^{ns} | 4,61** | 7,33** | 5,09** | 7,13** | |
| Bloco | 4 | 0,5 | 2,6 | 0,3 | 1,3 | 1,7 | 1,0 | |
| C x D | 4 | 0,64 ^{ns} | 1,78 ^{ns} | 1,20 ^{ns} | 2,20 ^{ns} | 1,14 ^{ns} | 2,24 ^{ns} | |
| Média | | 0,55 | 22,4 | 35,1 | 3978,2 | 888,9 | 1399,3 | |
| CV (%) | | 6,98 | 2,94 | 1,97 | 7,85 | 8,86 | 8,50 | |
| | | safra 2017/18 | | | | | | |
| | GL | AP | DC | NV | NGV | MMG | GOR | |
| Cultivar (C) | 1 | 41,61** | 24,81** | 38,56** | 1,27 ^{ns} | 46,29** | 2,25 ^{ns} | |
| Densidade (D) | 4 | 7,73** | 23,87** | 1,9 ^{ns} | 2,98* | 3,75* | 39,29** | |
| Bloco | 4 | 2,2 | 2,1 | 0,9 | 0,8 | 2,3 | 0,3 | |
| C x D | 4 | 1,30 ^{ns} | 1,30 ^{ns} | 0,68 ^{ns} | 4,24 ^{ns} | 2,24 ^{ns} | 3,87* | |
| Média | | 83,1 | 9,2 | 1406,7 | 2,4 | 149,9 | 18,7 | |
| CV (%) | | 9,62 | 12,19 | 16,02 | 6,39 | 6,74 | 36,65 | |
| | | ICA | TOL | TPR | PROD | PROL | PROT | |
| Cultivar (C) | 1 | 10,46* | 4,16* | 60,86** | 6,24* | 10,50** | 0,08 ^{ns} | |
| Densidade (D) | 4 | 1,55 ^{ns} | 0,70 ^{ns} | 0,93 ^{ns} | 23,55** | 19,55** | 19,67** | |
| Bloco | 4 | 1,38 | 0,64 | 0,82 | 1,31 | 0,95 | 0,93 | |
| C x D | 4 | 0,47 ^{ns} | 1,48 ^{ns} | 0,53 ^{ns} | 1,78 ^{ns} | 1,41 ^{ns} | 2,11 ^{ns} | |
| Média | | 0,57 | 23,3 | 34,1 | 3962,4 | 924,0 | 1348,7 | |
| CV (%) | | 6,14 | 4,02 | 3,47 | 9,92 | 10,42 | 11,20 | |

^{ns}, * e **: Não significativo, significativo a 5% e a 1% de probabilidade, respectivamente. Altura de plantas (AP), diâmetro do caule (DC), número de vagens por m² (NV), número de grãos por vagem (NGV), massa de mil grãos (MMG), grãos oriundos dos ramos (GOR), índice de colheita aparente (ICA), teor de óleo nos grãos (TOL), teor de proteína nos grãos (TPR), produtividade de grãos (PROD), produtividade de óleo (PROL) e produtividade de proteína (PROT).

Para a altura de plantas, houve diferença significativa entre as cultivares em ambas as safras (Tabela 2). Na primeira safra a cultivar BRS 1010 IPRO apresentou altura de plantas aproximadamente 20% superior à NS 5959 IPRO. Na

segunda safra ambas apresentaram altura de plantas menor do que na primeira, mas a superioridade da BRS 1010 IPRO em relação à esta característica se repetiu, e a altura de plantas foi 17% maior do que a NS 5959 IPRO (Tabela 3.3). Esses dados comprovam o maior porte da BRS 1010 IPRO em relação à NS 5959 IPRO.

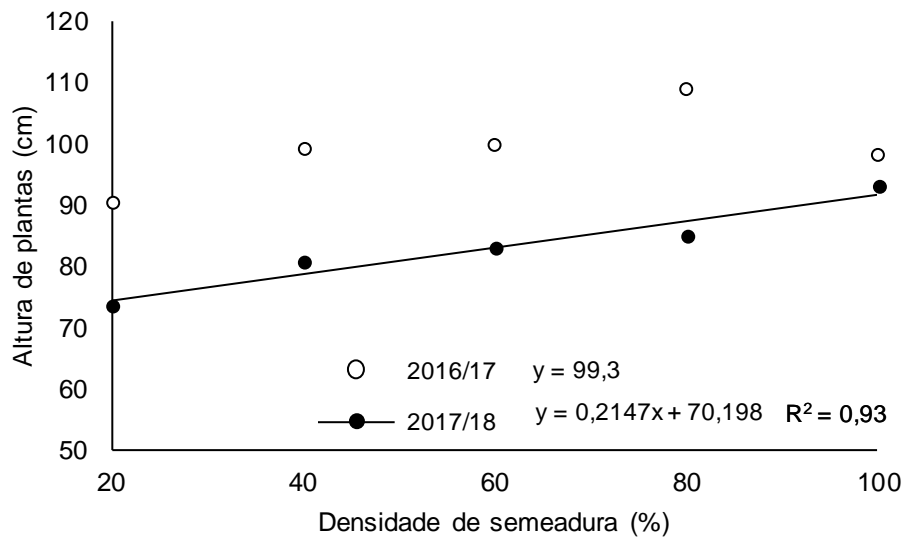
Tabela 3.3 – Características agronômicas da soja influenciadas isoladamente pela cultivar em duas safras agrícolas. Médias de cinco densidades de semeadura. Londrina-PR.

| | BRS 1010 IPRO | NS 5959 IPRO |
|-------------------------------------|---------------|--------------|
| | safra 2016/17 | |
| Altura de plantas (cm) | 110,24a | 88,39b |
| Diâmetro do caule (mm) | 9,64a | 8,06b |
| Massa de mil grãos (g) | 129,85b | 149,21a |
| Grãos oriundos dos ramos (%) | 32,81a | 25,05b |
| Índice de colheita aparente | 0,52b | 0,58a |
| Teor de óleo nos grãos (%) | 22,64a | 22,10b |
| Teor de proteína nos grãos (%) | 34,16b | 36,02a |
| | safra 2017/18 | |
| Altura de plantas (cm) | 90,37a | 75,8b |
| Diâmetro do caule (mm) | 10,03a | 8,44b |
| Número de vagens por m ² | 1604,52a | 1208,82b |
| Massa de mil grãos (g) | 140,14b | 159,58a |
| Índice de colheita aparente | 0,56b | 0,59a |
| Teor de óleo nos grãos (%) | 23,61a | 23,07b |
| Teor de proteína nos grãos (%) | 32,75b | 35,35a |

Médias seguidas de letras diferentes, diferem estatisticamente entre si pelo teste F a 5% de significância.

A densidade de semeadura influenciou a altura de plantas somente na segunda safra (Tabela 3.2). Houve redução linear da altura de plantas conforme se reduziu a densidade de semeadura para ambas as cultivares (Figura 3.2). Muitas pesquisas relataram a influência da densidade de plantas sobre a altura de plantas, sendo que, de maneira geral, a redução da densidade resulta em plantas mais baixas (KOMORI et al., 2004; WERNER et al., 2016). Entretanto, em muitos casos não ocorre alteração desta característica em função da densidade, pois nestas condições o ambiente permite que todas as densidades testadas tenham crescimento em estatura semelhante (FERREIRA et al., 2018; MOREIRA et al., 2015; ZUFFO et al., 2018), o que pode estar relacionado com o intervalo de densidades testadas.

Figura 3.2 – Altura de plantas de soja em duas safras agrícolas influenciadas pela redução da densidade de semeadura em relação à recomendada pelo obtentor. Cultivares BRS 1010 IPRO e NS 5959 IPRO. Londrina-PR.

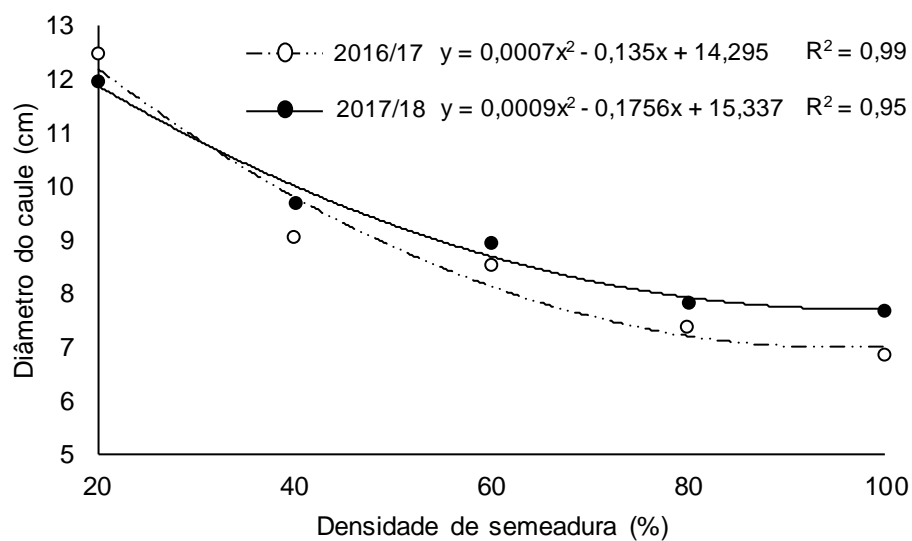


Com relação ao diâmetro do caule houve efeito isolado da cultivar e da densidade de semeadura, porém sem interação entre os fatores. Nas duas safras, na média de todas as densidades, a BRS 1010 IPRO teve diâmetro do caule superior à NS 5959 IPRO, demonstrando diferenças no porte e arquitetura das cultivares (Tabela 3.3). A redução da densidade de semeadura proporcionou incremento do diâmetro do caule nas duas safras, com ajuste quadrático da regressão (Figura 3.3). De acordo com Gundel et al. (2014) as plantas desenvolveram evolutivamente mecanismos complexos para adquirir informações relativas à competição por recursos, o que as permite ajustar seu fenótipo em função de sinais que indicam a presença de plantas vizinhas, garantindo a sua competitividade principalmente pela radiação solar. Essas informações são processadas por diferentes fotorreceptores como os fitocromos, criptocromos e fototropinas, que são sensíveis a comprimentos de onda específicos do espectro da luz solar (WIT et al., 2016).

Diante desses sinais impostos pela competição entre plantas vizinhas, que é maior em lavouras com maiores densidades de plantas, o fenótipo apresenta maior altura, como uma estratégia para interceptação de luz em maior

quantidade e qualidade, o que também resulta em menor diâmetro do caule (PROCÓPIO et al., 2014) e que pode aumentar a propensão ao acamamento.

Figura 3.3 – Diâmetro do caule de plantas de soja em duas safras agrícolas influenciadas pela redução da densidade de semeadura em relação à recomendada pelo obtentor. Médias de duas cultivares (BRS 1010 IPRO e NS 5959 IPRO). Londrina-PR.

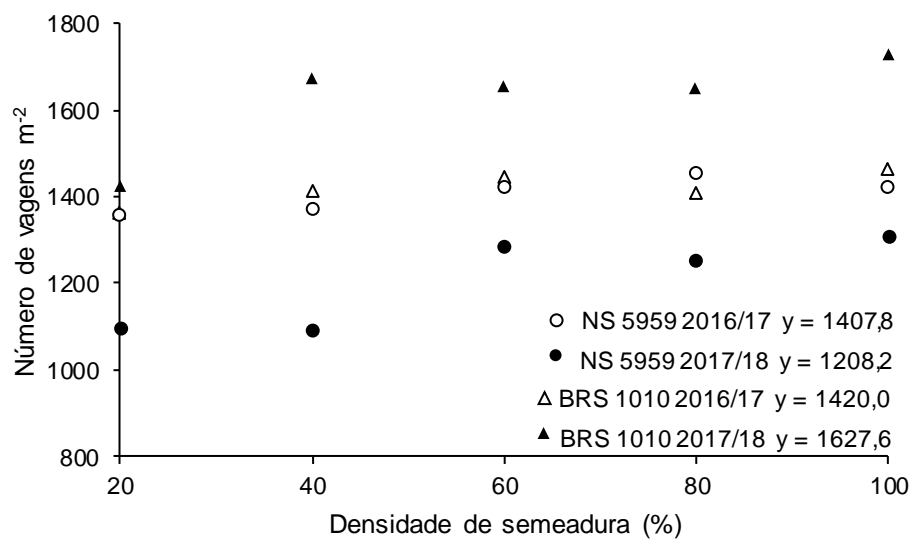


O número de vagens m^{-2} foi diferente entre as cultivares somente na segunda safra (Tabela 3.2). A cultivar BRS 1010 IPRO, apresentou aproximadamente 30% a mais de vagens m^{-2} que a NS 5959 IPRO, na média de todas as densidades. Em contrapartida, esta característica não sofreu alterações significativas em resposta à densidade de semeadura em nenhuma das safras (Tabela 3.2). Esperava-se que nas densidades de 20 e 40% a plasticidade fenotípica da soja não fosse capaz de compensar o menor número de plantas pela maior produção de vagens por planta, resultando em diferenças estatisticamente significativas para esta característica, o que não ocorreu.

De acordo com Robinson et al. (2009) o componente de rendimento mais afetado pelo arranjo de plantas em soja é o número de vagens por planta. Isto porque, ocorre grande variação neste componente, em função, sobretudo, da ramificação que é maior em condições de menor competição intraespecífica (COX; CHERNEY, 2011). Portanto, no presente estudo, o maior número de vagens por planta

nas densidades reduzidas, foi capaz de compensar o menor número de indivíduos por área resultando em semelhante número de vagens por m^2 (Figura 3.4).

Figura 3.4 – Número de vagens de soja m^{-2} em duas safras agrícolas influenciadas pela redução da densidade de semeadura em relação à recomendada pelo obtentor. Londrina-PR. Diferenças estatísticas não significativas.

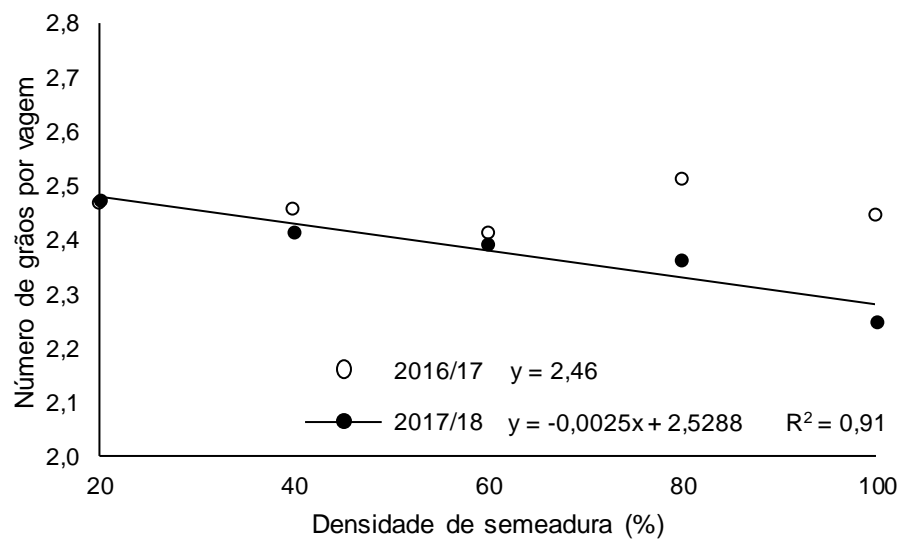


Por sua vez, o número de grãos por vagem, não foi influenciado por nenhum dos fatores experimentais na primeira safra, mas sofreu influência da densidade de semeadura na segunda safra (Tabela 3.2). Esta característica é fortemente modulada pelo genótipo e pouco influenciada pelo ambiente, entretanto a redução drástica de densidade proporcionada pelo presente experimento foi capaz de elevar o número de grãos por vagem com ajuste linear da equação na segunda safra (Figura 3.5). Além disso, outras pesquisas também relataram aumento linear nesta variável em resposta à redução da densidade de semeadura (FERREIRA et al., 2016; RAMBO et al., 2004).

