

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE, UNICENTRO – PR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA – PPGA
MESTRADO

DENSIDADE DE PLANTAS DE SOJA E NÍVEL DE FERTILIZAÇÃO EM
ZONAS COM DIFERENTES POTENCIAIS PRODUTIVOS.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

FELIPE MILLA

GUARAPUAVA-PR

2022

FELIPE MILLA

**DENSIDADE DE PLANTAS DE SOJA E NÍVEL DE FERTILIZAÇÃO EM
ZONAS COM DIFERENTES POTENCIAIS PRODUTIVOS**

Dissertação apresentada à
Universidade Estadual do Centro-Oeste,
junto do Programa de Pós-Graduação em
Agronomia - Mestrado, área de
concentração em Produção Vegetal.

Prof. Dr. Leandro Rampim
Orientador

Prof. Dr. Cristiano Andre Pott
Coorientador

GUARAPUAVA-PR

2022

Catálogo na Publicação
Rede de Bibliotecas da Unicentro

L732d Milla, Felipe
Densidade de plantas de soja e nível de fertilização em zonas com diferentes potenciais produtivos / Felipe Milla. -- Guarapuava, 2022.
viii, 66 f. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Área de Concentração: Produção Vegetal, 2022.

Orientador: Leandro Rampim
Coorientador: Cristiano Andre Pott
Banca examinadora: Marcelo Marques Lopes Müller, Jean Sérgio Rosset

Bibliografia

1. Taxa variável de semeadura. 2. Investimento em fertilização. 3. Potencial produtivo. 4. Agricultura de precisão. I. Título. II. Programa de Pós-Graduação em Agronomia.

CDD 630

Felipe Milla

**DENSIDADE DE PLANTAS DE SOJA E NÍVEL DE FERTILIZAÇÃO EM ZONAS COM
DIFERENTES POTENCIAIS PRODUTIVOS**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Mestre.

Aprovada em 23 de fevereiro de 2022.



Prof. Dr. Leandro Rampim
(UNICENTRO)



Prof. Dr. Marcelo Marques Lopes Muller
(UNICENTRO)



Prof. Dr. Jean Sérgio Rosset
(UEMS)

GUARAPUAVA-PR
2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Andreas e Elisandra Milla, que sempre me incentivaram nos estudos e no trabalho, pelo apoio em todos os momentos, e em especial ao meu pai que também disponibilizou uma área de sua fazenda assim como todo o equipamento e mão de obra necessários para a execução dos experimentos.

À equipe da Fazenda Juquiá, que sempre me auxiliou com vontade e proatividade na implantação do experimento e nas avaliações. Também ao engenheiro agrônomo Rodrigo Martins Ferreira, responsável técnico pela fazenda e pelas recomendações de produtos fitossanitários na área experimental.

À Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária (FAPA) e toda sua equipe, pelo grande auxílio na colheita e nas avaliações pós-colheita, disponibilizando mão de obra e equipamentos, e também aos pesquisadores da FAPA por terem auxiliado nos aspectos técnicos da pesquisa, Eduardo Pagliosa, Juliano Luiz de Almeida, Noemir Antoniazzi, Rodrigo Ferreira, Sandra Fontoura e Vitor Spader.

À equipe da empresa Aquilino Agricultura de Precisão por terem realizado as amostragens de solo, em especial ao engenheiro agrônomo Leandro Taubinger pela elaboração dos mapas e das análises de agricultura de precisão.

Aos meus colegas integrantes do Núcleo de Mecanização e Agricultura de Precisão Unicentro (NMAP) que me auxiliaram na execução do experimento e nas análises, dentre eles os acadêmicos do Programa de Pós-Graduação em Agronomia da UNICENTRO (PPGA-UNICENTRO) Perivaldo Matheus Conrado, Aline Czekalski Conrado, Vitor Hugo Outeiro, Jhonatan Spliethoff e Caio Kolling, e também os acadêmicos do curso de graduação em Engenharia Agrônômica da UNICENTRO João Mittelstedt, Kelli Kolecha, Guilherme Antonio Mikos, André Luiz Maziero, Carlos D. Wendler e Amanda Pacheco.

Ao meu orientador Prof. Dr. Leandro Rampim, ao meu coorientador Prof. Dr. Cristiano André Pott por todo o apoio tanto acadêmico quanto técnico, disponibilização de equipamentos e laboratório. Ao Prof. Dr. Marcelo Marques Lopes Müller e à equipe do laboratório de fertilidade do solo da UNICENTRO pelas análises químicas.

À minha namorada Pamela Estyse Campos Bini que sempre está ao meu lado, agradeço a parceria, apoio, carinho, amor e também expertise em escrita acadêmica.

À Dra. Isabel Homczinski pela consultoria nas análises estatísticas.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	1
LISTA DE TABELAS	4
RESUMO	5
ABSTRACT	7
1 INTRODUÇÃO.....	9
2 OBJETIVOS.....	11
2.1 Objetivo geral	11
2.2 Objetivos específicos.....	11
3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	12
3.1 Agricultura de precisão.....	12
3.2 Zonas de manejo.....	13
3.3 Indicadores físicos e químicos da qualidade do solo.....	16
3.4 Taxa variável de semeadura	18
3.5 Taxa variável de fertilização.....	19
3.6 Cultura da soja.....	21
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	23
4.1 Local	23
4.2 Materiais	26
4.3 Implantação	28
4.4 Avaliações	29
4.4.1 Análise química do solo e granulometria	29
4.4.2 Qualidade física do solo	29
4.4.3 Avaliações na cultura da soja	30
4.5 Análise Estatísticas	31
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
5.1 Condições climáticas do ano	33

5.1.1 Precipitação	33
5.1.2 Temperatura.....	35
5.1.3 Radiação Solar.....	35
5.2 Atributos físicos e químicos do solo nas zonas de manejo.....	37
5.2.1 Infiltração da água no solo	37
5.2.2 Porosidade e densidade do solo	38
5.2.3 Resistência à penetração	40
5.2.4 Análise química e granulométrica do solo	42
5.3 Comparação entre os tratamentos na soja.....	44
5.3.1 Plantabilidade	44
5.3.2 Componentes produtivos	47
5.3.3 Características Morfológicas	54
7 CONCLUSÕES	58
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Precipitação média acumulada em diferentes intervalos de tempo e média das temperaturas mínima, média e máxima para o período de agosto de 2015 a agosto de 2022, em fazenda localizada no município de Cantagalo – PR. A precipitação média diária é estimada pelo método de regressão local.....24
- Figura 2.** Alguns Mapas temáticos utilizados para definir o local da área experimental e das zonas de manejo. A área experimental é identificada pelos retângulos circunscritos em preto. Cada mapa acompanha uma legenda que relaciona as cores com as classes do referido atributo, os valores obtidos dentro das áreas experimentais de Zona Alta (ZA) e Zona Baixa (ZB) e a média do talhão para a produtividade de Triticale em 2014 (A), produtividade de Soja em 2017 (B), teor de matéria orgânica do solo em 2014 (C) e índice de produtividade normalizado (D).
.....25
- Figura 3.** Croqui do experimento para uma das zonas do experimento. A) Croqui teórico: Células em cinza escuro representam intervalos para manobra e as linhas grossas representam a posição aproximada dos rastros de pulverizador. B) Disposição das parcelas no campo. AI = Alto Investimento em Fertilização; MI = Médio investimento em Fertilização; P é o nível do tratamento população. Blocos dispostos em algarismos romanos.....27
- Figura 4.** Precipitação diária durante o período de produção da safra de soja 2020/2021 em Cantagalo-PR, comparando com os dias após a semeadura (DAS) da soja. As curvas demonstram a precipitação diária no período (ciano) e o histórico da precipitação média diária (cinza) suavizadas pelo método de regressão local.34
- Figura 5.** Temperatura máxima, média e mínima diária durante o período de produção da safra de soja 2020/2021 em Cantagalo-PR. As curvas demonstram as médias históricas da temperatura média diária suavizada pelo método de regressão local.....35
- Figura 6.** Saldo da radiação solar diária durante o período de produção da safra de soja 2020/2021 em Cantagalo-PR. As curvas demonstram as médias históricas do saldo de radiação solar diário suavizado pelo método de regressão local.36
- Figura 7.** Infiltração da água no solo nas duas ZM. As linhas tracejadas representam a lâmina de infiltração acumulada (LIA). As linhas sólidas representam a velocidade de infiltração em cada minuto (VI), e a área colorida é o intervalo de confiança (95%) da média de cada minuto.
.....37
- Figura 8.** Porosidade total (A), Densidade do solo (B), Microporosidade (C) e

Macroporosidade (D) do solo em três camadas de solo, as letras minúsculas na lateral direita comparam as médias de ZA e de ZB dentro da mesma camada, as letras maiúsculas pretas na lateral esquerda entre as barras comparam as médias das camadas (ZA+ZB) entre si das variáveis que não apresentaram interação, enquanto as maiúsculas coloridas comparam as camadas dentro de cada ZM. As barras de erro representam o intervalo de confiança ao nível de 95%. Os pontos pretos ilustram todas as observações.....40

Figura 9. A) Resistência à penetração ao longo do perfil do solo nas duas zonas de manejo. A área colorida indica o intervalo de confiança a 95% e quando seguidas por número indicam que se encontrou diferença significativa na profundidade indicada pelo número. As linhas sólidas localizam as médias da RP suavizadas pelo método de Regressão local. As linhas tracejadas indicam a média da umidade volumétrica do solo em três profundidades.....41

Figura 10. Relação entre a densidade de plantas esperada e a encontrada na soja. Os pontos pretos são as amostras que compõe o conjunto de dados. * coeficientes significativos a 5%. 45

Figura 11. A) Análise de plantabilidade, apresentando a proporção de plantas duplas, falhas e plantas em estande adequado (que não se enquadram como duplas nem falhas), e suas respectivas linhas e equações de regressão, B) Comparação da proporção de plantas em estande adequado entre os níveis de investimento em adubação em cada zona. Os pontos pretos são as amostras que compõe o conjunto de dados, o “x” representa a média. * coeficientes significativos a 5%.46

Figura 12. Relação quadrática entre a Produtividade de Grãos (linha superior) e a Margem Líquida da soja (linha inferior) com a Densidade de Plantas observada nas parcelas em cada zona de manejo, comparando os tratamentos de nível de investimento em adubação AI (B, E), MI (C, F) e a união dos dois NI (A, D). * significativos a 5%.....47