Portanto, pode-se constatar que um dos mecanismos de compensação da soja, que conferem a plasticidade fenotípica, é o aumento do número de grãos por vagem, quando a cultura é cultivada em menores densidades. Porém, no presente estudo, este efeito foi verificado somente em uma das safras, e mesmo

assim, o incremento foi estimado em apenas 0,25 grãos por vagem, na menor densidade, o que indica que este não é o principal componente de rendimento responsável pelo efeito compensatório.

Figura 3.5 – Número de grãos por vagem de soja em duas safras agrícolas influenciadas pela redução da densidade de semeadura em relação à recomendada pelo obtentor. Médias de duas cultivares (BRS 1010 IPRO e NS 5959 IPRO). Londrina-PR.



A massa de mil grãos é um componente de rendimento importante quando se avalia mudanças no arranjo espacial das plantas na lavoura, inclusive a densidade de semeadura (FERREIRA et al., 2018). Em ambas as cultivares houve efeito isolado tanto da cultivar quanto da densidade de semeadura, sem ocorrência de interação (Tabela 3.2). Constatou-se maior massa de mil grãos da cultivar NS 5959 IPRO do que da BRS 1010 IPRO na duas safras (Tabela 3.3). Esses resultados confirmam que esta característica possui um limite máximo determinado pelo genótipo, mas ao mesmo tempo é altamente influenciada pelo ambiente de produção, conforme discutido por Mauad et al. (2010).

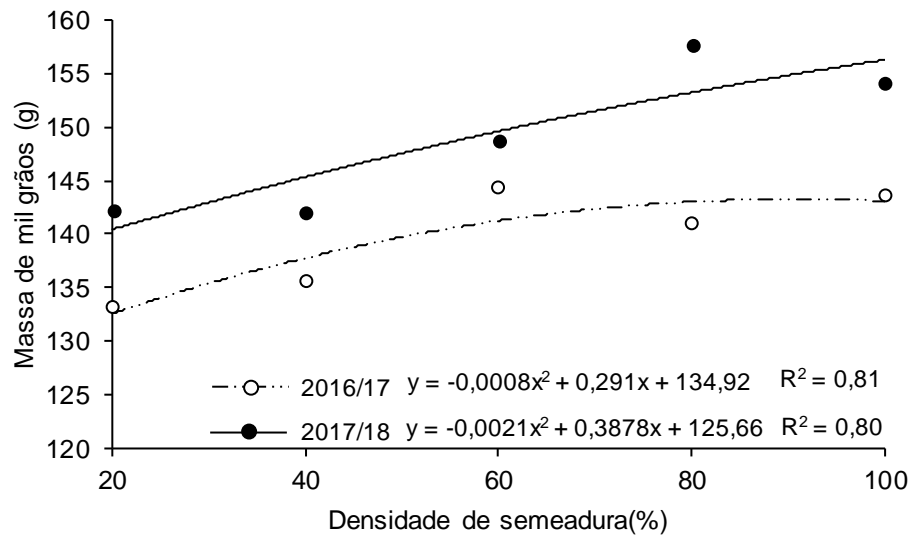
Com relação à redução da densidade de semeadura, a massa de mil grãos sofreu redução com ajuste polinomial de segundo grau, em ambas as safras (Figura 3.6). A equação demonstra que a taxa de decréscimo da massa de mil grãos

é maior quando se aproxima da densidade de 20%, sobretudo na primeira safra. Teoricamente, se espera que a menor competição intraespecífica ocorrida em densidades reduzidas, resulte em maior massa de mil grãos, no entanto o presente estudo confirma que o cultivo de soja em densidades muito baixas faz com que os grãos produzidos sejam menores e de menor massa, conforme relatado por pesquisas recentes (FERREIRA et al., 2017; WERNER et al., 2017).

Considerando que o período no qual a soja tem maior demanda por recursos do ambiente – luz, água e nutrientes – é durante o desenvolvimento e enchimento dos grãos (NAKAGAWA et al., 2018; OLIVEIRA JUNIOR et al., 2016; TRIPATHI et al., 2015), é provável que a menor interceptação da radiação solar (WERNER et al., 2018) e menor exploração do solo pelas raízes (BALBINOT JUNIOR et al., 2018) em baixas densidades, tenham resultado em baixo aproveitamento desses recursos justamente neste período, o que prejudicou o enchimento dos grãos. Esta informação é bastante relevante, e demonstra que embora a soja expresse modificações morfológicas capazes de manter o número de vagens por área em drásticas reduções de densidades (Figura 3.4 e Figura 3.5), isto resulta em menor massa de grãos.

É importante salientar, que este resultado se deve às reduções na densidade serem muito drásticas, pois pesquisas que avaliaram modificações mais sutis na densidade de plantas não obtiveram influência sobre esta característica (COX; CHERNEY, 2010; FERREIRA et al. 2018).

Figura 3.6 – Massa de mil grãos de soja em duas safras agrícolas influenciadas pela redução da densidade de semeadura em relação à recomendada pelo obtentor. Médias de duas cultivares (BRS 1010 IPRO e NS 5959 IPRO). Londrina-PR.



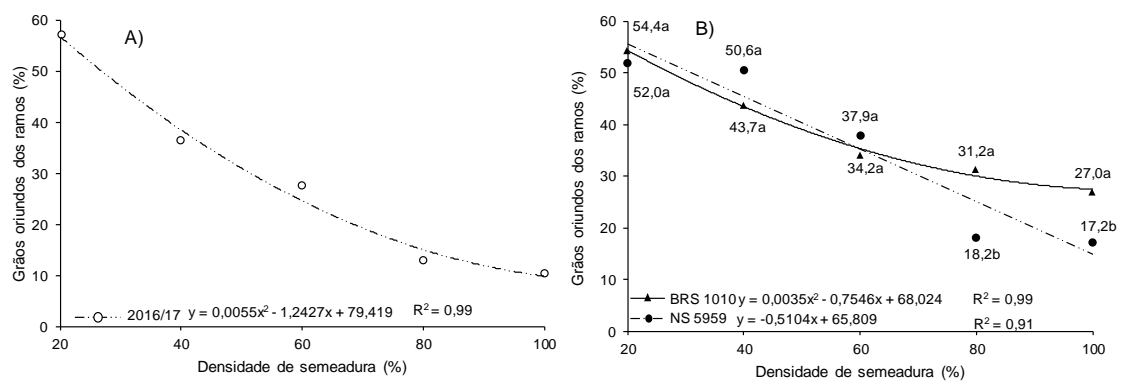
Alguns estudos avaliaram o número de ramos por planta em resposta a modificações na densidade de plantas, e não constataram diferenças significativas (BALBINOT JUNIOR et al., 2015; COX; CHERNEY, 2010). Isto se deve ao fato de que, embora exista pouca diferença entre o número de ramos por planta, há uma grande disparidade entre o tamanho dos ramos e a quantidade de grãos produzidos nestes. Assim, no presente estudo verificou-se grande influência da densidade de semeadura sobre a porcentagem de grãos oriundos dos ramos, corroborando os resultados descritos por Ferreira et al. (2018), apresentando interação significativa com as cultivares na segunda safra (Tabela 3.2).

Na primeira safra, houve efeito isolado para as cultivares, confirmando maior habilidade em produzir grãos nos ramos da cultivar BRS 1010 IPRO em relação à NS 5959 IPRO, na média de todas as densidades (Tabela 3.3). Ainda na primeira safra houve aumento da porcentagem da produção de grãos oriunda dos ramos, com ajuste polinomial de segundo grau, conforme se reduziu a densidade de semeadura (Figura 3.7).

Na segunda safra, o desdobramento da interação, demonstra que a cultivar BRS 1010 IPRO apresentou maior percentual de produção oriunda dos ramos em relação à 5959 IPRO, somente nas densidades de 100% e 80% (Figura 3.7). Além

disso, houve acréscimo linear para NS 5959 IPRO e polinomial de segundo grau para a BRS 1010, em resposta à redução da densidade de semeadura. Esses resultados demonstram, que embora a NS 5959 IPRO geralmente tenha produção mais concentrada na haste principal nas faixas de densidade recomendadas, quando submetida a densidades reduzidas, apresenta elevado potencial de ramificação e de produzir grãos nos ramos.

Figura 3.7 – Grãos de soja oriundos dos ramos influenciados isoladamente pela redução da densidade de semeadura em relação à recomendada pelo obtentor na safra 2016/17 (A) e pela interação entre cultivar e redução da densidade de semeadura na safra 2017/18 (B). Londrina-PR.



O índice de colheita aparente não sofreu influência da densidade de semeadura em nenhuma das safras (Tabela 3.2), e foi afetado isoladamente pela cultivar somente na safra 1. Nesta condição constatou-se superperiodicidade da NS 5959 IPRO para esta característica na média de todas as densidades. Diferentemente da presente pesquisa, Balbinot Junior et al. (2015b) constataram aumento do índice de colheita conforme se reduziu a densidade de duas cultivares de crescimento indeterminado variando de 440 a 135 mil plantas ha^{-1} . De acordo com estes autores, isto ocorreu porque em maiores densidades há alta alocação de fotoassimilados na formação das hastes, a fim de aumentar altura das plantas para interceptação de luz, recurso mais disputado pelas plantas de soja sob elevada competição.

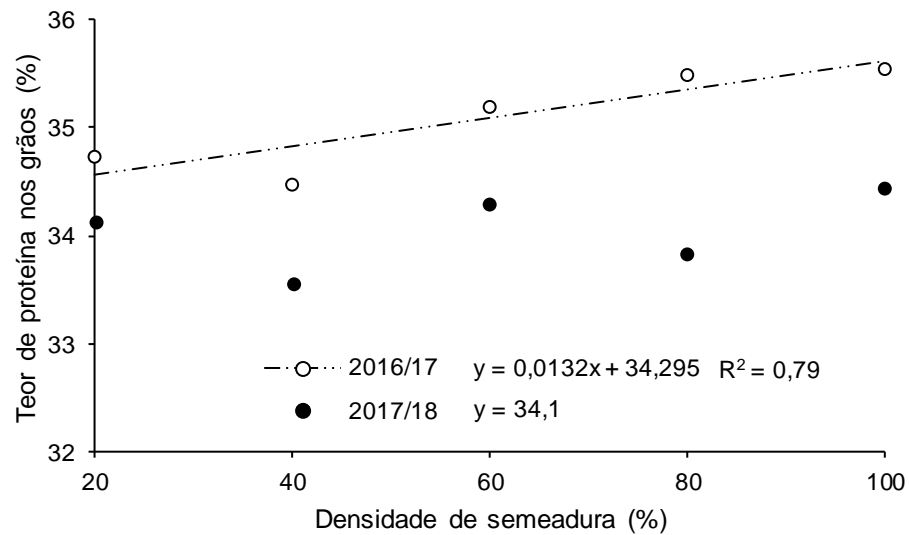
A respeito do teor de óleo nos grãos, houve diferença estatística significativa somente para o fator cultivar em ambas as safras (Tabela 3.2), com superioridade de aproximadamente 0,5% da BRS 1010 IPRO em relação à NS 5959

I PRO (Tabela 3.3). Bellaloui et al. (2014, 2015) constataram acréscimo do teor de óleo nos grãos em resposta à redução da densidade, porém outras pesquisas demonstraram que o teor de proteína é mais afetado por modificações no arranjo de plantas (espaçamento e densidade) do que o teor de óleo (WERNER et al., 2017).

O teor de proteína nos grãos foi estatisticamente maior na NS 5959 I PRO em relação à BRS 1010 I PRO em ambas as safras (Tabelas 3.2 e 3.3). A redução da densidade de semeadura proporcionou diminuição linear do teor de proteína na primeira safra (Tabela 3.2), porém sem influência na segunda. Umburanas et al. (2018) também constataram redução do teor de proteína nos grãos, da ordem de 1,5%, ao reduzir a densidade de 450 para 150 mil plantas ha⁻¹, assim como Bellaloui et al. (2014) que verificaram redução do teor de proteína ao se reduzir a densidade de 520 para 250 mil sementes viáveis ha⁻¹. Em contrapartida em algumas situações não foi constatado influência da densidade de plantas sobre esta característica (WERNER et al., 2017), o que pode estar relacionada a variações de genótipo e ambiente de cultivo.

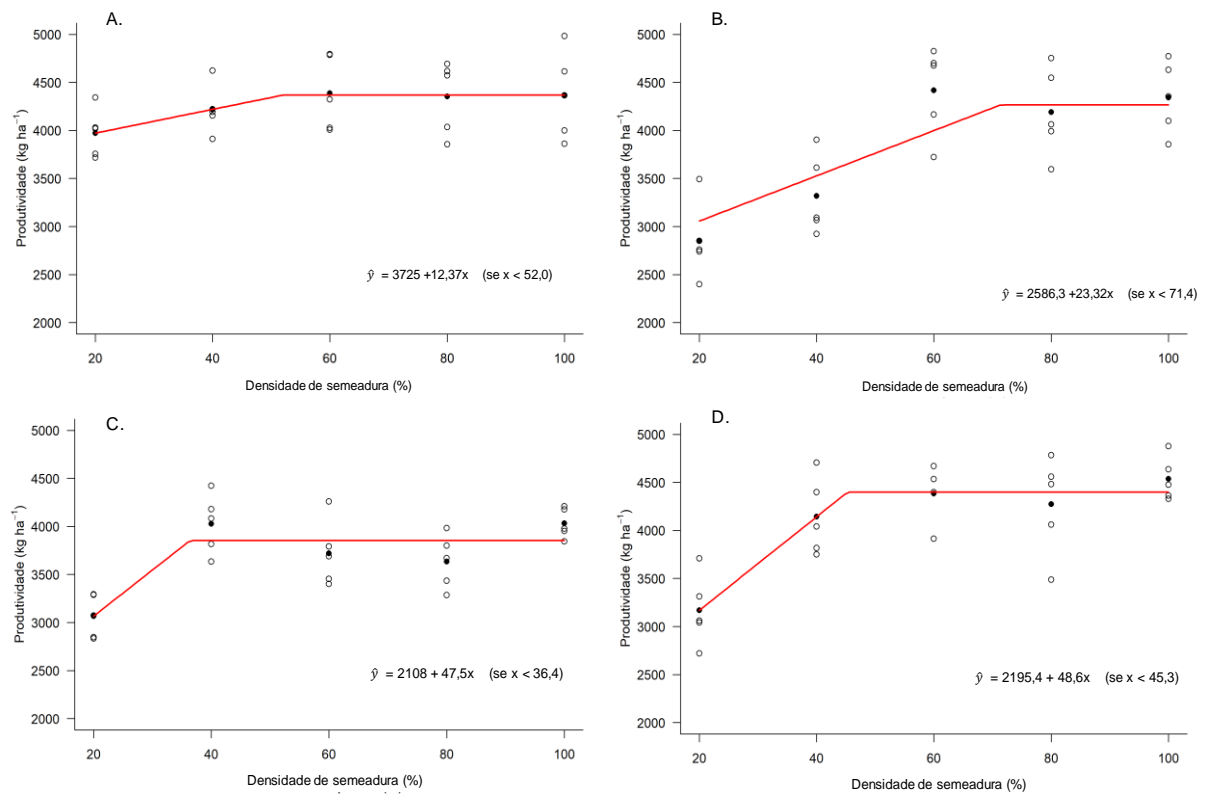
Os teores de óleo e proteína nos grãos são fortemente definidos pela genética e sofrem pouca influência do ambiente, por isso muitas vezes a variação em função do manejo cultural é inexistente ou tão baixa a ponto de não ser estatisticamente significativa (BALBINOT JUNIOR et al., 2015b). Entretanto é importante considerar que mesmo mantendo a produtividade de grãos, uma eventual redução no teor de proteína na soja cultivada sob baixas densidades pode ser desfavorável, tendo em vista que a proteína é o principal produto a ser extraído dos grãos de soja.

Figura 3.8 – Teor de proteína nos grãos de soja em duas safras agrícolas influenciadas pela redução da densidade de semeadura em relação à recomendada pelo obtentor. Médias de duas cultivares (BRS 1010 IPRO e NS 5959 IPRO). Londrina-PR.



Para a produtividade de grãos, houve efeito de ambos os fatores experimentais nas duas safras avaliadas. Para a cultivar NS 5959 IPRO, a densidade mínima ótima, foi de 52% (Figura 3.9A) e 71% (Figura 3.9B) em relação ao recomendado para esta cultivar nas safras 2016/17 e 2017/18, respectivamente.

Figura 3.9 – Produtividade de grãos de soja em resposta à redução da densidade de semeadura em relação à recomendada pelo obtentor. Cultivares NS 5959 IPRO na primeira (A) e segunda safra (B), e BRS 1010 IPRO na primeira (C) e segunda safra (D). Londrina-PR, safras 2016/17 e 2017/18.



Considerando a densidade de plantas obtida com 100% da densidade de semeadura indicada, 373 e 302 mil plantas ha⁻¹ nas safras 2016/17 e 2017/18, respectivamente (Tabela 3.1), é possível estimar a densidade de plantas mínima ótima para a cultivar NS 5959 IPRO. Nesse caso, foi de 194 e 215 mil plantas ha⁻¹ na safra 2016/17 e 2017/18. A necessidade de maior quantidade de plantas para chegar no platô de produtividade na segunda safra possivelmente esteja relacionada à semeadura realizada mais precocemente – 06/10 na segunda safra ante 28/10 na primeira. Com isso, as plantas foram submetidas a menores temperaturas (Figura 3.1) e radiação solar na fase vegetativa, limitando o crescimento e, conseqüentemente, a plasticidade fenotípica.

Essa diferença entre a densidade mínima ótima da primeira e da segunda safra, para esta cultivar, também pode ter sido potencializada pela menor emergência das plantas na segunda safra, conforme discutido anteriormente (Tabela 3.1). Portanto, pode-se afirmar que para condições menos favoráveis à germinação e estabelecimento do estante é importante ter cautela ao se reduzir a densidade de sementeira, conforme sugerido por Board et al. (2013).

Para a cultivar BRS 1010 IPRO a densidade de sementeira mínima ótima foi de 36% para a primeira safra (Figura 3.9C) e 45% (Figura 3.9D) na segunda safra em relação ao recomendado pelo obtentor. Considerando a densidade de plantas obtida com 100% da densidade de sementeira indicada, 275 e 267 mil plantas ha^{-1} nas safras 2016/17 e 2017/18, respectivamente (Tabela 3.1), é possível estimar a densidade de plantas mínima ótima para a cultivar BRS 1010 IPRO. Nesse caso, foi de 100 e 121 mil plantas ha^{-1} nas safras 2016/17 e 2017/18. Ou seja, a densidade de plantas para atingir o platô de produtividade é muito menor na cultivar BRS 1010 IPRO do que na NS 5959 IPRO – 48 e 31% a menos nas safras 2016/17 e 2017/18, respectivamente. Esse resultado comprova de forma consistente que a cultivar NS 5959 IPRO possui menor plasticidade fenotípica em relação à BRS 1010 IPRO. Nesse contexto, a indicação da densidade mínima ótima deve considerar, além das particularidades de ambiente, as características morfofisiológicas das cultivares.

Muito se questiona sobre a capacidade das cultivares modernas, com tipo de crescimento indeterminado e arquitetura compacta, em ramificar e produzir bem em baixas densidades de plantas (PROCÓPIO et al., 2013), entretanto os resultados aqui apresentados demonstram que ambas as cultivares apresentaram alta ramificação, com elevada produção nos ramos o que conferiu alta plasticidade fenotípica e permitiu a obtenção de produtividades de grãos estatisticamente iguais mesmo com densidades muito abaixo das recomendadas pelos obtentores.

Adicionalmente, nota-se que embora a NS 5959 IPRO tenha apresentado boa participação dos ramos na produção de grãos, a densidade de sementeira mínima ótima foi maior do que para a BRS 1010 IPRO, em ambas as safras o que confirma que cultivares com arquitetura mais compacta possuem menor aptidão para cultivo em densidades reduzidas (BOARD; KAHN; 2013; RIGSBY; BOARD, 2003). Também é importante ressaltar que todas as densidades mínimas ótimas estiveram abaixo da faixa recomendada pelos obtentores, o que sugere que

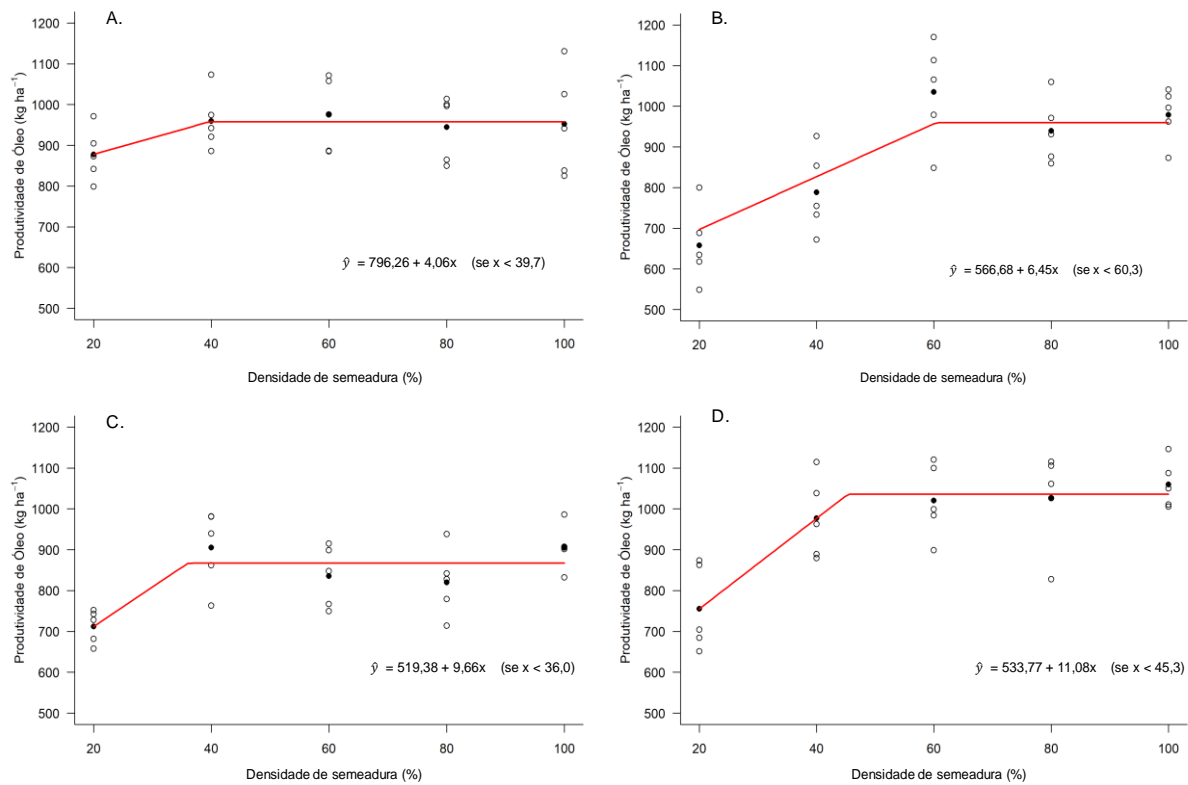
existe margem para redução da densidade com redução no custo de produção, sem impacto sobre a produtividade, principalmente para a cultivar BRS 1010 IPRO e em lavouras de alta tecnologia, com boas condições edafoclimáticas.

Corassa et al. (2018) estudando a redução da densidade em diferentes localidades no Sul do Brasil, também constataram que é possível reduzir a densidade sem prejuízo na produtividade de grãos, principalmente em ambientes de alto potencial produtivo. Os autores concluíram que é possível reduzir em até 18% a densidade de semeadura em ambientes de alto potencial, em relação a ambientes de baixo potencial. Isto porque, a escassez de recursos ambientais pode limitar o crescimento da soja e diminuir a capacidade da planta compensar o menor número de indivíduos pela maior produção por planta (BOARD, 2000). Nesse sentido, em áreas com deficiente correção da fertilidade do solo, muito comum em lavouras de primeiro ano, há necessidade de utilizar maiores quantidades de sementes, a fim de garantir formação de dossel compatível à obtenção de produtividades economicamente viáveis.

Por sua vez, a produtividade de óleo também apresentou efeito de ambos os fatores experimentais nas duas safras (Tabela 3.2). O objetivo de se avaliar a produtividade de óleo e proteína, é verificar se a densidade mínima ótima para estes compostos é a mesma da densidade mínima ótima para a produtividade de grãos, haja visto que a soja é cultivada para diversos usos, tanto alimentação humana e animal, quanto na indústria, em função da sua composição rica nestes compostos.

A densidade mínima ótima para produtividade de óleo foi aproximadamente 10% menor do que para produtividade de grãos na cultivar NS 5959 IPRO em ambas as safras (Figuras 3.10A e 3.10B). Portanto, pode-se afirmar que, mesmo não tendo sido constatada diferença significativa para os teores de óleo, houve aumento da concentração deste composto nos grãos conforme se reduziu a densidade, assim como observado por Bellaloui et al. (2014, 2015), o que resultou na diminuição densidade ótima para produção de óleo desta cultivar. Em contrapartida, para a BRS 1010 IPRO, a densidade mínima ótima para produtividade de óleo, foi praticamente a mesma da produtividade de grãos nas duas safras (Figuras 3.10 C e 3.10D), confirmando não haver diferenças nos teores de óleo nos grãos desta cultivar.

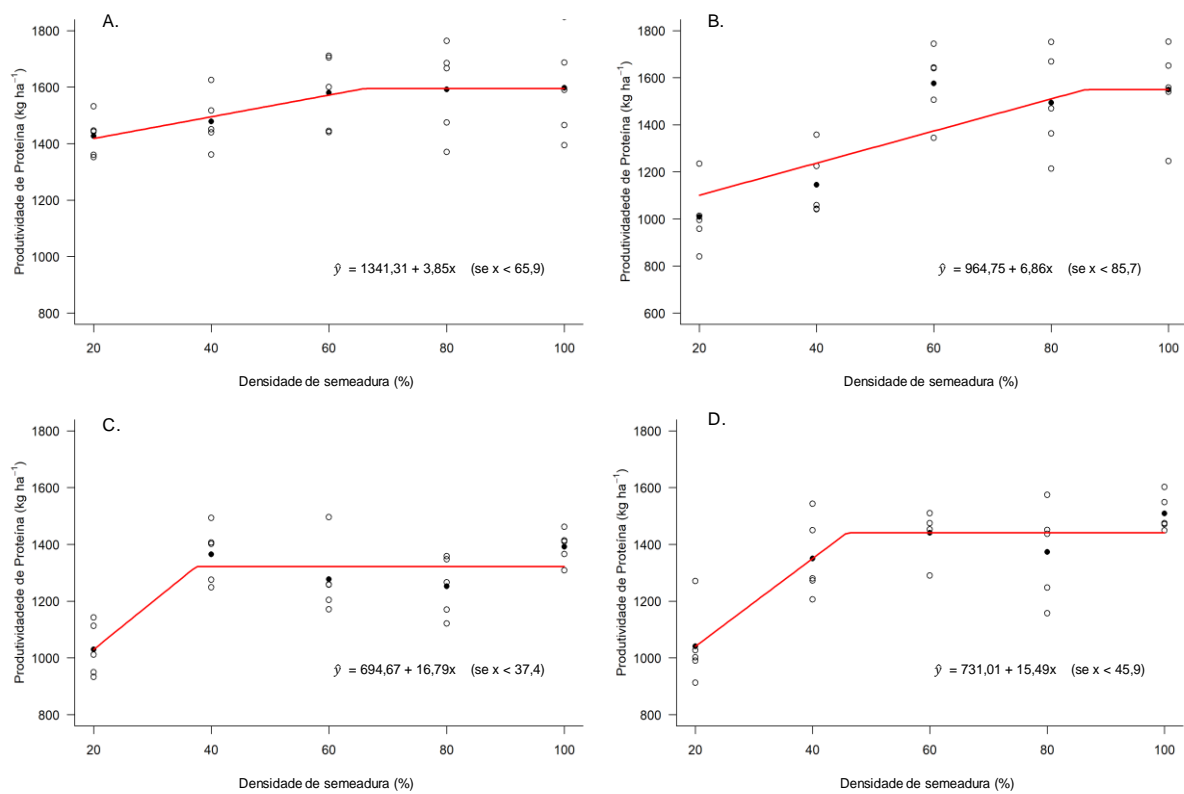
Figura 3.10 – Produtividade de óleo de soja em resposta à redução da densidade de semeadura em relação à recomendada pelo obtentor. Cultivares NS 5959 IPRO na primeira (A) e segunda safra (B), e BRS 1010 IPRO na primeira (C) e segunda safra (D). Londrina-PR, safras 2016/17 e 2017/18.