Figura 13. Relação entre a Margem Líquida da soja (eixo esquerdo) e a Produtividade de Grãos (eixo direito) com a Densidade de Plantas esperada em cada zona de manejo, comparando os tratamentos de nível de investimento em adubação AI (B), MI (C) e a união dos dois (A). ...49

Figura 14. Regressão múltipla da massa de mil grãos (MMG) em função da densidade observada e da produtividade de grãos em função da MMG. * coeficientes significativos a 5%.51

Figura 15. Regressão múltipla do número de vagens por planta (A) e por metro quadrado (B). O efeito de blocos foi significativo nessas regressões, pois isso há coeficientes que multiplicam as variáveis qualitativas denominadas pelo nome dos blocos. * coeficientes significativos a 5%.53

Figura 16. Número de vagens em função de variáveis correlatas: Altura de inserção de vagem (A), Número de entrenós (B) e Diâmetro de coleto (C). * Coeficientes significativos a 5%. .54

Figura 17. Probabilidade de ocorrência de acamamento em plantas de soja em função da densidade de plantas e da zona de manejo. Glm simples é o modelo linear generalizado que não utiliza as zonas como fonte de variação e glm completo adiciona esses parâmetros. RC é a razão de chance da ocorrência do evento acamamento em um tratamento em relação ao outro ou em relação a uma unidade a menos da variável independente contínua.57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Análise química para macronutrientes e outros atributos do solo.43

Tabela 2. Análise granulométrica do solo.43

RESUMO

A taxa variável de semeadura é uma ferramenta da agricultura de precisão com potencial de trazer benefícios econômicos para os produtores rurais, porém ainda carece de parâmetros para se recomendar taxas variadas de sementes de soja (*Glycine Max* (L.) Merr.) para diferentes zonas de manejo (ZM), definidas como subáreas da lavoura com características homogêneas e potenciais produtivos definidos. Com a cultura da soja em foco, o objetivo deste trabalho foi de avaliar o efeito da densidade de semeadura com nível de médio e alto investimento em fertilização em dois ambientes de diferente potencial produtivo. Foi realizado um experimento casualizado em esquema fatorial com parcelas subdivididas com 4 blocos, sendo realizado na zona de alto potencial produtivo (ZA) e na zona de baixo potencial (ZB). Nas parcelas foram dispostas 5 densidades de plantas (P1 a P5), sendo a densidade recomendada para a cultivar (30 pl m⁻²) mais dois tratamentos com 20 e 40% a mais e a menos. Nas subparcelas foram dois níveis de investimento (NI) em adubação potássica e fosfatada, denominados médio investimento (MI) e alto investimento (AI). As causas da variabilidade do potencial produtivo entre as duas ZM foram investigadas e as médias foram comparadas pelo teste t de Student. Foram realizadas análises de variância e de regressão, os tratamentos foram comparados pelo teste F e as médias pelo teste de Tukey. Não foi encontrada diferença significativa na infiltração de água no solo entre as zonas. ZB apresentou uma camada de solo com maior resistência a penetração (dos 0.13 aos 0.23 m), superando 4000 kPa. A avaliação de solo indeformado revelou que aos 0.15 m ZA há menor densidade do solo e maior macroporosidade, microporosidade e porosidade total que ZB. A análise química e granulométrica do solo demonstrou maiores teores de matéria orgânica e argila em ZA, porém menores teores de fósforo e potássio, indicando maior extração pelas culturas. A produtividade foi mais alta em ZA e não sofreu efeito de NI. O pico de rentabilidade em ZA e ZB foi atingido com, respectivamente, 15 e 27% a mais de plantas m⁻² que a densidade recomendada na região. Maior fertilização (AI) favoreceu a produtividade em ZB. ZB teve menor uniformidade na distribuição de plantas e massa de mil grãos que ZA. Os parâmetros morfológicos das plantas em ZA variaram em função da densidade mais evidentemente que em ZB. Com o aumento da densidade aumentou a altura de inserção de vagem e diminuiu o número de entrenós, número de vagens por planta e diâmetro de coleto. Concluiu-se que as causas da variabilidade no potencial produtivo entre as ZM foram relacionadas à qualidade física do solo na camada de solo próxima aos 0.15 m. O aumento em 10% na densidade de plantas em área de baixo

potencial produtivo em relação à de alto pode trazer benefício econômico. O acamamento foi mais frequente em densidades mais altas e em área de maior potencial produtivo.

Palavras-chave: taxa variável de semeadura, investimento em fertilização, potencial produtivo, agricultura de precisão.

ABSTRACT

Variable rate seeding is a precision farming tool with the potential to bring economic benefits to growers, but this technique still lacks parameters to recommend varied rates of soybean seeds (*Glycine Max* (L.) Merr.) for different management zones (ZM), defined as subareas within crop fields with homogeneous characteristics and well-defined yield potentials. Focusing on the soybean crop, the objective of this work was to evaluate the effect of sowing density with medium and high fertilization investment level in two yield environments. A randomized trial was conducted in a factorial scheme with subdivided plots repeated for 4 blocks, which were carried out in a high yielding zone (ZA) and a low yielding zone (ZB). Five plant densities treatments (P1 to P5) were arranged in the plots, one by the soybean sort recommended density (30 pl m⁻²) and four treatments with 20 and 40% more and less plants per area. Two levels of investment (NI) in potassium and phosphate fertilization were set up by the subplots, named medium investment (MI) and high investment (AI). The edaphic causes of the yield potential variability between the two ZM were investigated, and the means were compared by the Student's t-test. The data was run through variance and regression analyses, treatments were compared by the F test and the means by the Tukey test. No significant difference was found in soil water infiltration between ZM. ZB presented a soil layer with higher penetration resistance (from 0.13 to 0.23 m), exceeding 4000 kPa. The undeformed soil samples evaluation revealed there is in ZA lower soil density and higher macroporosity, microporosity and total porosity at 0.15 m compared to ZB. The chemical and granulometric analysis of the soil showed higher levels of soil organic matter and loam in ZA, but lower phosphorus and potassium contents, indicating higher extraction by the crops. Yield was higher in ZA and was not affected by NI. The peak profitability in ZA and ZB was reached with, respectively, 15 and 27% more plants m⁻² than the regional recommended plant density. Higher fertilization (AI) favored yield only in ZB. ZB had lower uniformity in plant distribution and mass of thousand grains than ZA. According to plant density changes, the plant morphological parameters in ZA varied more evidently than in ZB. With the increase in density, the pod insertion height increased, but the nodes count, pods per plant count and stem diameter decreased. It was concluded that the causes of yield potential variability among the ZM were related to the soil physical quality at the soil layer close to 0.15 m. In a low yield environment, increasing the plant density by 10% more than a high yield environment can bring economic benefit. Lodging was more frequent at higher plant densities and in high yield environment.

Keywords: Variable rate seeding, fertilization investment level, yield environment, precision farming.

1 INTRODUÇÃO

Os anseios pelo aumento da rentabilidade das lavouras fomentam tentativas de otimização dos sistemas de produção agrícola, levando à adoção da agricultura de precisão. Essa é conceituada como um sistema de gerenciamento agrícola baseado na variação espacial e temporal da unidade produtiva com potencial de trazer aumento de retorno econômico e minimização de impactos no ambiente (BERNARDI et al., 2014). Para identificar e delinear a variabilidade espacial dos campos de produção agrícola é utilizada a metodologia de zonas de manejo (ZM), conceituadas como subáreas do campo com características semelhantes, principalmente quanto aos fatores que impactam a produtividade. Espera-se que as plantas se desenvolvam de maneira relativamente uniforme dentro de uma ZM, apresentando produtividade e exportação de nutrientes homogêneas (MARTINS et al., 2020; NAWAR et al., 2017).

As diferenças de produtividade da cultura entre as zonas de manejo podem ser explicadas pelos atributos físicos e químicos do solo que afetam a dinâmica da água no solo e o fornecimento de nutrientes à planta (FLORES; FILIPPINI ALBA, 2014). Considerando os diversos aspectos que influenciam o crescimento das plantas, uma metodologia de delimitação de ZM que define mapas com maior estabilidade temporal e resultados mais consistentes quanto à variabilidade do terreno é o uso de mapas normalizados integrando atributos do solo, mapas de colheita, atributos do relevo e sensoriamento remoto (MIAO; MULLA; ROBERT, 2018).

O uso de ZM para prescrever e aplicar diferentes taxas de deposição de insumos pode levar à maior eficiência de uso deles, maximizando a rentabilidade, pois a aplicação de insumos à taxa variada permite adequar a quantidade de insumos aplicados a um valor mais próximo da exigência da lavoura, em vez de utilizar uma dose média, que pode ser mais alta ou mais baixa que a unidade de manejo demanda (MACHADO et al., 2015; NAWAR et al., 2017; RAMPIM et al., 2012). Levando em conta a variabilidade dos solos entre as zonas de manejo, considera-se variar as taxas de deposição de sementes e fertilizantes na implantação de uma cultura, na expectativa de maior produtividade ou economia desses insumos.

A taxa variável de fertilizantes consiste na variação das doses em função da condição e fertilidade em cada local dentro da lavoura, porém os modelos utilizados para sua recomendação precisam ser aprimorados para que haja prescrições mais assertivas com base nos vários fatores que compõem a necessidade do solo e da cultura por nutrientes (RESENDE, 2011). É importante salientar que as culturas respondem de maneira diferente ao aporte de

insumos dependendo das condições da ZM, portanto é necessário que se pesquise a relação de zonas de manejo com diferentes níveis de investimentos em fertilização e outras práticas de manejo, como a densidade de semeadura.

O ajuste da taxa de semeadura para densidades ótimas, que podem ser diferentes entre as zonas de manejo, proporciona ganhos econômicos ao aumentar a produtividade da cultura e/ou reduzir custos com sementes (CORASSA et al., 2018; HAMMAN, 2019). Vários trabalhos já buscaram a densidade de plantas agronomicamente ótima (DPAO) em ambientes de diferentes potenciais produtivos para a cultura da soja (*Glycine max* L.) (CARCIOCHI et al., 2019; CORASSA et al., 2018; HAMMAN, 2019; MATCHAM et al., 2020) e do milho (*Zea Mays* L.) (LICHT; LENSSEN; ELMORE, 2017). Ao adicionar aspectos econômicos à pesquisa, como o custo da semente e o valor do produto, encontra-se a densidade de plantas economicamente ótima (DPEO) (LINDSEY; THOMISON; NAFZIGER, 2018). Todavia, trabalhos para a validação da taxa variável de semeadura ainda são necessários no Brasil para outras culturas (DE RESENDE et al., 2014).