A produtividade de proteína também foi influenciada por ambos fatores experimentais nas duas safras avaliadas (Tabela 2). A cultivar NS 5959 IPRO apresentou densidade mínima ótima aproximadamente 15% maior para produtividade de proteína do que para produtividade de grãos. Isto ocorreu em função dos menores teores de proteínas nos grãos em resposta à redução da densidade (Figura 3.8), e com isso houve acréscimo na densidade mínima ótima para produção deste composto (Figuras 3.11A e 3.11B). Do ponto de vista prático, este resultado sugere que o cultivo de soja em densidades reduzidas (próximo à densidade mínima ótima), mesmo que não resulte em redução de produtividade, conforme sugerido por Thompson et al. (2015), pode levar a menor produtividade de proteína, o que não afetaria diretamente o produtor rural, mas certamente reduziria o rendimento industrial da soja durante seu processamento.

Entretanto, para a BRS 1010 IPRO, a densidade mínima ótima foi muito semelhante tanto para produtividade de proteína quanto para produtividade de grãos em ambas as safras, o que demonstra que, assim como os teores de óleo, os teores de proteína desta cultivar foram pouco influenciados pela densidade (Figuras 3.11C e 3.11D).

Figura 3.11 – Produtividade de proteína de soja em resposta à redução da densidade de semeadura em relação à recomendada pelo obtentor). Cultivares NS 5959 IPRO na primeira (A) e segunda safra (B), e BRS 1010 IPRO na primeira (C) e segunda safra (D). Londrina-PR, safras 2016/17 e 2017/18.



Os resultados obtidos demonstram que o maior número de vagens por planta, que proporciona o efeito compensatório da soja em resposta à redução da densidade, está diretamente relacionado com o aumento da produção de grãos nos ramos (BOARD et al., 2013) e em menor grau com o aumento do número de grãos por vagem. Esta plasticidade leva a semelhante número de vagens por unidade de

área, proporcionando alta capacidade desta espécie em obter produtividades semelhantes mesmo em ampla variação da densidade de semeadura (THOMPSON et al., 2015).

Entretanto, densidades muito reduzidas, levam a um baixo aproveitamento dos recursos do ambiente, principalmente menor interceptação da radiação solar (WERNER et al., 2018), o que resultou em grãos de menor massa e levou a reduções na produtividade para densidades abaixo da mínima ótima. Desta maneira, o cultivo em densidades mínimas ótimas, pode elevar a rentabilidade da cultura, pois reduz o custo de produção sem alterar a produtividade (GASPAR et al., 2017).

Porém, mais investigações se fazem necessárias com relação as alterações provocadas pela densidade sobre os teores de óleo e proteína nos grãos, tendo em vista que o cultivo da soja sob densidades mínimas ótimas do ponto de vista da produtividade de grãos pode levar à uma menor produtividade de proteína.

No entanto, os resultados obtidos indicam o grande potencial em reduzir o custo com sementes, sem alterar a produtividade, gerando aumento de rentabilidade, sobretudo em cultivares com grande plasticidade fenotípica, como a BRS 1010 IPRO. Para essa cultivar, a economia com sementes pode ser de, no mínimo 40%, cerca de 19,0 kg ha⁻¹, considerando a massa de mil sementes em 150 g. Essa economia representa algo em torno de R\$ 150,00 ha⁻¹ (IMEA, 2019). Já, para a cultivar NS 5959, essa possibilidade de redução nos custos é cerca de metade do valor. Assim, esses resultados vão ao encontro de soluções para aumentar a rentabilidade da cultura da soja.

3.4 CONCLUSÕES

O número de vagens por m² e o número de grãos por vagem foram os componentes responsáveis pelo efeito compensatório da soja em resposta a redução da densidade.

A massa de mil grãos é o principal componente do rendimento responsável pela redução da produtividade de grãos abaixo da densidade mínima ótima.

As duas cultivares demonstraram elevada produção de grãos nos ramos em resposta à redução da densidade de semeadura, o que confere a sua plasticidade fenotípica.

As cultivares alcançaram densidade de semeadura mínima ótima abaixo da faixa recomendada pelo obtentor. A BRS 1010 IPRO tem maior potencial para redução da densidade de semeadura do que a NS 5959 IPRO.

Para a cultivar NS 5959 IPRO a densidade mínima ótima para a produtividade de grãos foi maior do que para a produtividade de óleo, e menor do que para a produtividade de proteína.

3.5 REFERÊNCIAS

- BALBINOT JUNIOR, A. A.; PROCÓPIO, S. O.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C. **Densidade de plantas na cultura da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2015b. 36 p. (Documentos / Embrapa Soja, n. 364).
- BARBIN, D. **Planejamento e análise estatística de experimentos agrônômicos**. Londrina: Mecenaz, 2013. 214 p.
- BELLALOUI, N.; BRUNS, A. H.; ABBAS, H. K.; MENGISTU, A.; FISHER, D. K.; REDDY, K. N. Agricultural practices altered soybean seed protein, oil, fatty acids, sugars, and mineral in the midsouth USA. **Frontiers in Plant Science**, v.6, n.31, 2015.
- BELLALOUI, N.; MENGISTU, A.; WALKER, E. R.; YOUNG, L. Soybean seed composition as affected by seeding rate and row spacing. **Crop Science**, v. 54, n.4, p.1782-1795, 2014.
- BOARD J.; KAHLON, C.; HARRELL, D.; UDEIGWE, T.; STAPP, J.; TALBOT, T. **Can soybean seeding rates be reduced without affecting yields in Louisiana?** Baton Rouge: LSUAgCenter, 2013. 19 p. (Research Bulletin, 892)
- BOARD, J. Light interception efficiency and light quality affect yield compensation of soybean at low plant populations. **Crop Science**, v. 40, n.5, p.1285-1294, 2000.
- BOARD, J.E.; KAHLON, C.S. Morphological responses to low plant population differ between soybean genotypes. **Crop Science**, v.53, n.3, p.1109-1119, 2013.
- CARPENTER, A. C.; BOARD, J. E. Branch yield components controlling soybean yield stability across plant populations. **Crop Science**, v.37, n.3, p.885-891, 1996.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos. Safra 2018/2019. Sétimo levantamento**. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/gaos/boletim-da-safra-de-graos>>. Acesso em: 25/04/2019.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Compêndio de estudos Conab: Evolução dos custos de produção de soja no Brasil**. Brasília: Conab, 2016. 22 p.
- CORASSA, G.M.; AMADO, T.J.C.; STRIEDER, M.L.; SCHWALBERT, R.; PIRES, J.L.F.; CARTER, P.R.; CIAMPITTI, I.A. Optimum soybean seeding rates by yield environment in Southern Brazil. **Agronomy Journal**, v.110, n.6, p.1-9, 2018.
- DE BRUIN, J.L.; PEDERSEN, P. Effect of row spacing and seeding rate on soybean yield. **Agronomy Journal**, v.100, n.3, p.704-10, 2008.
- FERREIRA, A. S.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; WERNER, F.; ZUCARELI, C. Plant spatial arrangement affects grain production from branches and stem of soybean cultivars. **Bragantia**, v.77, n. 4, 2018.

FERREIRA, A. S.; ZUCARELI, C.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; WERNER, F.; COELHO, A. E. Size, physiological quality and green seed occurrence influenced by seeding rate in soybeans. **Semina Ciências Agrárias**, v.38, n.2, p. 595-606, 2017.

GASPAR, A. P.; MUELLER, D. S.; WISE, K. A.; CHILVERS, M. I.; TENUTA, A. U.; CONLEY, S. P. Response of broad-spectrum and target specific seed treatments and seeding rate on soybean seed yield, profitability and economic risk. **Crop Science**, v.57, n.4, p.1-12, 2017.

GUNDEL, P. E.; PIERIK, R.; MOMMER, L.; BALLARÉ, C. L. Competing neighbors: Light perception and root function. **Oecologia**, v.176, n.1, p.1-10, 2014.

HAY, R.K.M. Harvest index: a review of its use in plant breeding and crop physiology. **Annals of Applied Biology**, v.126, p.197-216, 1995.

HIRAKURI, M.H.; CONTE, O.; BALBINOT JUNIOR, A.A. **Análise econômica de diferentes arranjos espaciais de plantas de soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2017. 8p.

HOLTZ, Vandoir; COUTO, Rodney Ferreira; OLIVEIRA, Danilo Gomes de and REIS, Elton Fialho dos. Deposição de calda de pulverização e produtividade da soja cultivada em diferentes arranjos espaciais. **Ciencia Rural**, v.44, n.8, pp.1371-1376, 2014.

INSTITUTO MATO-GROSSENSE DE ECONOMIA AGROPECUÁRIA – IMEA. **Custos de produção de soja na safra 2018/19**. Cuiabá: IMEA, 2019. 8 p.
Disponível em:
<<http://www.imea.com.br/upload/publicacoes/arquivos/01032018203308.pdf>>.
Acesso em: 25 abr 2019.

NAKAGAWA, A.C.S.; ITOYAMA, H.; ARIYOSHI, Y.; ARIO, N.; TOMITA, Y.; KONDO, Y.; IWAYA-INOUE, M.; ISHIBASHI, Y. Drought stress during soybean seed filling affects storage compounds through regulation of lipid and protein metabolism. **Acta Physiologiae Plantarum**, v.40, p.111, 2018.

OLIVEIRA JUNIOR, A.; CASTRO, C.; PEREIRA, L. R.; DOMINGOS, C. S. **Estádios fenológicos e marcha de absorção de nutrientes da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2016.

PERECIN, D.; CARGNELUTI FILHO, A. Efeitos por comparações e por experimento em interações de experimentos fatoriais. **Ciência e Agrotecnologia**, v.32, p.67-72, 2008.

PROCÓPIO, S.O.; BALBINOT JUNIOR, A.A.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J.C.; PANISON, F. Plantio cruzado na cultura da soja utilizando uma cultivar de hábito de crescimento indeterminado. **Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v.56, n.4, p.319-325, 2013.

ROBINSON, A.P.; CONLEY, S.P.; VOLENEC, J.J.; SANTINI, J.B. Analysis of high yielding, early-planted soybean in Indiana. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 1, p. 131-139, 2009.

SANTOS, H.G. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5 ed. Brasília: EMBRAPA, 2018. 353 p.

SIBALDELLI, R.; FARIAS, J. R. B. **Boletim agrometeorológico da Embrapa Soja, Londrina, PR – 2016**. Londrina: Embrapa Soja, 2017. 30 p.

SIBALDELLI, R.; FARIAS, J. R. B. **Boletim agrometeorológico da Embrapa Soja, Londrina, PR – 2017**. Londrina: Embrapa Soja, 2018. 29 p.

THOMPSON, N. M.; LARSON, J. A.; LAMBERT, D. M.; ROBERTS, R. K.; MENGISTU, A.; BELLALOU, N.; WALKER, E. R. Mid-south soybean yield and net return as affected by plant population and row spacing. **Agronomy Journal**, v.107, n.3, 979-989, 2015.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology – Laboratory of Climatology, 1955 104p. (Publications in Climatology, vol III, n.1).

TRIPATHY, P.; RABARA, R.C.; SHULAEV, V.; SHEN, Q.J.; RUSHTON, P.J. Understanding water-stress responses in soybean using hydroponics system – a systems biology perspective. **Frontiers in Plant Science**, v.6, p.1145, 2015.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE – USDA. **World agricultural supply and demand estimates report**. 2018. Disponível em: <<http://www.usda.gov/oce/commodity/wasde/latest.pdf>>. Acesso em: 31 jul 2018.

WERNER, F.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; FERREIRA, A. S.; AGUIAR E SILVA, M. A.; MANDARINO, J. M. G.; ZUCARELI, C. Size chlorophyll retention and protein and oil contents of grains from soybean plants in different plant spatial arrangements. **Semina Ciências Agrárias**, v.38, p.85-96, 2017.

WERNER, F.; AGUIAR E SILVA, M. A.; FERREIRA, A. S.; NEUMAIER, N.; BALBINOT JUNIOR, A. A. Dinâmica da cobertura do solo por plantas e NDVI de cultivares de soja em diferentes arranjos espaciais de plantas. **Colloquium Agrariae**, v.14, n.2, p.183-190, 2018.

WIT, M; KEUSKAMP, D. H.; BONGERS, F. J.; MARTINEZ-CERON, C.; FANKHAUSER, C.; PIERIK, R. Integration of phytochrome and cryptochrome signals determines plant growth during competition for light. **Current Biology**, v. 26, n. 24, p. 3320-3326, 2016.

ZUFFO, A. M.; RIBEIRO, A. B. M.; BRUZI, A. T.; ZAMBIAZZI, E. V.; FONSECA, W. L. Correlações e análise de trilha em cultivares de soja cultivadas em diferentes densidades de plantas. **Cultura Agrônômica**, v.27, n.1, p.78-90, 2018.

4.ARTIGO B – POTENCIAL FISIOLÓGICO DE SEMENTES DE SOJA INFLUENCIADA PELA REDUÇÃO DA DENSIDADE DE SEMEADURA E POSIÇÃO DA SEMENTE NA PLANTA

Resumo – A produção de sementes de soja com alto potencial fisiológico depende, das condições ambientais durante o período de formação/maturação das sementes. Assim, alterações na densidade de plantas podem impactar diretamente na produção e na formação das sementes, pois modifica a competição intraespecífica, a eficiência do uso da água e o microclima. A redução da densidade de plantas vem sendo estudada no Brasil e no exterior em busca de explorar a alta plasticidade fenotípica da soja aliando altos níveis de produtividade e redução no custo com sementes e seu tratamento. O objetivo do trabalho foi investigar se o cultivo de soja em densidades reduzidas, altera o potencial fisiológico das sementes, em diferentes posições da planta, em cultivares com potencial de ramificação discrepante. O delineamento foi inteiramente casualizado, com parcelas subdivididas considerando-se: cinco densidades de semeadura, na parcela e três posições de sementes na planta (inferior, médio e superior), na subparcela. Avaliou-se a germinação, primeira contagem da germinação, comprimento e massa seca de plântulas, condutividade elétrica, envelhecimento acelerado e emergência em areia. Os dados foram submetidos a análise de variância e análise de regressão para o fator quantitativo e comparação de médias para o fator qualitativo. A germinação das sementes das cultivares NS 5959 IPRO e BRS 1010 IPRO é maior em densidades de semeadura variando entre 40 e 80% do recomendado pelos obtentores. A redução da densidade de semeadura, para apenas 20% do recomendado, resulta em menor vigor de sementes. A redução da densidade de semeadura para valores até 40% da densidade não provoca impactos significativos sobre o potencial fisiológico das sementes. O potencial fisiológico das sementes é crescente conforme se avança do estrato inferior para o superior da planta.

Palavras-chave: *Glycine max* (L. Merrill). Densidade de plantas mínima ótima. Vigor de sementes. Densidade de plantas. População de plantas.