A hipótese do trabalho é que existe um efeito da densidade de plantas e da quantidade de fertilizantes aplicados definindo o desempenho produtivo e econômico da soja em ambientes com diferentes potenciais produtivos, em que há a uma dose ideal de sementes e fertilizantes a ser manejada em cada situação. Devido a carência de trabalhos científicos para avaliar o potencial da taxa variável de semeadura associada a diferentes níveis de fertilização para a cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merr), há elevado interesse e importância econômica em encontrar maneiras mais assertivas de se prescrever densidades de semeadura e níveis de fertilização a taxa variável para zonas de manejo de diferentes potenciais produtivos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho foi avaliar, na cultura da soja, o efeito da densidade de semeadura com nível de médio e alto de investimento em fertilização em dois ambientes de diferente potencial produtivo.

2.2 Objetivos específicos

Identificar as causas da variabilidade de produção entre as duas zonas de manejo selecionadas, considerando atributos físicos e químicos do solo.

Encontrar a densidade de plantas agronomicamente ótima (DPAO) e a densidade de plantas economicamente ótima (DPEO) na cultura da soja, para o nível de investimento em fertilização que traz o melhor retorno econômico.

Avaliar a relação entre a densidade, o nível de investimento em fertilização e o potencial produtivo das zonas com componentes produtivos e parâmetros morfológicos da soja.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Agricultura de precisão

A Agricultura de Precisão (AP) é um sistema de produção agrícola que considera a variabilidade espacial e temporal da lavoura, baseando-se em uma grande quantidade de informações para prescrever manejos localizados. A ideia básica é a aplicação do tratamento correto em local e tempo certos (GEBBERS; ADAMCHUK, 2010). Associando os sistemas de informações geográficas e posicionamento global por satélite às tecnologias atuais para obtenção de dados da lavoura, é possível mensurar a variabilidade das condições do solo e das culturas.

Os campos de produção agrícola geralmente possuem variabilidade natural quanto a seus atributos do solo e atributos topográficos que influenciam o comportamento das plantas (BERNARDI et al., 2014). A variabilidade do solo pode aumentar com o tempo devido a condições climáticas e manejo. A falta de nutrientes, estresse hídrico, doenças de plantas e pragas modificam os padrões espaciais de variabilidade do solo em um curto período de tempo (JEFFRIES et al., 2020). As propriedades do solo que apresentam variabilidade espacial que mais impactam na produtividade são: umidade, textura, conteúdo de matéria orgânica, disponibilidade de nutrientes, pH e densidade do solo (DE RESENDE et al., 2014).

Existem seis componentes da variabilidade nas lavouras que afetam a produção de um cultivo nas diferentes partes dos talhões: distribuição histórica e atual da produtividade; aspectos topográficos, como altitude, declive, sentido de escoamento da água, aspectos da paisagem, terraços, proximidade à bordadura e a rios e lagos; atributos edáficos, ou seja, propriedades químicas (pH, composição das cargas, carbono orgânico), nível de nutrientes e outros elementos, propriedades físicas e profundidade; aspectos da cultura, caracterizado pela altura da planta, estresse nutricional ou hídrico e parâmetros fisiológicos e morfológicos do vegetal; fatores anômalos, que são as infestações de plantas daninhas e pragas, doenças de plantas, nematoides, geadas e granizo; e por último a variabilidade relacionada ao manejo, que diz respeito a taxa de semeadura, fertilizantes, defensivos agrícolas, rotação de culturas, manejo físico do solo e técnicas conservacionistas (FLORES; FILIPPINI ALBA, 2014; RAMPIM et al., 2012).

O sistema convencional de produção agrícola gerencia a lavoura baseado em

valores médios para toda a área, que na maioria dos casos possui heterogeneidade significativa em seus atributos. Ao considerar essas diferenças que ocorrem em escalas menores do que o talhão inteiro, pode-se avaliar separadamente as áreas com diferentes propriedades e aplicar os insumos de acordo com a real necessidade, ou pelo menos o mais próximo disso que se pode chegar. Quanto maior a diferença entre as partes da lavoura, maior é o potencial de ganho econômico em utilizar as técnicas de agricultura de precisão (BERNARDI et al., 2014). Ou seja, a utilização de tecnologias de AP auxiliam produtores em conseguirem maiores produtividades, menores custos ao evitar desperdícios, e até diminuam a variabilidade dos solos ao longo do tempo, elevando o patamar de produtividade da lavoura (JEFFRIES et al., 2020).

As principais aplicações da AP nas lavouras de grãos estão relacionadas ao manejo fitossanitário, aplicação de corretivos, fertilizantes e sementes em taxa variável (DE RESENDE et al., 2014). Também há aplicações da AP na gestão e conservação do solo, controle de erosão e manejo físico (POTT et al., 2019) e definição de unidades de manejo diferenciado em subáreas dentro da lavoura (RAMPIM et al., 2012).

3.2 Zonas de manejo

Zonas de manejo (ZM) são subdivisões do campo com características semelhantes, que podem ser usadas para práticas de manejo em taxa variada (MARTINS et al., 2020). Busca-se delimitar parcelas da área que tenham potencial de produção e eficiência no uso de insumos homogêneos (FLORES; FILIPPINI ALBA, 2014), na expectativa que a combinação dos fatores limitantes de produtividade e de qualidade se mostrem uniformes (RODRIGUES JUNIOR et al., 2011). Dessa maneira, as ZM podem ser sujeitas às mesmas práticas agronômicas, adequando o manejo de cada subárea separadamente na busca de melhor eficiência técnica e/ou econômica (MIQUELONI; GIANELLO; BUENO, 2015), assim agregando rentabilidade, diminuindo custos e impactos ambientais em comparação com a agricultura convencional (MARTINS et al., 2020).

Inicialmente a AP era feita baseada na amostragem de solo em malha para a aplicação de fertilizantes (LUCHIARI JUNIOR et al., 2011). Entretanto, essa maneira de aplicação gera quantidade elevada de amostras para conseguir avaliar seguramente a variabilidade dos solos, e conseqüentemente eleva os custos anuais (MIAO; MULLA;

ROBERT, 2018; RODRIGUES JUNIOR et al., 2011; SPLIETHOFF et al., 2018). Neste contexto, encontra-se a estratégia de ZM, que têm potencial de ser utilizada não somente para a fertilização e calagem, mas a outras técnicas de AP, como práticas de manejo físico (MIQUELONI; GIANELLO; BUENO, 2015; POTT et al., 2019), semeadura a taxa variável (CORASSA et al., 2018) e irrigação (MIAO; MULLA; ROBERT, 2018), se tornando uma potente ferramenta para tomadas de decisões na lavoura com maior assertividade e alta relação custo benefício (MARTINS et al., 2020).

Antes do delineamento de ZM é necessária a obtenção de dados geoespaciais que possam ter relação com a variabilidade da área. Nesse sentido, há três abordagens quanto aos dados que podem ser utilizados nesse processo. Uma é baseada em informações da paisagem e do solo, incluindo a topografia e mapas temáticos de solo e seus atributos adquiridos por amostragem (análises de solo em grade) ou correlação com sensoriamento remoto ou proximal (DE RESENDE et al., 2014; LUCHIARI JUNIOR et al., 2011; MIAO; MULLA; ROBERT, 2018). Nesse contexto, a condutividade elétrica do solo também é uma abordagem válida para identificar a variabilidade nos solos (PEREZ et al., 2014; SPLIETHOFF et al., 2018).

Outra abordagem se baseia em aspectos dos cultivos, principalmente mapas de colheita (NAWAR et al., 2017). Também pode-se utilizar índices de vegetações obtidos com imagens aéreas multiespectrais para detectar padrões de variabilidade ou como base para estimativas de potencial produtivo (DAMIAN et al., 2020; GEORGI et al., 2018; JEFFRIES et al., 2020). Molin (2000) afirmou que o mapa de umidade gerado por colhedoras também pode indicar potenciais fontes de variabilidade espacial.

Quanto à terceira abordagem, estudos vem demonstrando que a integração de aspectos da paisagem e do cultivo conferem maior segurança para a definição de ZM e prescrição de medidas localizadas (MARTINS et al., 2020; MIAO; MULLA; ROBERT, 2018). A integração de múltiplas variáveis abrangendo maior período de tempo promove um delineamento mais seguro e estável das ZM (MARTINS et al., 2020). A utilização de conhecimentos agrônômicos da propriedade, como histórico de produtividade, fertilizações, calagem, gessagem, topografia, aspectos locais como terraços, estradas antigas e afloramentos rochosos são importantes para auxiliar na delimitação das unidades de manejo e para caracterizar suas limitações (RAMPIM et al., 2012; SPLIETHOFF et al., 2018).

Com a base de dados preparada, é necessário utilizar ferramentas de geoestatística

para avaliar a variabilidade espacial da área. Existem várias metodologias de delineamento de zonas de manejo usando geoestatística. Em uma metodologia mais completa, inicialmente é feita uma análise multivariada entre os componentes da base de dados, calculando-se a correlação entre os grupos. Técnicas avançadas como a análise de componentes principais e análise de fatores podem indicar quais são as fontes de dados que melhor explicam a variabilidade da área. Posteriormente, os mapas mais adequados são escolhidos e podem ser normalizadas, através de uma álgebra de mapas utilizando médias simples ou ponderadas, considerando pesos maiores para atributos que teoricamente melhor definem o potencial produtivo. Com ou sem normalização, é necessário desenhar limites que dividem as subáreas, e este processo pode ser realizado manualmente, utilizando as informações observadas da área de modo que a divisão de ZM faça sentido e facilitem o manejo, ou por algoritmos de classificação não-supervisionada (*clustering*) como *k-means* ou *Fuzzy c-means*, ou até modelos matemáticos mais complexos como redes neurais ou *random forest*, e por último é possível reamostrar o mapa classificado com funções de suavização para se obter os limites definitivos das ZM (ALBA, 2014; MARTINS et al., 2020; NAWAR et al., 2017).

Um dos atributos de maior peso para o delineamento de ZM são os mapas de produtividade (JEFFRIES et al., 2020; MARTINS et al., 2020), gerados por colhedoras automatizadas portadoras de sensores de colheita e um sistema de posicionamento via satélite (SANTI et al., 2013). Mapas de produtividade expressam a interação e atuação conjunta dos fatores de produção, que pode ser influenciado por características intrínsecas do solo ou fenômenos isolados àquele ciclo de cultivo (DE RESENDE et al., 2014). Para diminuir o efeito de fenômenos anuais que não se repetem, é importante alimentar a análise geoestatística com mais de um mapa de colheita dos últimos anos, a fim de considerar a variabilidade temporal e isolar padrões recorrentes (LUCHIARI JUNIOR et al., 2011; MOLIN, 2002; SANTI et al., 2013).

A produtividade das culturas tem correlação com respostas espectrais, tais como imagens processadas pelo índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI), que pode ser utilizadas complementarmente a atributos do solo e produtividade para a delimitação de ZM, aumentando o histórico de dados para a busca de padrões de variabilidade (MARTINS et al., 2020).

Uma vez que as ZM são delimitadas pelo padrão de variabilidade espacial e temporal, classifica-se quanto aos níveis de potencial produtivo das zonas ou a outros

fatores limitantes utilizando álgebra de mapas (GEORGI et al., 2018). Torna-se interessante realizar um estudo de caso das ZM delineadas para avaliar quais são os fatores limitantes para a produtividade, considerando o relevo, o histórico da área e os atributos químicos e físicos do solo (LUCHIARI JUNIOR et al., 2011). Com tudo em mãos, deve-se estudar como variar as taxas de fertilizante e de semeadura entre as zonas, para alcançar a melhor rentabilidade, o que varia de acordo com a cultura, região e propriedades da ZM.

3.3 Indicadores físicos e químicos da qualidade do solo

Segundo Flores & Filippini Alba (2014), os atributos de solo que mais influenciam o potencial produtivo das culturas estão relacionados à dinâmica de fluidos (água e ar) no solo e fornecimento de nutrientes. Atributos físicos e químicos do solo se combinam para definir as características de qualidade do solo que afetam o desenvolvimento das plantas. Das propriedades e características físicas pode-se citar a textura, profundidade, estrutura, porosidade, grau de compactação, densidade aparente, agregação e sua estabilidade. A fertilidade química do solo pode ser caracterizada pelo pH, capacidade de troca de cátions e ânions, teor de matéria orgânica, teor e disponibilidade dos nutrientes de plantas (N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Zn, Cu e B), e concentração de elementos tóxicos (Al, As, Pb e Cd) ou nutrientes em concentrações tóxicas ou em desequilíbrio.

Os atributos químicos do solo podem ser mensurados através da amostragem de solo e análise química quantitativa. A mesma amostra de solo pode ser utilizada para análise granulométrica do solo, que resulta nos teores de argila, silte e areia. A coleta de amostras em agricultura de precisão, para que represente corretamente a variabilidade espacial da área, deve ocorrer de maneira programada, deve seguir número mínimo de amostras simples para, ao misturar, obter-se uma amostra composta que retrate a unidade amostral, seja um ponto da grade de coleta ou uma unidade de manejo (RAMPIM et al., 2012).

A qualidade física do solo está relacionada ao desenvolvimento das raízes das plantas, que é favorecido por capacidade de armazenamento de ar e água adequada junto com resistência apropriada, que permita a penetração das raízes mas resista à compactação (REYNOLDS et al., 2002). Parâmetros para a definição da qualidade física do solo são a

porosidade e a densidade aparente, que podem ser obtidos pela coleta de amostras de solo com estrutura indeformada utilizando um anel de aço de bordas cortantes, e processamento dessas amostras por dessorção em mesa de tensão (REYNOLDS et al., 2002).

Com amostras indeformadas de solo é possível determinar a densidade aparente do solo ao dividir a massa de solo seco pelo volume do anel, o teor de água com base em massa e volume de solo (umidade gravimétrica e volumétrica, respectivamente), ao comparar a massa de solo no momento da coleta e após a secagem, e a porosidade total do solo (PT, volume total do espaço poroso), determinado ao relacionar a densidade aparente com a densidade de partículas. Ao usar essas amostras em uma mesa de tensão é possível determinar vários conteúdos de umidade de uma amostra de solo previamente saturada pelo método de deficiência de pressão, que no presente estudo os mais importantes são: Macroporosidade, definida pelo volume de poros com diâmetro igual ou superior a 300 μm e responsável pela maior parte da capacidade de aeração do solo e pelo escoamento da água; Microporosidade, volume de poros com diâmetro inferior a 300 μm , fração do solo com capacidade de retenção de água (REYNOLDS et al., 2002). A macroporosidade é um bom parâmetro da qualidade física do solo, e para o melhor desenvolvimento de raízes é exigido pelo menos de 10 a 13 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ de macroporosidade (BARETA JUNIOR et al., 2022) em solos subtropicais ácidos.

O processo de travessia da água pela superfície do solo é denominado infiltração. Em um evento de precipitação, a capacidade do solo infiltrar água decresce com o tempo até se estabilizar a uma taxa chamada de velocidade de infiltração básica (VIB) (DA SILVA et al., 2017). A taxa de infiltração tem relação com processos erosivos, com a lixiviação de nutrientes e com a dinâmica da água no solo, e essa grandeza pode ser influenciada pela textura, estrutura, compactação do solo e relevo. Em declividades maiores, há menor infiltração de água e, portanto, maior escoamento superficial, que é agravado pela maior energia cinética da água no declive, havendo maior potencial erosivo. Isso faz com que solos em terrenos declivosos sejam mais rasos e secos que os situados em menores declividades (FLORES; FILIPPINI ALBA, 2014). Problemas de infiltração em algumas áreas podem ter relação causal com menor emergência de plântulas (MIQUELONI; GIANELLO; BUENO, 2015), perda de nutrientes por escoamento superficial e menor potencial produtivo (SANTI et al., 2013). A mensura da infiltração é importante para observar alterações na infiltração e disponibilidade de água

no solo devido a diferentes práticas de manejo, assim como explicar diferenças entre subáreas da lavoura (DA SILVA et al., 2017).

A medição da infiltração do solo pode ser feita utilizando o método do infiltrômetro de carga constante com anéis concêntricos, constituído de um anel externo e um interno, que são inseridos no solo a uma profundidade de aproximadamente 18 cm, e é aplicada uma lâmina d'água no centro, utilizando um reservatório graduado, aberto apenas na extremidade inferior que fica submersa na lâmina de infiltração, permitindo um nível de água sempre constante sobre o solo. Esse método apresenta boa precisão para a determinação da infiltração de água no solo, além de praticidade e simplicidade de execução (DA SILVA et al., 2017; NEPAR-SBCS, 2019).

A avaliação da resistência à penetração é uma técnica muito usada para o diagnóstico de compactação do solo, pois mede a pressão necessária para penetrar uma haste cônica ao longo do perfil do solo (MOLIN; DIAS; CARBONERA, 2012). A melhor maneira de realizar essa medida a campo é utilizando um penetrômetro digital acionado mecanicamente, de modo que a velocidade de penetração da haste é constante ao longo do perfil, o que garante dados mais confiáveis (MOLIN; DIAS; CARBONERA, 2012).

A resistência à penetração é dependente da umidade do solo, pois partículas de solo com conteúdo bom de umidade, próximo à capacidade de campo, têm mais facilidade em serem deformadas pela ponta cônica do que quando a umidade é baixa e agregados rígidos são formados. Para que se use a resistência à penetração como comparativo sem erros proporcionados por diferenças na umidade, é recomendado que se faça a avaliação em solo com teor de água próximo à capacidade de campo, ou seja, em capacidade total das reservas de água do solo, mas sem encharcamento. O nível crítico de resistência do solo à penetração a partir do qual as raízes encontram dificuldade significativa para se desenvolverem é variável em função da cultura e de características do solo como a textura. Em solos muito argilosos é sugerido um nível crítico de 5200 kPa (OLIVEIRA et al., 2016).

3.4 Taxa variável de semeadura

A taxa variável de semeadura é uma prática da agricultura de precisão em que se varia a densidade de semeadura de determinada cultura de acordo com a variabilidade do campo. Para que isso seja possível, é necessário o uso de um sistema de navegação global

via satélite no trator e uma semeadora que disponha de um mecanismo atuador que varie as doses de semeadura comandada por um mapa digital com a dose de prescrição (HAMMAN, 2019).

Dividindo-se a área em ZM de diferentes potenciais produtivos, espera-se que cultura desempenhe o pico de produtividade a uma densidade de plantas agronomicamente ótima (DPAO), que deve ser específica para cada zona. Além das variações provocadas pelas características da cultivar, a DPAO é influenciada por atributos do solo, características topográficas e suas interações com as condições do ciclo produtivo, que pode variar anualmente (LICHT; LENSSEN; ELMORE, 2017). Existe a hipótese que subáreas no campo podem apresentar diferenças na germinação e sobrevivência de plântulas entre si devido a condições adversas ao desenvolvimento inicial da cultura, o que pode implicar na necessidade de ajustar as densidades de semeadura para atingir a DPAO considerando também quebra técnica diferenciada (CORASSA et al., 2018). Ao levar em consideração a germinação de sementes e fatores econômicos, como o custo da semente e o ganho econômico proveniente do aumento da produtividade, define-se uma densidade de plantas economicamente ótima (DPEO), que geralmente é menor que a DPAO (LINDSEY; THOMISON; NAFZIGER, 2018).

Ainda não se tem bem definido que taxa de semeadura e que densidades de plantas podem ser seguramente recomendadas em diferentes ZM, sendo assim, há carência de pesquisas que desenvolvam curvas de resposta à taxa de semeadura para ZM delimitadas utilizando parâmetros diversos (LICHT; LENSSEN; ELMORE, 2017). O histórico produtivo das áreas é um bom fator de ajuste para definir as ZM para a semeadura a taxa variável, uma vez que expressa o conjunto de fatores relacionados com a produtividade (GASPAR et al., 2020; HAMMAN, 2019). Uhry et al. (2013) concluíram que as características do relevo têm grande influência na DPAO, sendo importantes na delimitação da zona pela sua imutabilidade. Para efetivar o ganho econômico com a taxa variável de semeadura, deve-se levar em consideração também a taxa de fertilizantes, variando de acordo com a necessidade da cultura e os requerimentos do solo (RESENDE, 2011).