PHYSIOLOGICAL POTENTIAL OF SOYBEAN SEEDS INFLUENCED BY LOWERING SEEDING RATE AND THE POSITION OF SEEDS ON THE PLANT

Abstract – The production of soybean seeds with high physiological potential depends on the environmental conditions during the seed formation / maturation period. Thus, changes in plant density may directly impact on seed production and seed formation, as it modifies intraspecific competition, water use efficiency and microclimate. The reduction of plant density has been studied in Brazil and abroad in order to explore the high phenotypic plasticity of soybean, combining high levels of productivity and reduction in seed cost and its treatment. The objective of this work was to investigate whether soybean cultivation in reduced seeding rates alters the physiological potential of seeds at different plant positions in cultivars with potential for discrepant branching. The design was completely randomized, with subdivided plots considering: five sowing densities, in the plot and three seed positions in the plant (lower, medium and higher), in the subplot. Germination, first count of germination, seedling length and dry mass, electrical conductivity, accelerated aging and sand emergence were evaluated. The data were submitted to analysis of variance and regression analysis for the quantitative factor and comparison of means for the qualitative factor. Seed germination of the cultivars NS 5959 IPRO and BRS 1010 IPRO is higher in sowing densities ranging from 40 to 80% of those recommended by breeders. The reduction of seed density, to only 20% of the recommended one, results in lower seed vigor. Reducing seeding rate to values up to 40% of the recommended by the breeder does not cause significant impacts on the physiological potential of the seeds. The physiological potential of the seeds is increasing as they progress from the lower stratum to the upper stratum of the plant.

Key-words: *Glycine max* (L. Merrill). Minimal optimal seeding rate. Vigor of seeds. Plant density. Plant population.

4.1 INTRODUÇÃO

A obtenção de alta produtividade em lavouras de soja está diretamente relacionada com a qualidade das sementes utilizadas na implantação da lavoura (CANTARELLI et al., 2015; PESKE et al., 2012). O vigor é um dos principais fatores que compõem o potencial fisiológico das sementes, e pode influenciar principalmente a velocidade de emergência das plântulas e o estabelecimento adequado do estande, resultando em plantas com maior acúmulo de biomassa, maior área foliar e conseqüentemente maior produtividade de grãos (SCHEREEN et al., 2010; SCHUCH et al., 2009).

A produção de sementes de soja com alto potencial fisiológico depende, das condições ambientais durante o período de formação/maturação das sementes (PESKE et al., 2012). Assim, uma das técnicas de manejo que pode impactar diretamente na produção e na formação das sementes, é a densidade de plantas, pois modifica a competição intraespecífica (FERREIRA et al., 2016), a eficiência do uso da água e o microclima (sombreamento, temperatura e umidade relativa do ar) (BOARD, 2000; GUNDEL et al., 2014).

A redução da densidade de plantas vem sendo estudada no Brasil (BALBINOT JUNIOR et al., 2018a; FERREIRA, et al., 2018; LUCA et al., 2014) e no exterior (COX et al., 2010; THOMPSON et al., 2015; GASPAR et al., 2017) em busca de explorar a alta plasticidade fenotípica da soja aliando altos níveis de produtividade e redução no custo com sementes e seu tratamento. A plasticidade fenotípica, consiste na capacidade da soja em manter níveis semelhantes de produtividade em ampla faixa de densidades de plantas.

As principais alterações provocadas pelas baixas densidades, que proporcionam a plasticidade fenotípica da soja, são a maior quantidade de vagens na haste principal, e maior capacidade de ramificação que leva a um maior número de nós reprodutivos por planta (BALBINOT JUNIOR et al., 2018b; FERREIRA et al., 2018; MAUAD et al., 2011).

A formação da semente depende do suprimento de fotoassimilados, e isso pode ser influenciado pela quantidade de vagens, bem como pela posição da vagem na planta (PADUA et al., 2010). Portanto, a densidade de plantas, ao alterar a arquitetura e a morfologia, (BALBINOT JUNIOR et al., 2015; GASPAR; CONLEY,

2015;), pode afetar a partição de fotoassimilados, e no caso da produção de semente, estas mudanças podem alterar o tamanho e a qualidade das sementes produzidas (FERREIRA, et al., 2017; WERNER et al., 2017; BARON et al., 2018).

A compreensão sobre o impacto da redução da densidade de plantas sobre o potencial fisiológico das sementes produzidas nas diferentes posições da planta de soja pode determinar a aplicabilidade desta técnica, visando redução de custos e elevação da eficiência da produção de sementes em quantidade e qualidade. Isso é particularmente relevante na multiplicação de sementes básicas e genéticas, em que o melhorista dispõe de baixa quantidade de sementes.

O objetivo do trabalho foi investigar se o cultivo de soja em densidades reduzidas, altera o potencial fisiológico das sementes, em diferentes posições da planta, em cultivares com potencial de ramificação discrepante.

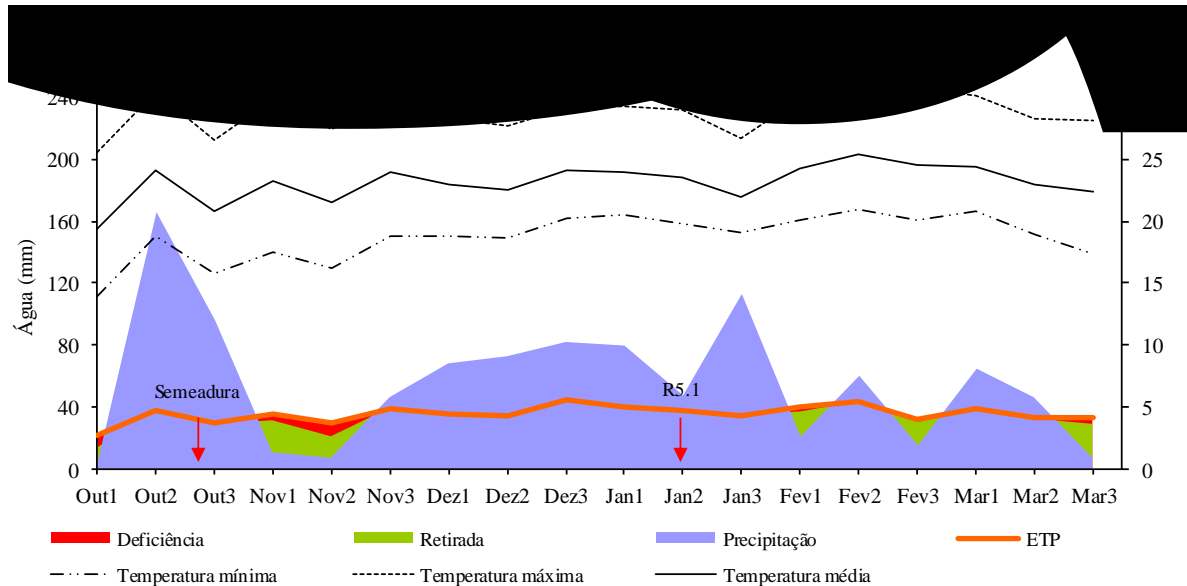
4.2 MATERIAL E MÉTODOS

Foram conduzidos dois experimentos a campo, em Londrina-PR (23° 19' 54" S, 51° 19' 99" O, altitude 620 m), na safra agrícola 2016/17, um com a cultivar BRS 1010 IPRO e outro com a NS 5959 IPRO, que possuem tipo de crescimento indeterminado e potencial de ramificação contrastantes entre si. O clima da região é classificado como subtropical úmido (Cfa) de acordo com a classificação climática de Köppen. O delineamento experimental utilizado foi de blocos casualizados com cinco repetições. Os tratamentos consistiram de cinco densidades de semeadura (100, 80, 60, 40 e 20% da densidade recomendada pelo obtentor de cada cultivar).

O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho distroférico (SANTOS et al., 2018), cultivado em Sistema Plantio Direto por quinze anos. Antes da implantação dos experimentos, o solo apresentava os seguintes atributos na camada de 0 a 0,2 m: 15,3 g dm⁻³ de C orgânico; pH (CaCl₂) 5,9; 20,3 mg dm⁻³ de P (Mehlich-1); 0,56 cmolc dm⁻³ de K trocável; 5,2 cmolc dm⁻³ de Ca trocável; 2,6 cmolc dm⁻³ de Mg trocável; 5,4 mg dm⁻³ de S e 70% de saturação por bases. A granulometria do solo é composta por 710, 82 e 208 g kg⁻¹ de argila, silte e areia, respectivamente.

Os dados de precipitação pluvial e temperatura do ar foram coletados em estação agrometeorológica distante cerca de 500 m da área experimental e estão apresentados na Figura 4.1. Adicionalmente calculou-se o balanço hídrico climatológico sequencial (BHCS), para as duas safras, seguindo a metodologia proposta por Thornthwaithe e Matter (1955) (Figura 4.1).

Figura 4.1 – Balanço hídrico climatológico sequencial e temperaturas mínimas, médias e máximas do ar, por decêndio, durante o período de condução dos experimentos: Outubro de 2016 a Março de 2017. Londrina, PR.



A faixa de densidade de semeadura recomendada para as cultivares BRS 1010 IPRO e NS 5959 IPRO, na região de condução dos experimentos, é de 265 a 310 e 380 a 420 mil plantas ha^{-1} , respectivamente. A cultivar NS 5959 IPRO, possui menor potencial de ramificação e arquitetura foliar mais compacta (folíolos menores e com inclinação mais vertical), e por isso a densidade recomendada para esta cultivar é mais alta do que para BRS 1010 IPRO. Para definição das densidades de semeadura, foi considerado como recomendado o valor máximo dentro da faixa recomendada para cada cultivar. Portanto os tratamentos foram constituídos das seguintes densidades de semeadura: 310, 248, 186, 124 e 62 mil sementes viáveis ha^{-1} , para a cultivar BRS 1010 IPRO e 420, 336, 252, 168 e 84 mil sementes viáveis ha^{-1} para a cultivar NS 5959 IPRO.

A semeadura foi realizada em 28 de outubro de 2016. As parcelas mediram $50 m^2$ (5 m de largura e 10 m de comprimento) com espaçamento entre fileiras de 0,45 m. A adubação de base foi realizada de acordo com o resultado da análise química do solo e as recomendações de adubação para a cultura. O manejo de plantas daninhas, pragas e doenças foram iguais para todos os tratamentos, seguindo as recomendações técnicas (EMBRAPA, 2011).

Para determinação do potencial fisiológico de sementes foram colhidas e trilhadas manualmente, amostras de 2,0 m lineares em cada parcela, logo após a soja atingir o ponto de colheita. As cinco repetições de cada tratamento foram agrupadas para obter a amostra composta e o volume de sementes necessário à avaliação do potencial fisiológico por estratos da planta.

As plantas foram seccionadas em 3 partes iguais, denominadas por terço inferior, terço médio e terço superior, com separação das vagens presentes em cada um dos terços. As amostras foram todas trilhadas manualmente. As sementes foram armazenadas em câmara fria até a realização dos testes de germinação e vigor.

A partir de então, adotou-se o delineamento inteiramente casualizado, separadamente para cada cultivar, com parcelas subdivididas considerando-se: cinco densidades de semeadura, na parcela e três posições de sementes na planta (inferior, médio e superior), na subparcela.

No momento da realização dos testes, foi determinado o teor de água das sementes pelo método da estufa a 105 °C (BRASIL, 2009). Os testes para avaliação do potencial fisiológico foram determinados de acordo com as seguintes metodologias:

a) Germinação: determinada com base em oito repetições de 50 sementes em papel germitest umedecidos na proporção 2,5 por 1 (mL de água destilada por massa de papel seco em gramas) e mantidas em câmara de germinação sob temperatura controlada de $25 \pm 1^{\circ}\text{C}$ por 8 dias. Os resultados foram expressos em porcentagem de plântulas normais germinadas, segundo as Regras para Análise de Sementes - RAS (BRASIL, 2009).

b) Primeira contagem da germinação; realizada juntamente com o teste de germinação, computando-se o número de plântulas normais germinadas no quinto dia após a semeadura, com resultados expressos em porcentagem (BRASIL, 2009).

c) Comprimento de plântulas: o teste foi realizado de acordo com a metodologia proposta por Nakagawa (1999) em rolo de papel germistest com 10 sementes e adição de 2,5 vezes em massa de água em relação a massa do papel substrato, com 4 repetições. As sementes foram posicionadas com a micrópila voltada para a parte superior do papel. Após cinco dias, aferiu-se o comprimento da parte aérea e radicular das plântulas, sendo os resultados expressos em cm.

d) Massa seca de plântulas: foram avaliadas as plântulas normais

obtidas a partir do teste de comprimento de plântulas, excluindo destas os cotilédones. As repetições de cada parcela foram acondicionadas em sacos de papel e levados à estufa com circulação forçada de ar, mantida à temperatura de 80° C por um período de 24 horas (NAKAGAWA, 1999). Após este período as amostras foram pesadas em balança de precisão e os resultados expressos em mg por plântula.

e) Condutividade elétrica: o teste foi conduzido com 4 subamostras de 50 sementes para cada tratamento e repetição. Inicialmente as sementes foram colocadas em copos plásticos e pesadas em balança analítica de precisão. Posteriormente foram adicionados 75 mL de água deionizada nos copos contendo as sementes. Estes foram mantidos em câmara de germinação por 24h, a 25 °C (VIEIRA; KRZYZANOWSKI, 1999). Após o período de embebição, a condutividade elétrica da solução foi determinada por meio de leitura em condutivímetro. Os resultados foram expressos em $\mu\text{S cm}^{-1} \text{ g}^{-1}$.

f) Envelhecimento Acelerado; as sementes foram distribuídas em camada única sobre tela metálica e colocadas em caixas de germinação de plástico (11 x 11 x 3,5 cm), contendo 40 mL de água destilada e deionizada no fundo. Decorrido o período de envelhecimento de 48 horas a 41 °C em câmara de envelhecimento acelerado, as sementes foram colocadas para germinar, conforme metodologia já descrita para o teste de germinação. (MARCOS FILHO, 1999).

g) Emergência de plântulas em areia; foram semeadas em caixas plásticas com areia, em condições de casa de vegetação, quatro repetições de 100 sementes de cada tratamento, mantendo-se o solo úmido durante todo o teste. Foi realizada a contagem das plantas emergidas aos 21 dias após a semeadura (DAS) quando os cotilédones estavam completamente abertos e as folhas primárias diferenciadas (NAKAGAWA, 1999).

Os dados foram submetidos ao teste de Shapiro-Wylk para verificar a normalidade e ao teste de Hartley para verificar a homocedasticidade das variâncias dos resíduos. Após a constatação destes pressupostos, aplicou-se análise de variância e análise de regressão para o fator densidade de semeadura e comparação de médias pelo teste de Tukey para os diferentes estratos na planta ($p < 0,05$).