3.5 Taxa variável de fertilização

A taxa variável de fertilizantes consiste na variação de doses de acordo com a

condição de fertilidade em cada local dentro da lavoura, que pode ser mais próximo a real necessidade do solo e da cultura, trazendo possível aumento na eficiência de uso desses insumos, promovendo ganho econômico pelo aumento da produtividade e economia de insumos (DE RESENDE et al., 2014; NAWAR et al., 2017).

A fertilidade do solo, nutrição e adubação são fatores que constroem a produtividade das culturas agrícolas (VON PINHO et al., 2009). Segundo Von Pinho et al. (2009), existe relação entre as densidades de plantas e a necessidade de nutrientes, e que havendo expectativa de maiores produtividades de grãos necessitará maior aporte de nutrientes. A adubação deve ser compatível com os requerimentos da cultura, os quais variam em função das características da cultivar, principalmente o potencial produtivo, que por sua vez depende de propriedades do solo, clima e suprimento de água (DEFRA, 2010).

A maioria dos solos não têm capacidade de reter nitrogênio (N) suficiente para suprir as necessidades das culturas. A sua aplicação promove grande acréscimo de produtividade, porém seu excesso pode provocar problemas de acamamento e doenças foliares, além de menor eficiência da adubação, pois os íons de N são facilmente lixiviáveis. Sendo assim, deve-se buscar a dose economicamente ótima de N na prescrição da adubação nitrogenada, no ponto que o acréscimo de N eleve a produtividade à sua melhor resposta econômica (DEFRA, 2010).

Solos com altos teores de argila e matéria orgânica retêm altas quantidades de fósforo (P) e potássio (K), de forma que esse estoque de nutrientes fique disponível para as culturas ao longo dos anos. Consequentemente, o manejo desses nutrientes para alcançar a produtividade ótima é baseado na correção da fertilidade até os níveis críticos somado à manutenção dos teores do solo, repondo o que é exportado pelas culturas. Essa quantia pode ser calculada através da produtividade e da concentração média do nutriente no produto colhido. Para o uso mais efetivo desses insumos, deve-se considerar que diferentes partes do campo se diferenciam quanto aos teores ideais de P e K, podendo ser amostradas e tratadas separadamente (DEFRA, 2010).

Para soja, recomenda-se no Brasil a adubação potássica e fosfatada com base nos teores do solo para a correção até o nível crítico, e para a manutenção dos níveis de nutrientes recomenda-se uma dose adicional de Potássio com base na expectativa de produção e de Fósforo baseada em um valor fixo (BROCH; RANNO, 2008; DE OLIVEIRA, 2003). Na região Sul do Brasil não se recomenda a aplicação de nitrogênio

na soja, pois sua necessidade é suprida através da fixação biológica de N (BROCH; RANNO, 2008).

3.6 Cultura da soja

A Soja (*Glycine max* (L.) Merr.) é cultivada desde o início do século XI na China. Essa leguminosa era cultivada principalmente como planta forrageira, até que começou a ser utilizada pelos estadunidenses como fonte de óleo na década de 1920, também tendo importante papel como fonte de energia e proteína durante a Segunda Guerra Mundial (HAMMAN, 2019).

Atualmente, a soja é a planta oleaginosa mais importante economicamente em escala mundial. O Brasil se coloca em primeiro lugar no ranking de exportação de soja e segundo lugar na produção mundial de soja, perdendo somente para os EUA de acordo com o levantamento da FAO (2020). O cultivo de soja apresenta crescimento estável na última década no Brasil e no mundo, sem variações bruscas anuais na produtividade e área cultivada. Em 2018, o Brasil produziu 117.9 milhões de toneladas de soja em 34.7 milhões de hectares a uma produtividade média de 3390 kg ha⁻¹, enquanto foi produzido no mundo nesse mesmo ano 348.7 milhões de toneladas de soja em 124.9 milhões de hectares a uma produtividade média de 2791 kg ha⁻¹ (FAO, 2020).

As práticas de produção de soja vêm sendo continuamente melhoradas e refinadas, levando aos aumentos estáveis de produtividade (HAMMAN, 2019). A população de plantas é um fator que pode ser trabalhado dentro da lavoura a fim de reduzir problemas de acamamento e emergência (BUTZEN, 2016).

Na cultura da soja, geralmente utiliza-se populações menores em áreas com alto potencial produtivo para soja. Menores densidades tem efeito na supressão do acamamento e redução da pressão de mofo branco pela melhor ventilação do dossel. As plantas de soja modificam sua arquitetura em baixos estandes, diminuindo a altura de planta e espessando o caule, o que pode reduzir a incidência de acamamento, enquanto a maior emissão de ramificações laterais tem potencial de compensar estandes uniformemente reduzidos (BUTZEN, 2016).

Muitas vezes, áreas com baixo potencial produtivo também têm associadas a elas condições limitantes do estabelecimento inicial das plantas, germinação e emergência, e o aumento da taxa de semeadura pode ser uma medida mitigatória para garantir o

estabelecimento de estandes adequados e relativamente uniformes (CARCIOCHI et al., 2019; CORASSA et al., 2018). Condições que limitam a emergência são adversidades meteorológicas após plantio, infecções de doenças (tombamento), ataque de pragas e características do solo, como solos compactados, secos, encharcados, frios e excesso de palhada (BUTZEN, 2016). O aumento da densidade da sementeira de soja também causa aumento na altura da planta e altura da inserção das vagens, causando menos perda de colheita em pontos que a soja se desenvolve muito baixa por causa de condições adversas (GRISSO et al., 2011). Condições ambientais adversas também interferem na capacidade da soja de engalhamento e conseqüentemente compensação de estande (CARCIOCHI et al., 2019), da mesma forma que isso limita a quantidade de vagens e sementes por planta (CORASSA et al., 2018).

Ao comparar a DPAO encontrada em ambientes de diferentes potenciais produtivos, Carciochi et al. (2019) e Corassa et al. (2018) concluíram que a densidade de sementeira de soja pode ser reduzida de 18 a 24% em ambientes de bom potencial produtivo, em relação aos de baixo potencial, pois influenciam na redução de perdas relacionadas ao acamamento e a doenças, proporcionando ganho econômico pela redução do uso de sementes e manutenção do nível de produtividade.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Local

O experimento foi realizado na safra de verão de 2020/21. A implantação do experimento ocorreu em uma propriedade rural localizada no município de Cantagalo, região central do Paraná.

Foi selecionado um talhão de 22 ha que vem sendo cultivado em sistema plantio direto (SPD) há 25 anos, com rotação de culturas diversificada e subsolado em área total em 2018. O talhão se situa a 25°15'4.06" de latitude Sul, 52°5'15.29" de longitude Oeste e a 850m de altitude em média. A última aplicação de calcário na área ocorreu em 2017, com recomendação à taxa variada para alcance de 75% da saturação por bases, e orientada por amostragem em grade de 1 ha. As culturas desde a última calagem foram aveia preta de cobertura (2017), milho (2017/18), canola (2018), soja (2018/19), aveia preta de cobertura (2019), soja (2019/20) e aveia preta de cobertura (2020). Com exceção da correção do solo, os manejos sempre foram homogêneos. A média histórica da produtividade de soja da fazenda é de 3608 kg ha⁻¹, a safra de soja cultivada em 2019/20 produziu em média 3743 kg ha⁻¹.

Utilizando o registro desde 2016 de uma estação meteorológica automatizada na proximidade, encontrou-se uma média de precipitação pluviométrica anual de 1767 mm, e temperatura média anual de 19.2 °C. No mês de julho ocorrem as menores temperaturas e menores precipitações pluviométricas (Figura 1). Esses resultados indicam que a localidade se enquadra dentro da classificação climática de Koppen & Geiger como Cfa, definida por clima subtropical úmido com verão quente e sem estação seca definida, e os parâmetros de enquadramento são a temperatura média do mês mais frio menor que 18 °C (14.8 °C), temperatura média do mês mais quente superior a 22 °C (22.1 °C) e precipitação do mês mais seco superior a 30 mm (40.73 mm) (APARECIDO et al., 2016). Pelo trabalho dos autores, observa-se que o município se localiza em uma região de transição entre climas Cfa e Cfb.

As fontes de dados, após interpolação e padronização a uma mesma grade amostral, foram sujeitas à análise multivariada, e os mapas que apresentavam correlação forte entre si foram escolhidos para a definição das zonas de manejo. Foram selecionadas sete imagens NDVI, dois mapas de colheitas (soja e triticales), mapa de matéria orgânica, saturação de bases (com correlação negativa) e pH (também com correlação negativa) para formarem o mapa com índice de fertilidade do solo (*Soil Fertility Index*). As camadas com maior peso na elaboração desse mapa foram os mapas NDVI.

Através de álgebra de mapas, foi criado um mapa normalizado (Figura 2. D). Os limites das zonas de manejo foram determinados manualmente, sem a utilização de algoritmos de classificação não-supervisionada (*clustering*). Entre essas ZM, foram escolhidos dois polígonos de 100x60m para a elaboração do experimento (Figura 2 **Error! Reference source not found.**), considerando que fossem relativamente próximos entre si, mas em áreas estáveis para seu nível de produtividade, nomeados de Zona Alta (ZA) e Zona Baixa (ZB). ZA apresenta declividade média de 6.5%, enquanto em ZB a declividade alcança em média 9.1%, ambas são localizadas no terço inferior da vertente. Os mapas de colheita demonstraram diferença de produtividade de 208 kg ha⁻¹ de triticales (6% sobre a média), 615 kg ha⁻¹ de soja (15.6%) e 769 kg ha⁻¹ de milho (6.2%) entre ZA e ZB (Figura 2). A média de produtividade de soja desse talhão nos últimos 4 anos foi de 4.0 Mg ha⁻¹.