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As sementes apresentavam teor de água entre 100 e 110 g kg⁻¹ de sementes antes da implantação dos testes de germinação e vigor. Essa uniformidade é importante para condução das análises laboratoriais, visando a padronização dos testes e obtenção de resultados confiáveis (MARCOS FILHO, 2015) O resumo da análise de variância contendo o valor de F, sua significância e os coeficientes de variação, para ambas as cultivares está apresentado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Resumo da análise de variância com os respectivos valores de F, sua significância, e o coeficiente de variação para os testes de potencial fisiológico das sementes das cultivares BRS 1010 IPRO e NS 5959 IPRO em resposta à redução da densidade de semeadura e à posição da semente na planta. Londrina, PR. Safra 2016/17.

| Fonte de variação | G.L | GERM | PRIM | COMP | MS | COND | ENV | EMERG |
|-------------------|-----|--------------------|--------------------|---------|---------|---------------------|--------------------|---------------------|
| BRS 1010 IPRO | | | | | | | | |
| Densidade (D) | 4 | 66,2** | 44,5 | 15,2** | 10,7* | 342,3** | 66,3* | 16,2ns |
| Erro a | 15 | 7,64 | 12,9 | 1,5 | 2,7 | 29,7 | 18,9 | 13,6 |
| Posição (P) | 2 | 41,1** | 203,5** | 387,9** | 133,5** | 2523,7** | 530,8** | 61,8** |
| D * P | 8 | 28,7** | 21,9 ^{ns} | 61,6** | 13,9** | 92,4 ^{ns} | 11,0 ^{ns} | 30,5 ^{ns} |
| Erro b | 30 | 4,71 | 15,3 | 2,1 | 3,5 | 49,3 | 11,8 | 7,0 |
| total | 59 | | | | | | | |
| CV 1 (%) | | 2,91 | 4,02 | 3,96 | 4,6 | 7,6 | 4,7 | 3,81 |
| CV 2 (%) | | 2,29 | 4,39 | 4,70 | 5,2 | 9,8 | 3,7 | 2,73 |
| NS 5959 IPRO | | | | | | | | |
| Densidade (D) | 4 | 183,0** | 137,9** | 54,4** | 31,7** | 1505,1** | 237,7** | 106,7 ^{ns} |
| Erro a | 15 | 22,2 | 22,1 | 2,69 | 6,1 | 228,6 | 34,6 | 44,1 |
| Posição (P) | 2 | 1506,2** | 1384,1** | 53,7** | 30,9* | 4575,4** | 4270,1** | 695,7** |
| D * P | 8 | 16,1 ^{ns} | 46,9* | 20,8** | 24,3** | 212,3 ^{ns} | 70,0 ^{ns} | 88,6 ^{ns} |
| Erro b | 30 | 17,8 | 19,2 | 3,7 | 5,7 | 188,6 | 39,2 | 42,9 |
| total | 59 | | | | | | | |
| CV 1 (%) | | 5,96 | 6,47 | 5,22 | 6,97 | 14,5 | 8,45 | 7,96 |
| CV 2 (%) | | 5,33 | 6,02 | 6,08 | 6,78 | 13,2 | 9,01 | 7,86 |

^{ns}, * e **: Não significativo, significativo a 5% e a 1% de probabilidade, respectivamente. Germinação (GERM), primeira contagem da germinação (PRIM), comprimento de plântulas (COMP), massa seca de plântulas (MS), condutividade elétrica (COND), envelhecimento acelerado (ENV) e emergência em areia (EMERG).

A germinação das sementes foi influenciada pela interação entre os fatores na cultivar BRS 1010 IPRO e isoladamente pelos dois fatores na cultivar NS 5959 IPRO (Tabela 4.1). A análise do desdobramento da interação, comparando-se as três posições na planta dentro de cada densidade de semeadura para a BRS 1010 IPRO está apresentada na Tabela 2. Nota-se que nas três densidades superiores (100%, 80% e 60%) não houve diferença do potencial germinativo das sementes entre as três posições, porém nas densidades de 40% e 20%, as sementes do terço inferior apresentaram menor germinação comparativamente às dos terços médio e superior.

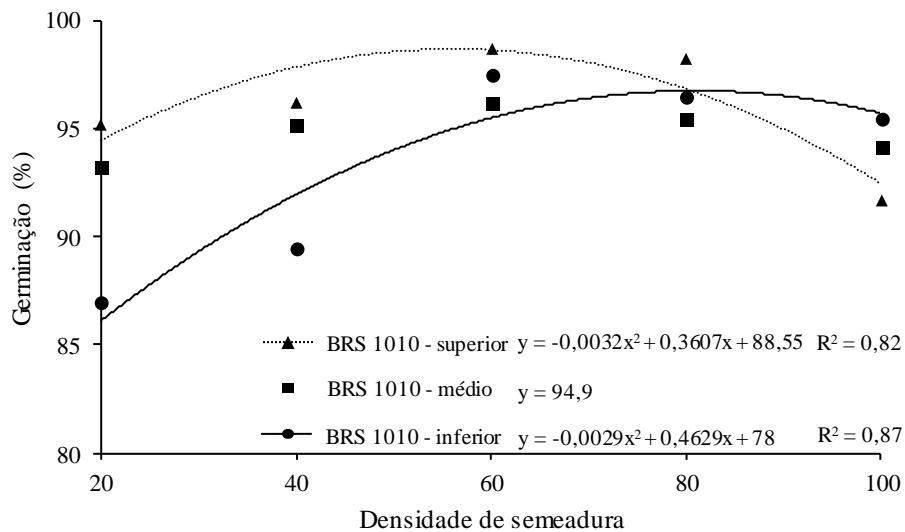
Tabela 4.2 – Desdobramento da interação entre densidades de semeadura e posições na planta para as variáveis germinação de sementes, comprimento de plântulas e massa seca de plântulas na cultivar de soja BRS 1010 IPRO. Londrina-PR, safra 2016/17.

| Densidade* | inferior | médio | superior |
|-------------------------------|----------|--------|----------|
| germinação (%) | | | |
| 100 | 95,50a** | 94,25a | 91,75a |
| 80 | 96,50a | 95,50a | 98,25a |
| 60 | 97,5a | 96,25a | 98,75a |
| 40 | 89,50b | 95,25a | 96,25a |
| 20 | 87,00b | 93,25a | 95,25a |
| comprimento de plântulas (cm) | | | |
| 100 | 25,47b | 31,74a | 33,43a |
| 80 | 26,60b | 22,06c | 38,13a |
| 60 | 28,60b | 26,03c | 35,74a |
| 40 | 27,44b | 33,99a | 31,53a |
| 20 | 25,83c | 32,23b | 37,84a |
| massa seca de plântulas (mg) | | | |
| 100 | 32,38b | 36,69a | 36,82a |
| 80 | 33,13b | 33,78b | 37,67a |
| 60 | 34,98b | 35,14b | 41,35a |
| 40 | 31,70b | 39,24a | 37,79a |
| 20 | 32,62b | 36,05a | 36,72a |

* porcentagem do recomendado pelo obtentor. ** Médias seguidas pela mesma letra na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey, a 5% de significância.

Com relação ao efeito da densidade de semeadura para cada uma das posições na planta, houve efeito significativo para o terço inferior e superior. Tanto no terço inferior quanto superior, houve ajuste polinomial de segundo grau da equação, indicando que o maior percentual de germinação esteve nas densidades intermediárias. Porém, no terço inferior o ponto de máxima germinação ocorreu com densidade de 79% enquanto que no terço superior ocorreu com densidade de 56%, demonstrando que as sementes da parte baixa das plantas produzidas em densidades reduzidas apresentam menor viabilidade (Figura 4.2).

Figura 4.2 – Desdobramento da interação entre densidade de semeadura e posição na planta para a germinação de sementes da cultivar de soja BRS 1010 IPRO de soja. Londrina-PR, safra 2016/17.



Analisando o efeito isolado da posição da semente na planta para a cultivar NS 5959 IPRO, verifica-se que na média de todas as densidades, a germinação foi menor no terço inferior do que nos terços médio e superior (Tabela 4.3). Os padrões mínimos para comercialização de sementes, estipulam que a germinação de sementes de soja deve ser acima de 80% (BRASIL, 2005), portanto é possível constatar que as sementes oriundas do terço inferior sequer atingiram os padrões para comercialização. Os fatores que podem ter levado à menor germinação das sementes no terço inferior das plantas podem ser: microclima mais favorável ao desenvolvimento de microrganismos fitopatogênicos nas sementes e menor

penetração de agroquímicos nas partes mais baixas do dossel (HOLTZ et al., 2014).

Além disso, em cultivares com crescimento indeterminado, as sementes posicionadas nas partes inferiores da plantas possuem desenvolvimento mais adiantado que as acima, o que faz com que elas atinjam a maturidade mais cedo, enquanto a soja ainda se encontra com muitas folhas e longe do ponto de colheita (OLIVEIRA JUNIOR et al., 2016). Assim, é possível que o maior tempo pelo qual estas sementes permanecem no campo após a maturidade fisiológica sofrendo processos de deterioração pela ação do tempo, umidade, ataque de percevejos e microrganismos, esteja influenciando a sua viabilidade após a colheita.

Tabela 4.3 – Efeito isolado da posição da semente na planta (terço inferior, médio e superior) no potencial fisiológico de sementes de soja das cultivares BRS 1010 IPRO e NS 5959 IPRO. Londrina-PR, safra 2016/17.

| BRS 1010 IPRO | inferior | médio | superior |
|--|----------|--------|----------|
| Primeira contagem da germinação (%) | 87,5b | 87,0b | 92,8a |
| Condutividade elétrica ($\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$) | 84,3a | 69,4b | 62,3c |
| Emergência em areia (%) | 94,7b | 97,4a | 98,0a |
| Envelhecimento acelerado (%) | 91,5b | 86,1c | 96,4a |
| NS 5959 IPRO | | | |
| Germinação (%) | 69,0b | 82,75a | 85,05a |
| Condutividade elétrica ($\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$) | 117,6a | 107,2a | 87,8b |
| Emergência em areia (%) | 77,9b | 82,5b | 89,6a |
| Envelhecimento acelerado (%) | 53,5c | 82,1a | 73,0b |

* Médias seguidas pela mesma letra na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey, a 5% de significância.

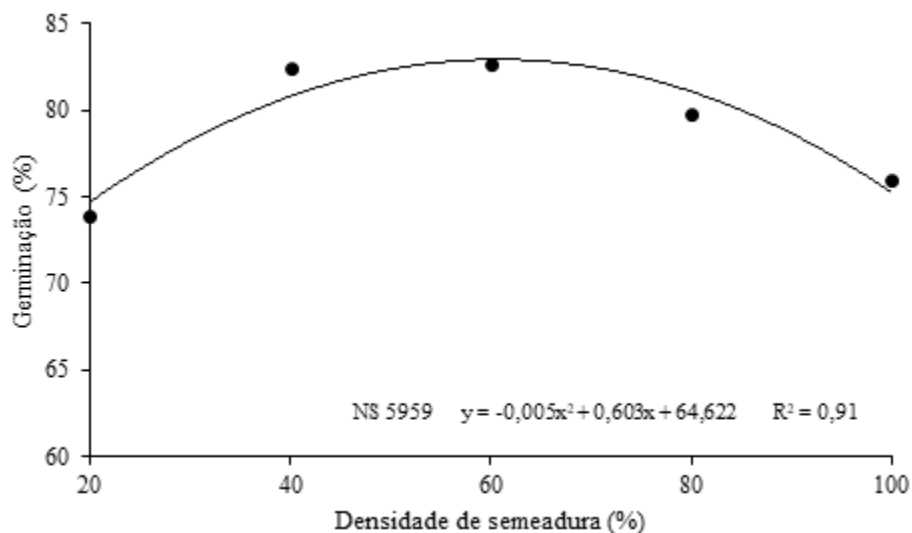
Com relação ao efeito isolado da densidade para a NS 5959 IPRO, houve ajuste polinomial de segundo grau, indicando que os melhores percentuais de germinação foram obtidos nas densidades intermediárias, assim como ocorrido com a BRS 1010 IPRO (Figura 4.3).

A baixa germinação nas maiores densidades provavelmente se deve ao microclima ocasionado pelo maior número de plantas por área, que resulta em maior sombreamento e menor aeração, condições que favorecem a ocorrência de microrganismos nas sementes e que podem reduzir a germinação. Por outro lado a

baixa germinação nas densidades muito reduzidas pode estar associada ao maior número de sementes por planta (FERREIRA et al., 2016) o que associado à menor interceptação de radiação solar (WERNER et al., 2018) e menor exploração do solo pelas raízes (BALBINOT JUNIOR et al., 2018c) na fase reprodutiva da soja, pode comprometer a partição de fotoassimilados e a adequada formação da semente, fazendo com que estes tenham menor massa, viabilidade e vigor (SCHUCH et al., 2009). De acordo com Padua et al. (2010) sementes maiores e mais densas apresentam maior germinação e vigor resultando em maior produtividade.

Baron et al. (2018) e Crusciol et al. (2002) também constataram que sementes de soja produzidas em menores densidades apresentaram menor viabilidade. Os autores também atribuíram este fato ao menor aproveitamento dos recursos ambientais que podem levar à produção de sementes menos densas e/ou de menor tamanho.

Figura 4.3 – Germinação de sementes de soja da cultivar NS 5959 IPRO influenciada pela redução da densidade de semeadura. Londrina-PR, safra 2016/17.



A primeira contagem da germinação da cultivar BRS 1010 IPRO foi influenciada pela posição da sementes na planta, sem efeito da densidade de semeadura (Tabela 4.1). Foi constatado que as sementes do terço superior apresentaram maior germinação na primeira contagem, do que nos terços inferior e médio, indicando maior vigor nesta condição (Tabela 4.3).

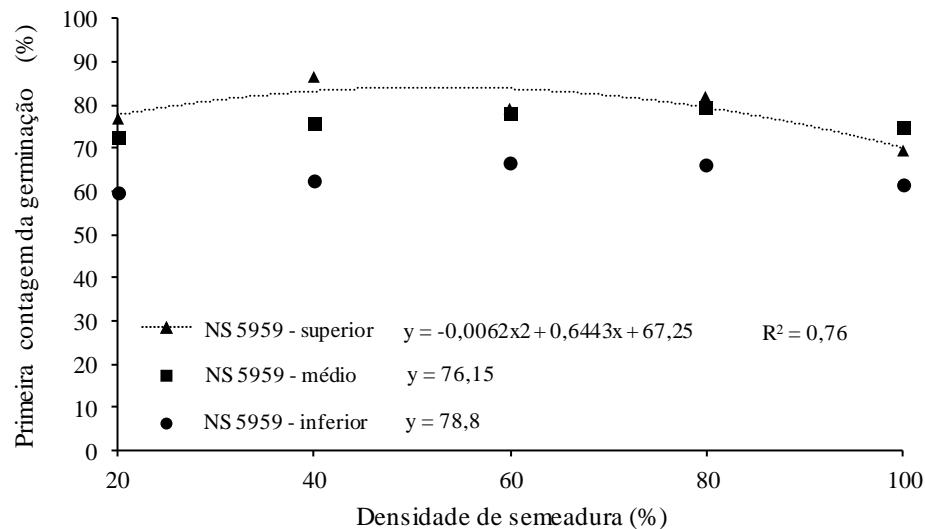
Para a NS 5959 IPRO houve interação entre os fatores. Em todas as densidades avaliadas, o terço inferior apresentou menor germinação na primeira contagem do que os demais terços. O terço médio diferiu-se do superior somente na densidade de 40% (Tabela 4.4). Houve efeito significativo da densidade de semeadura somente no terço superior, com ajuste polinomial de segundo grau, indicando maior vigor nas sementes produzidas nas densidades intermediárias (Figura 4.4).