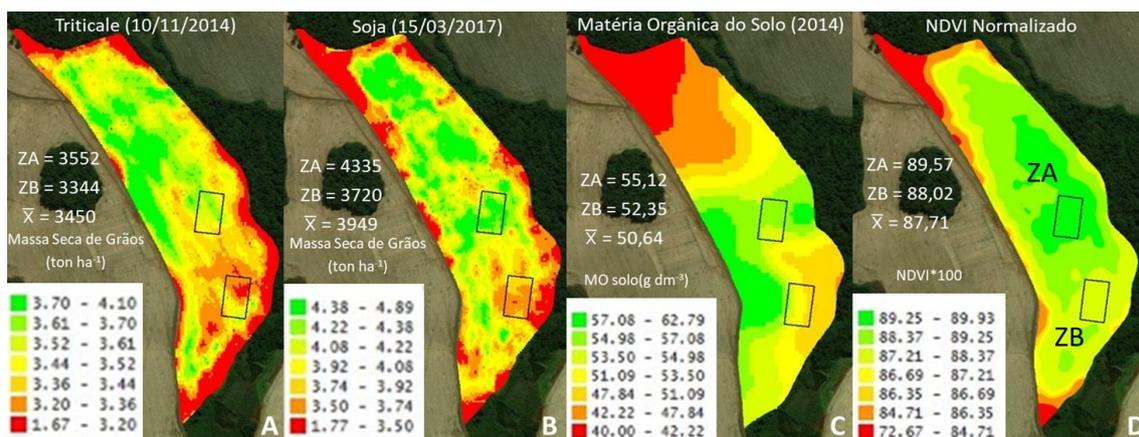


Figura 2. Alguns Mapas temáticos utilizados para definir o local da área experimental e das zonas de manejo. A área experimental é identificada pelos retângulos circunscritos em preto. Cada mapa acompanha uma legenda que relaciona as cores com as classes do referido atributo, os valores obtidos dentro das áreas experimentais de Zona Alta (ZA) e Zona Baixa (ZB) e a média do talhão para a produtividade de Triticale em 2014 (A),

produtividade de Soja em 2017 (B), teor de matéria orgânica do solo em 2014 (C) e índice de produtividade normalizado (D).

4.2 Materiais

O trabalho foi executado nas duas zonas de manejo, ZA e ZB. Cada ensaio, ou “zona” é considerada um experimento individual. Em cada zona foram estabelecidas 40 parcelas para 10 tratamentos em delineamento do tipo blocos casualizados em parcelas subdivididas, com quatro blocos (Figura 3). Este delineamento experimental foi escolhido por facilitar a implantação do experimento dado o equipamento disponível. Nas parcelas foram alocadas cinco densidades de semeadura: P1 (40% abaixo da recomendada), P2 (20% abaixo), P3 (população ideal), P4 (20% acima) e P5 (40% acima). A população ideal refere-se à densidade de plantas recomendada regionalmente pelo obtentor da cultivar. Nas subparcelas foram dispostos dois níveis de investimento (NI) em adubação potássica e fosfatada (Alto investimento – AI; Médio investimento – MI), fornecendo-se uma dose alta (acima do recomendado em função dos teores do solo e manutenção da cultura) e uma média (próximo ou ligeiramente inferior ao recomendado) de cada tipo de fertilizante para os respectivos tratamentos.

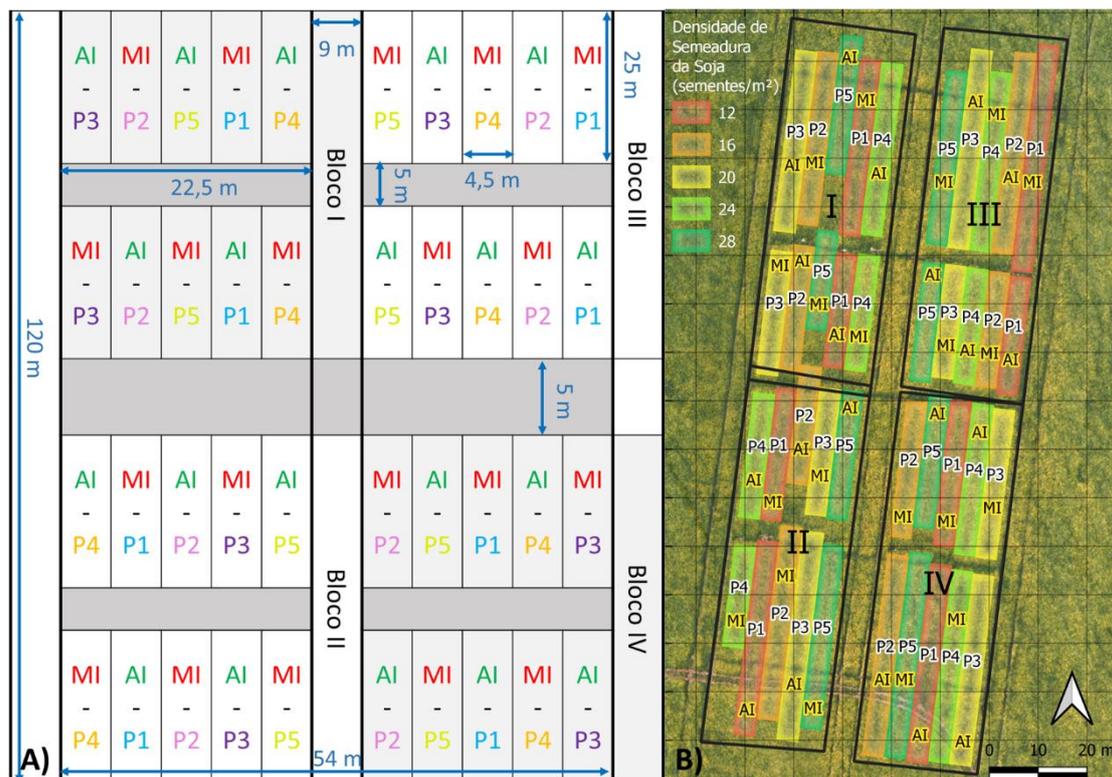


Figura 3. Croqui do experimento para uma das zonas do experimento. A) Croqui teórico: Células em cinza escuro representam intervalos para manobra e as linhas grossas representam a posição aproximada dos rastros de pulverizador. B) Disposição das parcelas no campo. AI = Alto Investimento em Fertilização; MI = Médio investimento em Fertilização; P é o nível do tratamento população. Blocos dispostos em algarismos romanos.

Cada ZM tem 4 blocos de 22.5 m de largura e aproximadamente 50 m de comprimento (no sentido da sementeira, perpendicular ao declive, e paralelo aos rastros de pulverização). Os blocos têm 10 parcelas, cada parcela com 4.5 m de largura (largura da sementeira de soja) e 20 m de comprimento, totalizando 90 m². Houve um intervalo de 5 m de comprimento entre os limites transversais das parcelas para a manobragem das máquinas, considerado bordadura (Figura 3). As densidades de sementeira foram dispostas nas parcelas de modo que facilitasse a operação de sementeira, e o nível de adubação foi disposto nas subparcelas, que dividem transversalmente as parcelas na metade.

Os dois tratamentos em que se variou o nível de investimento em adubação (AI e MI), dispostos nas subparcelas, foram implantados variando conjuntamente as doses de

Monoamônio fosfato enriquecido de Boro (MAP+B, contendo: 10% Nitrogênio, 48% P₂O₅ e 0.6% Boro) no sulco de semeadura e Cloreto de Potássio (KCl, com 60% de K₂O) em cobertura. Foi utilizado MAP+B devido à disponibilidade de fertilizantes do proprietário. As doses de fertilizante foram prescritas com base nas recomendações regionais para a soja providas da instituição de pesquisa FAPA (FONTOURA et al., 2015), enquanto que as densidades de semeadura recomendadas foram prescritas pelo obtentor da semente.

Para os tratamentos MI e AI as doses de fertilizantes utilizadas foram respectivamente 150 e 300 kg ha⁻¹ de MAP+B e 120 e 240 kg ha⁻¹ de KCl, não foi aplicado fertilizante nitrogenado.

A cultivar de soja utilizada foi a BMX 55157 RSF IPRO (Zeus). A população final esperada, segundo recomendações do obtentor para a região, é de 28 a 33 plantas m⁻² (BRASMAX GENÉTICA, 2022), foi escolhida a densidade de 30 plantas m⁻² como padrão. O lote de sementes considerava uma quebra técnica de 25%, visto isso a semeadora foi regulada para distribuir respectivamente 24, 32, 40, 48 e 56 plantas m⁻² nos tratamentos de população de plantas para atingir a densidade final de 18 (P1), 24 (P2), 30 (P3), 36 (P4) e 42 (P5) plantas m⁻².

4.3 Implantação

As parcelas de soja foram implantadas utilizando uma semeadora pneumática Stara[®] Vitória Top DPS Control em 06/10/2020. Consiste em uma semeadora adubadora de 9 linhas, reguladas a um espaçamento de 0.5 m, totalizando 4.5 metros de largura. O implemento possui um sistema eletrohidráulico de tracionamento dos dosadores que é capaz de modificar rapidamente a taxa de deposição de semente e fertilizante separadamente, com grande amplitude de doses. No sulco, foi aplicado MAP+B com o mecanismo sulcador do tipo disco duplo defasado. A dosagem de sementes e fertilizantes no sulco foi modificada manualmente no momento da implantação. A velocidade de semeadura no experimento ficou próxima de 3.6 km h⁻¹.

Foi distribuída uma dose base de 120 kg ha⁻¹ de KCl a lanço em cobertura sobre todas as parcelas antes da semeadura utilizando distribuidor de discos rotativos Stara[®] Twister 1500. A dose suplementar, para AI, foi realizada aos 50 dias após a semeadura (DAS) com um aplicador de sólidos para parcelas tracionado manualmente espalhando

120 kg ha⁻¹ do produto. A cultura da soja se apresentava ainda no estágio vegetativo com seis trifólios completamente expandidos (V6).

Os tratos culturais como manejo de pragas, doenças e plantas daninhas foram realizados de maneira uniforme nas parcelas, de acordo com a necessidade para a soja na região, utilizando as recomendações técnicas da FAPA (FONTOURA et al., 2020; SPADER et al., 2020).

4.4 Avaliações

4.4.1 Análise química do solo e granulometria

Os atributos químicos do solo das duas zonas de manejo foram analisados antes da implantação do experimento, em 2020. Foi realizada uma amostra composta por zona de manejo e enviada ao Laboratório de Solos e Nutrição de Plantas UNICENTRO, onde foi realizada a análise química seguindo os métodos apresentados por Pavan et al. (1992). Os atributos químicos analisados foram: teores de P (Mehlich-1), K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Cu, Zn, Fe, Mn, Matéria Orgânica (Walkley-Black), Al³⁺, H + Al e pH (CaCl₂). Juntamente com as análises químicas, foi feita a análise granulométrica do solo no Laboratório de Física do Solo da UNICENTRO, determinando-se os teores de areia, silte e argila pelo método do densímetro (DE ALMEIDA et al., 2012). Os teores encontrados foram interpretados se utilizando o Manual de Adubação e Calagem para o estado do Paraná (NEPAR-SBCS, 2017).

4.4.2 Qualidade física do solo

Os atributos físicos das duas zonas de manejo foram avaliados antes da implantação do experimento, em 2020. As avaliações realizadas nesse período foram:

- Infiltração de água no solo pelo infiltrômetro de carga constante com anéis concêntricos, com 6 repetições por zona, utilizando o infiltrômetro de anéis concêntricos pelo tempo de duas horas (DA SILVA et al., 2017), para avaliar a quantidade de água infiltrada no solo ao longo do tempo e definir a Velocidade Básica de Infiltração (VIB) do solo, a velocidade mínima de infiltração em solo saturado após um evento de precipitação duradouro;

- Resistência à penetração, com 8 repetições por zona, utilizando penetrômetro digital para avaliar a resistência do solo à penetração até os 0.6 m de profundidade a cada intervalo de 1 cm;
- Porosidade do solo, umidade volumétrica e densidade do solo. Para isso foram utilizadas amostras de solo indeformado que foram coletadas em anéis de 5 cm de comprimento que foram analisados em mesa de tensão (REYNOLDS et al., 2002). Os anéis foram coletados em três camadas de solo (0.025-0.075 m, 0.125-0.175 m e 0.275-0.325 m nomeadas pelo ponto médio de cada: 0.05, 0.15 e 0.30 m) com 6 repetições em cada, utilizando uma sonda acionada hidráulicamente que penetra 0.2 m. Em cada ponto, com a sonda foi realizada a primeira coleta de 0 a 0.2 m, retiradas as duas amostras nessa camada, aberta uma cova no mesmo ponto com a superfície aos 0.2 m e realizada uma segunda sondagem para a coleta do anel aos 0.3 m. Os resultados da mesa de tensão foram utilizados para a determinação da umidade volumétrica, densidade e porosidade do solo.

4.4.3 Avaliações na cultura da soja

Na soja, foram realizadas avaliações no campo e pós-colheita.

- Massa de grãos por hectare: obtida com colhedora de parcelas, com uma amostra por parcela colhida em faixa transversal ao sentido de semeadura de 1.5 m de largura por 4.5 de comprimento (5.4 m²), corrigido para 13% de umidade; expresso em kg ha⁻¹;
- Umidade dos grãos: recolhida uma amostra para cada parcela, quantificada com medidor eletrônico de umidade para grãos, com uma amostra por parcela; expressa em porcentagem (%), utilizada para padronizar a massa de grãos por hectare para 13% de umidade;
- Altura de planta: medida do solo até o meristema apical da planta no final do ciclo, cinco amostras por parcela; expresso em cm;
- Presença de acamamento: na maturação da cultura, para parcelas com plantas tombadas ou acamadas se designou nota 1, e as parcelas que tinham somente plantas eretas receberam nota zero.
- Distribuição de sementes: avaliação da distância entre plantas na mesma linha após a emergência, concluindo o estande final em plantas m⁻²; a porcentagem de falhas e duplas, definidas por apresentarem espaçamentos superiores ou inferiores a,

respectivamente, 150% ou 50% do espaçamento ideal para a densidade de plantas esperada na parcela; a porcentagem de espaçamentos adequados, ou seja, entre 50 e 150% do espaçamento esperado; houve 5 amostras por parcela contando 20 plantas cada amostra;

- Altura da inserção de vagem: medida da base do solo até a inserção da vagem mais baixa, 5 amostras por parcela, expressa em cm;
- Número de vagens por planta, 5 amostras por parcela;
- Número de entrenós da haste principal, 5 amostras por parcela;
- Massa de mil grãos (MMG), uma amostra por parcela, corrigida para 13% de umidade, expressa em g.

4.5 Análise Estatísticas

As análises de variância individual para cada experimento foram realizadas de acordo com o modelo estatístico: $Y_{ijk} = m + b_k + P_i + e_{ik} + N_j + PN_{ij} + e_{ijk}$, em que: $i = 1, 2, 3, 4, 5$ níveis do fator P (População de plantas ou Densidade de Plantas esperada); $j = 1, 2$ níveis do fator N (Nível de investimento adubação), $k = 1, 2, 3, 4$ blocos; Y_{ijk} : valor observado do nível i do fator P combinado com o nível j do fator N no bloco k ; m : média geral do experimento; P_i : efeito fixo do tratamento i no fator P; e_{ik} : o efeito dos fatores não controlados na parcelar; N_j : efeito fixo do tratamento j no fator N; PN_{ij} : efeito da interação nos níveis do fator P e N; b_k : efeito do bloco; e_{ijk} : o efeito dos fatores não controlados na subparcela. Os dados avaliados foram submetidos à análise de variância pelo teste F e as médias com diferenças significativas foram agrupadas pelo teste de médias Tukey ($p \leq 0.05$).

Para a comparação entre as médias de ZA e ZB, foi utilizado o teste t de Student ($p \leq 0.05$) para os dados que apresentaram distribuição normal e heterocedasticidade, e o teste de Mann-Whitney ($p \leq 0.05$) para os dados que não cumpriram os pressupostos estatísticos. Para esta análise, foram utilizados os dados das avaliações do solo (porosidade, penetrometria e infiltração) e os dados das avaliações na soja, que foram comparados entre todos os níveis de cada fator (P de NI). A curva de infiltração de água no solo em função do tempo foi construída por um modelo não linear usando o inverso de x . Os *outliers* dos dados de infiltração e porosidade foram retirados da análise. Para a porosidade, as zonas foram comparadas em cada profundidade, mas as diferentes

profundidades não foram comparadas estatisticamente entre si. Não foi realizada análise estatística sobre os dados da análise química e granulométrica do solo devido à ausência de repetições.

A comparação entre as variáveis avaliadas na soja e a densidade de plantas observada foi realizada através da análise de regressão simples e múltipla. Para as variáveis dependentes com distribuição normal foram desenvolvidos modelos lineares gaussianos, em alguns casos quando a modelagem acusou significância ($p \leq 0.05$) para os outros fatores (zonas, NI, blocos e suas interações) foi realizada regressão linear múltipla. Para as variáveis dependentes de contagem e com distribuição não normal foram utilizados modelos lineares generalizados da família *Poisson*, as variáveis contínuas de distribuição não normal foram analisadas com modelo de família *Gama*, e as variáveis binárias foram analisadas com regressão logística (família *logit*). A fração da variância explicada pelos modelos lineares generalizados é expressa pelo quadrado da deviança (D^2) (BARBOSA et al., 2016), parâmetro equivalente ao coeficiente de determinação de modelos lineares (R^2). Os modelos múltiplos tiveram todas as combinações testadas e os modelos comparados para que se encontrasse o modelo mínimo significativo, respeitando o princípio da parcimônia.

As variáveis produtividade e rentabilidade foram analisadas com regressão linear de primeiro e de segundo grau, com o objetivo de achar valores críticos da variável dependente e da densidade de plantas.

As análises e os gráficos foram realizados utilizando o software *RStudio* (R. CORE TEAM, 2020) e o pacote gráfico *ggplot2* (WICKHAM, 2011).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Condições climáticas do ano

5.1.1 Precipitação

A precipitação no período de produção da soja foi atípica nesta safra, se comparada com os dados históricos para o período. Como se pode observar na

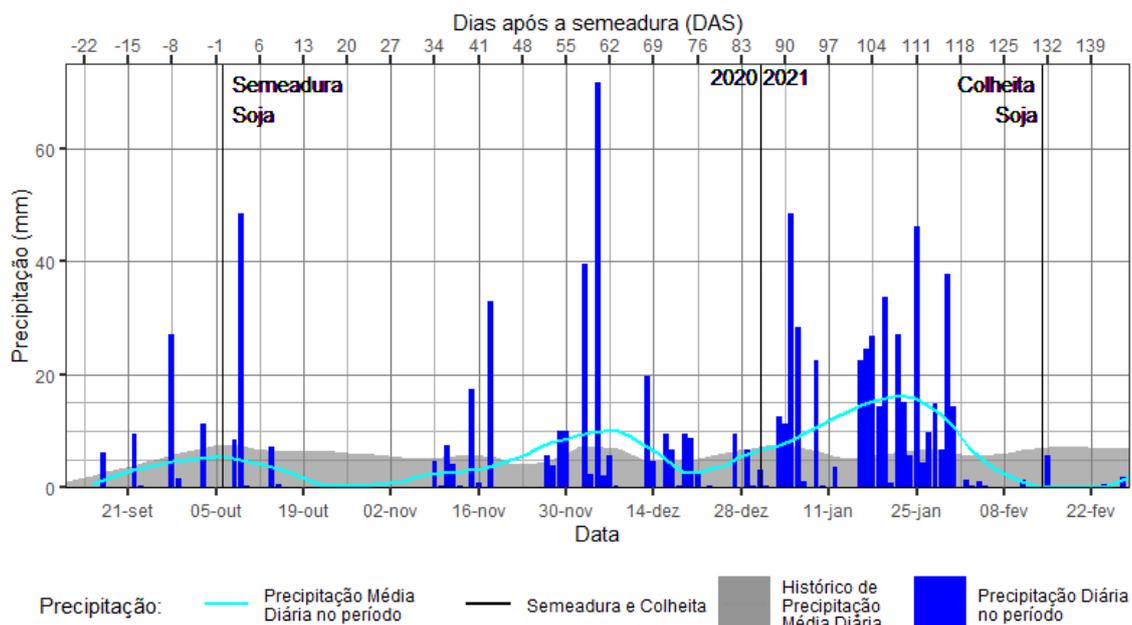


Figura 4, as condições para semeadura foram ótimas, considerando que o solo estava com umidade adequada e houve precipitação considerável logo nos primeiros dias após a semeadura, dando condições para garantir a completa germinação das sementes e o estabelecimento da lavoura (NEUMAIER et al., 2020).