Tabela 4.4 – Desdobramento da interação entre densidades de semeadura e posição da semente na planta para as variáveis primeira contagem da germinação, comprimento de plântulas e massa seca de plântulas na cultivar de soja NS 5959 IPRO. Londrina-PR, safra 2016/17.

| Densidade* | inferior | médio | superior |
|-------------------------------------|----------|--------|----------|
| primeira contagem da germinação (%) | | | |
| 100 | 61,5b** | 74,75a | 69,50a |
| 80 | 66,25b | 79,75a | 82,00a |
| 60 | 66,75b | 78,00a | 79,25a |
| 40 | 62,25c | 75,75b | 86,50a |
| 20 | 59,50b | 72,50a | 76,75a |
| comprimento de plântulas (cm) | | | |
| 100 | 31,25b | 36,46a | 35,49a |
| 80 | 29,91b | 36,41a | 32,56b |
| 60 | 26,51b | 32,39a | 29,40ab |
| 40 | 30,56ab | 28,86b | 32,69a |
| 20 | 29,65ab | 28,08b | 31,83a |
| massa seca de plântulas (mg) | | | |
| 100 | 32,5b | 40,1a | 39,2a |
| 80 | 36,9a | 36,5a | 34,0a |
| 60 | 34,2a | 37,2a | 36,3a |
| 40 | 34,6ab | 32,6b | 38,5a |
| 20 | 31,9a | 32,4a | 34,1a |

* porcentagem do recomendado pelo obtentor. ** Médias seguidas pela mesma letra na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey, a 5% de significância.

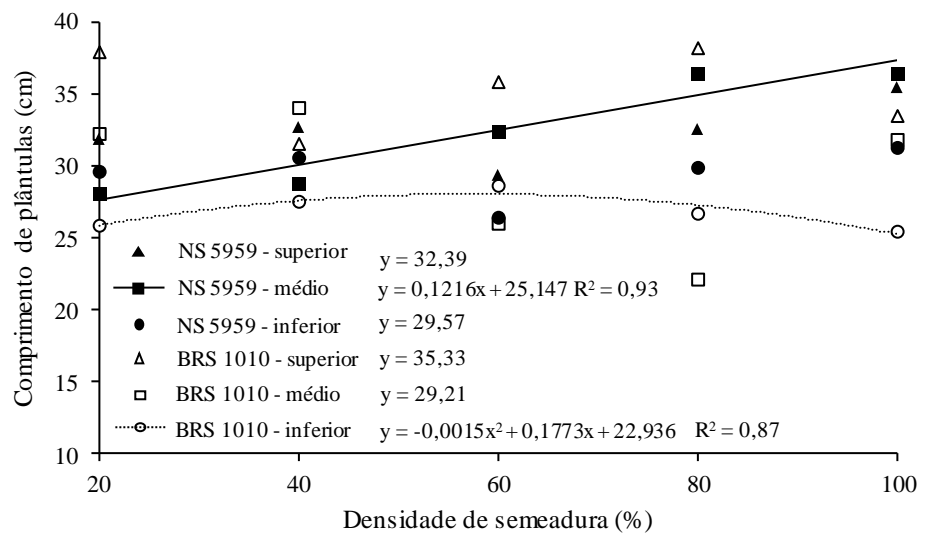
Figura 4.4 – Desdobramento da interação entre densidades de semeadura e posição da semente na planta para a primeira contagem da germinação de sementes de soja da cultivar de soja NS 5959 IPRO. Londrina-PR, safra 2016/17.



Rossi et al. (2017) não constataram redução na germinação e primeira contagem em resposta à redução da densidade 170 para 70 mil plantas ha⁻¹ para as cultivares de soja BRS 232 e BRS 284. Entretanto essas cultivares possuem tipo de crescimento determinado e maior capacidade de ramificação do que as cultivares avaliadas no presente estudo, conferindo maior plasticidade fenotípica.

O comprimento de plântulas foi influenciado por ambos fatores experimentais apresentando interação nas duas cultivares (Tabela 4.1). De maneira geral, em ambas cultivares, houve aumento no comprimento das plântulas oriundas das sementes das porções superiores, em detrimento das inferiores (Tabelas 4.2 e 4.4). Na BRS 1010 IPRO, a densidade de semeadura influenciou somente o comprimento das plântulas oriundas do terço inferior, com ajuste polinomial de segundo grau (Figura 4.5). Na NS 5959 houve influência da densidade somente para o terço médio, com redução linear estimada em 1,2 cm no comprimento de plântulas para cada 10% de redução da densidade de semeadura. A baixa influência da densidade sobre o comprimento da plântulas é corroborada por Ferreira et al. (2017) que não observaram influência de densidades variando entre 560 a 150 mil sementes viáveis ha⁻¹ sobre o comprimento de plântulas e demais características do potencial fisiológico de sementes.

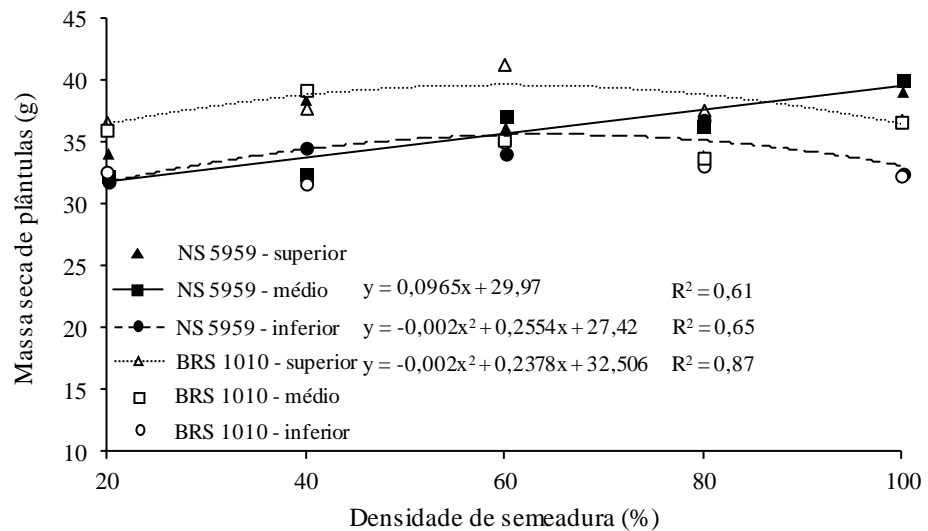
Figura 4.5 - Desdobramento da interação entre densidades de semeadura e posição da semente na planta para o comprimento de plântulas das cultivares de soja BRS 1010 IPRO e NS 5959 IPRO. Londrina-PR, safra 2016/17.



Para o teste de massa seca de plântulas, houve interação para os fatores nas duas cultivares (Tabela 4.1). Na cultivar BRS 1010 IPRO, analisando a diferença entre os terços em cada densidade, constata-se maior massa seca de plântulas nas posições superiores em detrimento das inferiores em todas as densidades (Tabela 4.2). Na NS 5959 IPRO também observou-se o mesmo comportamento, porém somente nas densidades de 100% e 60% (Tabela 4.4). No terço inferior da NS 5959 IPRO e terço superior da BRS 1010 IPRO houve ajuste polinomial de segundo grau, indicando maior vigor das sementes das densidades intermediárias, enquanto que no terço médio da NS 5959 IPRO, houve ajuste linear, com redução da massa seca nas densidades mais baixas (Figura 4.6).

Portanto, assim como na germinação das sementes, o vigor, expresso pela massa de matéria seca de plântulas, foi menor nas sementes produzidas em densidades muito baixas e também nas densidades próximas a 100%, o que confirma, que tanto a densidade recomendada, quanto a redução extrema da densidade podem proporcionar condições desfavoráveis à formação de sementes.

Figura 4.6 – Desdobramento da interação entre densidades de semeadura e posição da semente na planta para a massa seca de plântulas das cultivares de soja BRS 1010 IPRO e NS 5959 IPRO. Londrina-PR, safra 2016/17.



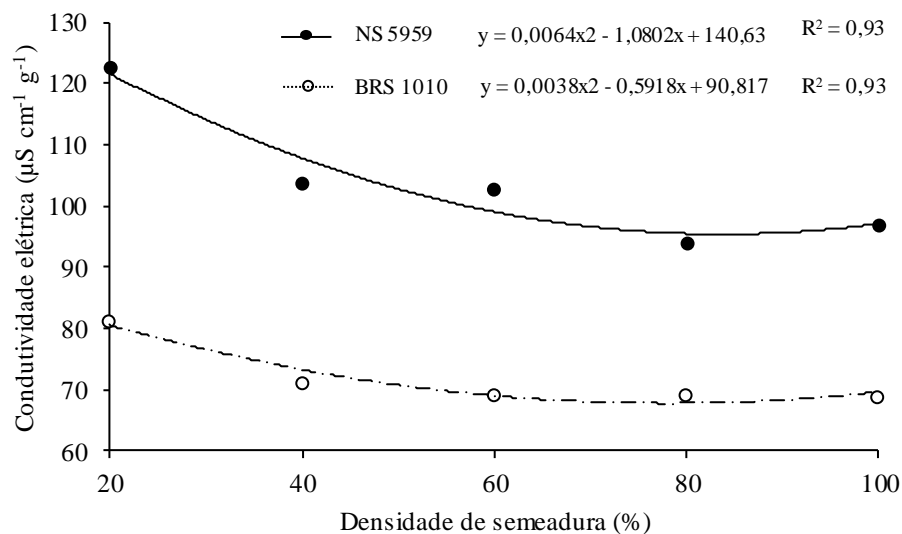
A condutividade elétrica é um teste que expressa a deterioração das sementes, em função da perda de eletrólitos pelas células, o que resulta em aumento da condutividade elétrica da solução. Assim o aumento da condutividade elétrica indica menor vigor das sementes (VIEIRA; KRZYZANOWSKI, 1999). No presente estudo os dois fatores experimentais afetaram a condutividade em ambas as cultivares sem interação (Tabela 4.1).

Na cultivar BRS 1010 IPRO, houve diferença significativa entre a condutividade dos terços inferior, médio e superior (Tabela 4.3), demonstrando que as sementes do terço inferior tiveram maior perda de eletrólitos do que as do terço médio, que por sua vez tiveram menor perda do que as do terço inferior. Na cultivar NS 5959 IPRO as sementes do terço superior também apresentaram menor condutividade elétrica, porém as do terço médio e inferior não diferiram entre si.

Estes resultados são mais um indicativo de que as sementes produzidas no terço superior possuem maior potencial fisiológico do que as produzidas nas porções mais inferiores do dossel. Flores (2016) avaliou o potencial fisiológico de sementes produzidas nos terços inferior, médio e superior de diferentes cultivares de soja e também constatou que as sementes do terço inferior apresentaram menor germinação e vigor, expresso pela menor condutividade elétrica e pelos testes de emergência a campo, tetrazólio e envelhecimento acelerado.

A redução acentuada da densidade de semeadura aumentou a condutividade elétrica das sementes, nas duas cultivares, porém com maior intensidade na NS 5959 IPRO (Figura 4.7). Entretanto, Ferreira et al. (2017) e Rossi et al. (2017) não obtiveram diferenças significativas para a condutividade elétrica em função de modificações na densidade de semeadura. Porém é importante ressaltar que essas pesquisas não avaliaram densidades de plantas tão reduzidas quanto no presente trabalho, o que indica que, possivelmente, o efeito aqui apresentado, não se repete quando a redução da densidade é menos acentuada.

Figura 4.7 – Condutividade elétrica de sementes de soja das cultivares BRS 1010 IPRO e NS 5959 IPRO influenciada pela redução da densidade de semeadura. Londrina-PR, safra 2016/17.



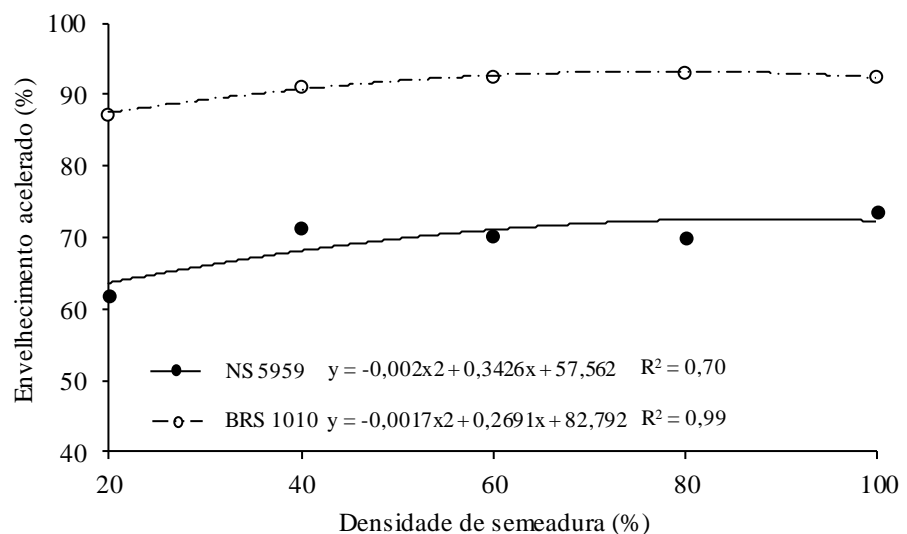
O teste de envelhecimento acelerado tem por objetivo avaliar a capacidade de um lote de sementes germinar após ser submetido a condições de temperatura e umidade relativa que aceleram a sua deterioração (MARCOS FILHO, 1999). Houve efeito isolado de ambos os fatores experimentais sem interação para o teste de envelhecimento acelerado (Tabela 4.1). As sementes da cultivar BRS 1010 IPRO do terço superior apresentaram maior germinação após envelhecimento do que as sementes dos terços inferior e médio. Na cultivar NS 5959 IPRO, as sementes do terço inferior apresentaram o menor percentual de germinação após envelhecimento seguidas pelo terço superior e médio (Tabela 4.3). Esses resultados reforçam o que

já foi demonstrado pelos demais testes, indicando a clara tendência de maior potencial fisiológico das sementes oriundas dos estratos superiores da planta.

A densidade de semeadura afetou a germinação após envelhecimento em ambas as cultivares, principalmente na densidade mais baixa. Houve ajuste polinomial de segundo grau para as duas cultivares, o que demonstra mais uma vez que a redução extrema da densidade, para apenas 20% da densidade recomendada, pode resultar em menor potencial fisiológico das sementes produzidas (Figura 4.8).

Ao analisar os dados, fica claro que o ajuste da equação de regressão só ocorreu por conta da densidade mais baixa, e que a redução em até 40% da densidade ocasionou pouca influência sobre a germinação após envelhecimento acelerado. Adicionalmente, Vazquez et al. (2008) e Ferreira et al. (2017) não constataram impacto da densidade de semeadura, variando entre 150 e 550 mil sementes viáveis ha^{-1} , sobre a germinação após envelhecimento acelerado, o que confirma, que a diferença constatada no presente estudo se deve somente à drástica redução da densidade.

Figura 4.8 – Germinação de sementes de soja após teste de envelhecimento acelerado em resposta à redução da densidade de semeadura (100%, 80%, 60%, 40% e 20% do recomendado pelo obtentor). Cultivares BRS 1010 IPRO e NS 5959 IPRO. Londrina-PR, safra 2016/17.



Com relação ao teste de emergência em areia, foi constatado efeito somente da posição da semente na planta para ambas cultivares (Tabela 4.1). Na cultivar BRS 1010 IPRO houve menor emergência de plântulas para sementes oriundas do terço inferior em relação às dos terços médio e superior (Tabela 4.3). Já na NS 5959 IPRO sementes tanto do terço inferior, quanto médio apresentaram menor emergência de plântulas do que as do terço superior (Tabela 4.3), conforme constatado também por Flores (2016). Nota-se que os valores de emergência de plântulas em areia foram maiores do que as taxas de germinação, o que é comum em sementes de soja, tendo em vista que a condução do teste em rolos de papel em câmaras de germinação pode favorecer a ocorrência de microrganismos fitopatogênicos.

A ausência de resposta da densidade de semeadura sobre a emergência de plântulas em areia, também é um resultado importante e que deve ser levado em consideração. Ferreira et al. (2017) também não constataram influência da densidade de semeadura sobre testes de vigor com base na emergência de plântulas. Portanto, embora os demais testes indiquem influência da densidade sobre o vigor das sementes, isto não se confirmou no teste de emergência em areia, indicando que eventuais reduções na densidade de plantas, podem não interferir na emergência de plântulas no campo.

É importante considerar, que embora os testes tenham apontado efeito da densidade de semeadura para o potencial fisiológico, este efeito foi de baixa magnitude e geralmente ocorreu nas extremidades da faixa de densidade testada. Portanto, uma eventual redução na densidade para valores entre 40 e 60% do recomendado para as cultivares BRS 1010 IPRO e NS 5959 IPRO, não devem ocasionar alterações significativas no potencial fisiológico das sementes produzidas. Este resultado é bastante importante do ponto de vista prático, tendo em vista que muitas pesquisas, no Brasil e no exterior, têm sugerido a redução da densidade de semeadura com base na plasticidade fenotípica da soja, fazendo com que haja redução dos custos de produção sem alteração da produtividade (BOARD; KAHN, 2013; BÜCHLING et al., 2017; CORASSA et al., 2018; THOMPSON et al. 2015).

4.4 CONCLUSÕES

A germinação das sementes das cultivares NS 5959 IPRO e BRS 1010 IPRO é maior em densidades de semeadura variando entre 40 e 80% do recomendado pelos obtentores.

A redução da densidade de semeadura, para apenas 20% do recomendado, resulta em menor vigor de sementes.

A redução da densidade de semeadura para valores até 40% da densidade não provoca impactos significativos sobre o potencial fisiológico das sementes.

O potencial fisiológico das sementes é crescente conforme se avança do estrato inferior para o superior da planta.

4.5 REFERÊNCIAS

BALBINOT JUNIOR, A. A.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; PRIETO, J.; MORAES M. T.; WERNER, F.; FERREIRAS, A. S. Crescimento e distribuição de raízes de soja em diferentes densidades de plantas. **Revistas de Ciências Agroveterinárias**, v.17, p.12-22, 2018c.

BALBINOT JUNIOR, A. A.; OLIVEIRA, M. C. N.; FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; ZUCARELI, C.; FERREIRA, A. S.; WERNER, F. Phenotypic plasticity in a soybean cultivar with indeterminate growth type. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.53, n. 9, p1038-1044, 2018a.

BALBINOT JUNIOR, A. A.; OLIVEIRA, M. C. N.; ZUCARELI, C.; FERREIRA, A. S.; WERNER, F.; AGUIAR E SILVA, M. A. Analysis of phenotypic plasticity in indeterminate soybean cultivars under different row spacing. **Australian Journal of Crop Science**, v.12, n.4, p. 648-654, 2018b.

BALBINOT JUNIOR, A.A.; PROCOPIO, S.O.; COSTA, J.M.; KOSINSKI, C.L.; PANISON, F.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J.C. Espaçamento reduzido e plantio cruzado associados a diferentes densidades de plantas de soja. **Semina Ciências Agrárias**, v.36, n.5, p.2977-2986, 2015.

BARON, F.; CORASSA, G. .; FIORESI, D.; SANTI, A. L.; MARTINI, R. T.; KULCZYNSKI, S. M. Physiological quality of soybean seeds under different yield environments and plant density. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.22, n. 4, p. 237-242, 2018.

BOARD, J.E. Light interception efficiency and light quality affect yield compensation of soybean at low plant populations. **Crop Science**, v.40, n.5, p.1285-1294, 2000.

BOARD, J.E.; KAHLON, C.S. Morphological responses to low plant population differ between soybean genotypes. **Crop Science**, v.53, n.3, p.1109-1119, 2013.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Portaria nº 243 de 20 de dezembro de 2005. Estipula padrões para comercialização de sementes de soja. **Diário Oficial da União**: Seção 1, Brasília, DF, ano 142, 20 dez 2005.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília: MAPA/ACS, 2009. 395 p.

BÜCHLING, C.; OLIVEIRA NETO, A. M.; GUERRA, N.; BOTTEGA, E. L. Uso da plasticidade fenotípica como estratégia para a redução da população de plantas em cultivares de soja. **Revista Agrarian**, v.10, n.35, p.22-30, 2017.

CANTARELLI, L. D.; SCHUCH, L. O. B.; TAVARES, L. C.; RUFINO, C. A. Variabilidade de plantas de soja originadas de sementes de diferentes níveis de qualidade fisiológica. **Acta Agronômica**, v.64, p234-238, 2015.

CORASSA, G.M.; AMADO, T.J.C.; STRIEDER, M.L.; SCHWALBERT, R.; PIRES, J.L.F.; CARTER, P.R.; CIAMPITTI, I.A. Optimum soybean seeding rates by yield environment in Southern Brazil. **Agronomy Journal**, v.110, n.6, p.1-9, 2018.

COX, W. J.; CHERNEY, J. H.; SHIELDS, E. Soybeans compensate at low seeding rates but not at high thinning rates. **Agronomy Journal**, v. 102, n.4, p. 1238-1243, 2010.

CRUSCIOL, C. A. C.; LAZARINI, E.; BUZO, C. L.; SÁ, M. E. Produção e qualidade fisiológica de sementes de soja avaliadas na semeadura de inverno. **Scientia Agricola**, v.59, p.75-96, 2002.

EMBRAPA: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Tecnologias de Produção de Soja** - Região Central do Brasil 2012 e 2013. Londrina: Embrapa Soja, 2011. 261 p.

FERREIRA, A. S.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; WERNER, F.; ZUCARELI, C. Plant spatial arrangement affects grain production from branches and stem of soybean cultivars. **Bragantia**, v.77, n. 4, 2018.

FERREIRA, A. S.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; WERNER, F.; ZUCARELI, C.; FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H. Plant density and mineral nitrogen fertilization influence yield, yield components, and concentration of oil and protein in soybean grains. **Bragantia**, v.75, n.3, p. 362-370, 2016.

FERREIRA, A.S.; ZUCARELI, C.; BALBINOT JUNIOR, A.A.; WERNER, F.; COELHO, A.E. Size, physiological quality, and green seed occurrence influenced by seeding rate in soybeans. **Semina: Ciências Agrárias**, v.38, n.2, p.595-606, 2017.

FLORES, M. F. **Qualidade fisiológica e rendimento de sementes de soja em função do hábito de crescimento da planta**. 2016. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

GASPAR, A. P.; MUELLER, D. S.; WISE, K. A.; CHILVERS; TENUTA, A. U.; CONLEY, S. P. Response of broad-spectrum and target-specific seed treatments and seeding rate on soybean seed yield, profitability, and economic risk. **Crop Science**, v.57, n.4, 2017.

GASPAR, A.P.; CONLEY, S.P. Responses of canopy reflectance, light interception, and soybean seed yield to replanting suboptimal stands. **Crop Science**, v.55, p.377-385, 2015.

GUNDEL, P. E.; PIERIK, R.; MOMMER, L.; BALLARÉ, C. Competing neighbors: light perception and root function. **Oecologia**, v.176, n.1, 1-10, 2014.

HOLTZ, V.; COUTO, R.F.; OLIVEIRA, D.G.; DOS REIS, E.F. Deposição de calda de pulverização e produtividade da soja cultivada em diferentes arranjos espaciais. **Ciência Rural**, v. 44, n. 8, p. 1371-1376, 2014.

LUCA, M. J.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Feasibility of lowering soybean planting density without compromising nitrogen fixation and yield. **Agronomy Journal**, v.106, n.6, p.2118-2124, 2014.

MARCOS FILHO, J. **Fisiologia de sementes de plantas cultivadas**. Londrina: Abrates, 2015. 659 p.

MARCOS FILHO, J. Testes de vigor: Importância e utilização. In: KRZYZANOWSKI, F. C.; VIEIRA, R. D.; FRANÇA NETO, J. B. (ed.). **Vigor de sementes: conceitos e testes**. Londrina: ABRATES, 1999, cap.1, p.1-21.

MAUAD, M.; SILVA, T. L. B.; ALMEIDA NETO, A. I.; ABREU, V. G. Influência da densidade de semeadura sobre características agronômicas na cultura da soja. **Revista Agrarian**, v. 3, n. 9, p. 175-181, 2010.

NAKAGAWA, J. Testes de vigor baseados no desempenho de plântulas. In: KRZYZANOWSKI, F. C.; VIEIRA, R. D.; FRANÇA NETO, J. B. (Ed.). **Vigor de sementes: conceitos e testes**. Londrina: ABRATES, 1999. p. 1 – 21.

OLIVEIRA JUNIOR, A.; CASTRO, C.; PEREIRA, L. R.; DOMINGOS, C. S. **Estádios fenológicos e marcha de absorção de nutrientes da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2016.

PADUA, G. P.; ZITO, R. K.; ARANTES, N. E.; FRANÇA NETO, J de B. Influência do tamanho da semente na qualidade fisiológica e na produtividade da cultura da soja. **Revista Brasileira de Sementes**, v.32, n.3, p.09-16, 2010.

PESKE, S.; VILELLA, A.; MENEGHELLO, G. E. **Sementes: fundamentos científicos e tecnológicos**. 3 ed. Pelotas: Editora Universitária/UFPEL, 2012.

ROSSI, R. F.; CAVARIANI, C. FRANÇA-NETO, J. B. Vigor de sementes, população de plantas e desempenho agrônômico de soja. **Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v.60, n.3, p.215-222, 2017.

SANTOS, H.G. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3 ed. Brasília: EMBRAPA, 2018. 353 p.

SCHEREEN, B.R.; PESKE, S.T.; SCHUCH, L.O.B.; BARROS, A.C.A. Qualidade fisiológica e produtividade de sementes de soja. **Revista Brasileira de Sementes**, v.32, p.35-41, 2010.

SCHUCH, L. O. B.; KOLCHINSKI, E. M.; FINATTO, J. A. Qualidade fisiológica da sementes e desempenho de plantas isoladas em soja. **Revista Brasileira de Sementes**, v.31, n.1, p.144-149, 2009.

THOMPSON, N. M.; LARSON, J. A.; LAMBERT, D. M.; ROBERTS, R. K.; MENGISTU, A.; BELLALLOUI, N.; WALKER, E. R. Mid-south soybean yield and net return as affected by plant population and row spacing. **Agronomy Journal**, v.107, n.3, 979-989, 2015.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology – Laboratory of Climatology, 1955 104p. (Publications in Climatology, vol III, n.1).

VAZQUEZ, G. H.; CARVALHO, N. M.; BORBA, M. M. Z. Redução na população de plantas sobre a produtividade e a qualidade fisiológica da semente de soja. **Revista Brasileira de Sementes**, v.30, n.2, p.1-11, 2008.

VIEIRA, R. D.; KRZYZANOWSKI, F. C. Teste de condutividade elétrica. In: KRZYZANOWSKI, F. C.; VIEIRA, R. D.; FRANÇA NETO, J. B. (ed.) **Vigor de sementes: conceitos e testes**. Londrina: ABRATES, 1999. cap.4, p.1-26.

WERNER, F.; AGUIAR E SILVA, M. A.; FERREIRA, A. S.; NEUMAIER, N.; BALBINOT JUNIOR, A. A. Dinâmica da cobertura do solo por plantas e NDVI de cultivares de soja em diferentes arranjos espaciais de plantas. **Colloquium Agrariae**, v.14, n.2, p.183-190, 2018.

WERNER, F.; BALBINOT JUNIOR, A.A.; FERREIRA, A.S.; AGUIAR E SILVA, M.A.; MANDARINO, J.M.G.; ZUCARELI, C. Size, chlorophyll retention and protein and oil contents of grains from soybean plants grown in diferent spatial arrangements. **Semina: Ciências Agrárias**, v.38, n.1, p.85-96, 2017.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados nesta pesquisa demonstram que o maior número de vagens por planta, que proporciona o efeito compensatório da soja em resposta à redução da densidade, está diretamente relacionado com o aumento da produção de grãos nos ramos e em menor grau com o aumento do número de grãos por vagem. Esta plasticidade leva a semelhante número de vagens por unidade de área, proporcionando alta capacidade desta espécie em obter produtividades semelhantes mesmo em ampla variação da densidade de semeadura.

Entretanto, densidades muito reduzidas, levam a um baixo aproveitamento dos recursos do ambiente, principalmente menor interceptação da radiação solar o que resultou em grãos de menor massa e levou a reduções na produtividade para densidades abaixo da mínima ótima. Desta maneira, o cultivo em densidades mínimas ótimas, pode elevar a rentabilidade da cultura, pois reduz o custo de produção sem alterar a produtividade.

Os resultados obtidos indicam o grande potencial em reduzir o custo com sementes, sem alterar a produtividade, gerando aumento de rentabilidade, sobretudo em cultivares com grande plasticidade fenotípica, como a BRS 1010 IPRO. Para essa cultivar, a economia com sementes pode ser de, no mínimo 40%, cerca de 19,0 kg ha⁻¹, considerando a massa de mil sementes em 150 g. Essa economia representa algo em torno de R\$ 150,00 ha⁻¹ (IMEA, 2019). Já, para a cultivar NS 5959, essa possibilidade de redução nos custos é cerca de metade do valor. Assim, esses resultados vão ao encontro de soluções para aumentar a rentabilidade da cultura da soja.

Porém, mais investigações se fazem necessárias com relação as alterações provocadas pela densidade sobre os teores de óleo e proteína nos grãos, tendo em vista que o cultivo da soja sob densidades mínimas ótimas do ponto de vista da produtividade de grãos pode levar à uma menor produtividade de proteína.

Finalmente é importante considerar, que embora os testes de germinação e vigor de sementes tenham apontado efeito da densidade de semeadura para a qualidade fisiológica, este efeito foi de baixa magnitude e geralmente ocorreu nas extremidades da faixa de densidade testada. Portanto, uma eventual redução na densidade para valores entre 40 e 60% do recomendado para as cultivares BRS 1010

I PRO e NS 5959 I PRO, não devem ocasionar grandes impactos na qualidade fisiológica das sementes produzidas.

Este resultado é bastante importante do ponto de vista prático, tendo em vista que muitas pesquisas, no Brasil e no exterior, têm sugerido que se reduza a densidade de semeadura com base na plasticidade fenotípica da soja, fazendo com que haja redução dos custos de produção sem alteração da produtividade