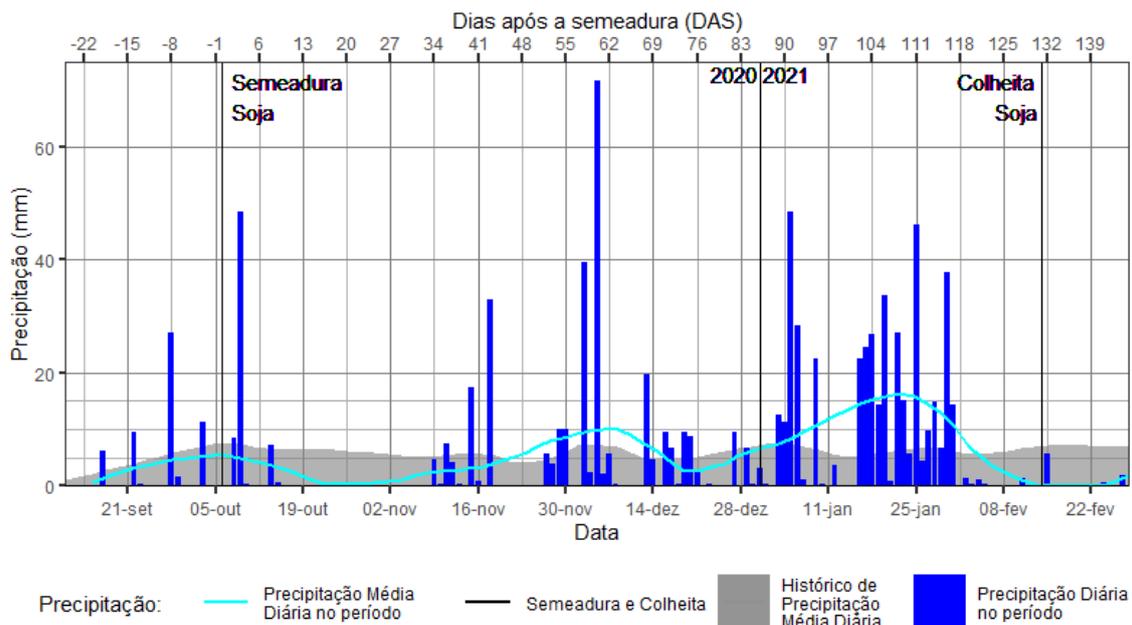


Figura 4. Precipitação diária durante o período de produção da safra de soja 2020/2021 em Cantagalo-PR, comparando com os dias após a semeadura (DAS) da soja. As curvas demonstram a precipitação diária no período (ciano) e o histórico da precipitação média diária (cinza) suavizadas pelo método de regressão local.

Porém aos 10 DAS (dias após semeadura) se iniciou um veranico de 22 dias (17-out a 08-nov), sem chuva considerável, cobrindo boa parte do desenvolvimento vegetativo da cultura. A partir dos 52 DAS, durante o estágio reprodutivo da cultura, se iniciou um período de chuvas com precipitações acima da média, com pico na metade de janeiro, como se observa ao comparar a curva de precipitação do período com a curva de precipitação histórica, o que garantiu adequado suprimento hídrico para a cultura durante todo seu estágio reprodutivo.

A produtividade da soja foi favorecida pelas boas condições climáticas para o desenvolvimento da soja neste ciclo produtivo, pois ambas ZM alcançaram produtividades elevadas, com médias acima de 5400 kg ha^{-1} . Essas produtividades estão muito acima das médias de produtividades normalmente registadas na região, e essa diferença provavelmente é consequência das condições climáticas neste ciclo.

As exigências hídricas da cultura da soja foram supridas, com uma lâmina de precipitação de 800 mm da semeadura à colheita. Não houve estiagem durante os períodos críticos ao suprimento de água, ou seja, os estádios de germinação e emergência e da floração ao enchimento de grãos. O período de maior estresse hídrico ocorreu após a

emergência e se encerrou antes da floração (Figura 4), período que não afeta tão intensamente a produtividade (NEUMAIER et al., 2020).

5.1.2 Temperatura

A temperatura média durante o ciclo de produção da soja praticamente não se diferenciou da média, como se observa na Figura 5. O início de 2021 foi ligeiramente mais frio e coincidiu com a alta pluviosidade na metade de janeiro. A temperatura do ar durante o ciclo da soja se mostrou adequada, estando na maior parte dos dias com médias acima de 20°C, condição ótima para o desenvolvimento da cultura (NEUMAIER et al., 2020).

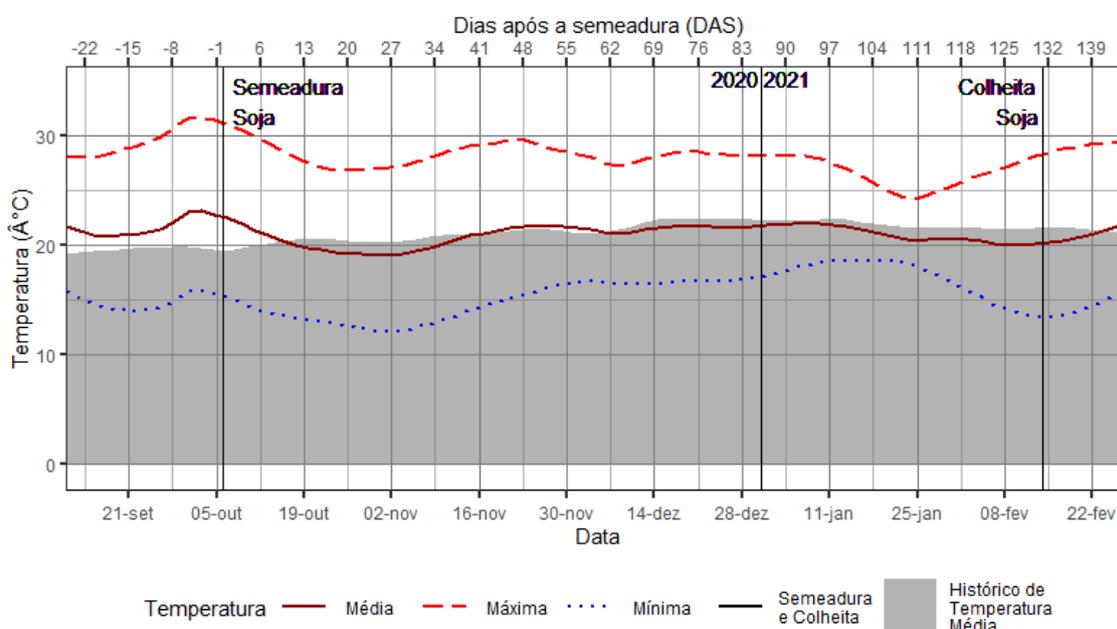


Figura 5. Temperatura máxima, média e mínima diária durante o período de produção da safra de soja 2020/2021 em Cantagalo-PR. As curvas demonstram as médias históricas da temperatura média diária suavizada pelo método de regressão local.

5.1.3 Radiação Solar

Na Figura 6 se observa que o saldo da radiação solar foi superior durante quase todo o ciclo produtivo da soja, com reduzido intervalo de baixa luminosidade devido à alta precipitação na metade final de janeiro de 2021. Nesse momento, a cultura já se encontrava no estágio de enchimento de grãos e início da maturação. Durante a floração,

em novembro e dezembro, havia elevada luminosidade.

A luminosidade possivelmente teve bastante influência no rendimento da soja, sendo que o saldo de radiação solar ficou acima da média na maior parte do ciclo (Figura 6). Segundo Neumaier et al. (2020) a soja apresenta maiores produtividades quanto maior for a radiação solar que nela incide, considerando que o suprimento de água seja mantido, exatamente o que aconteceu durante esse ciclo produtivo.

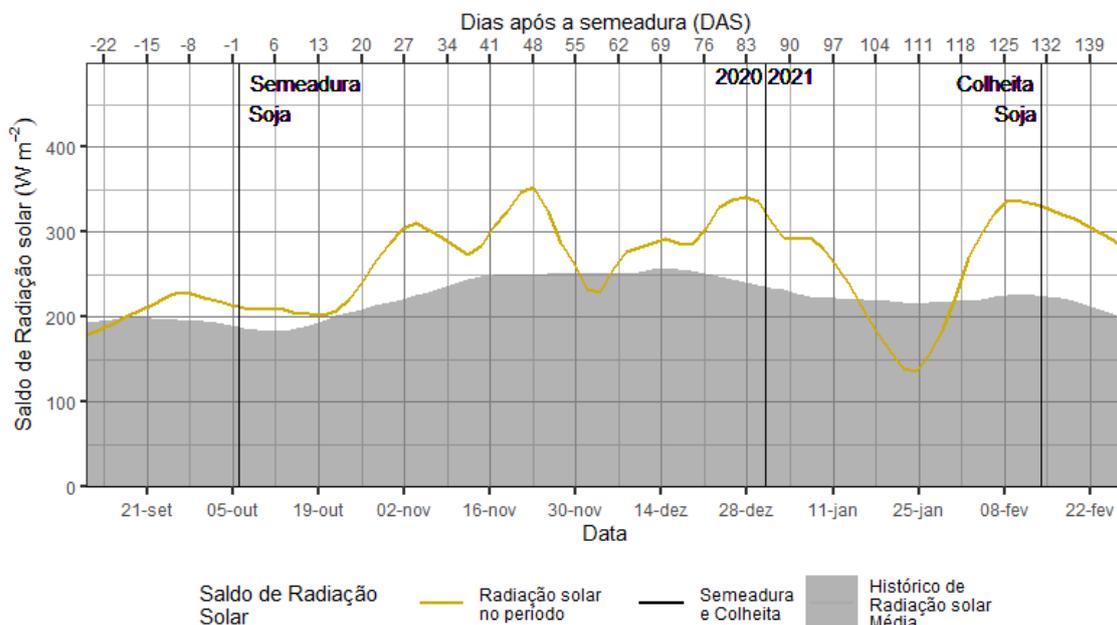


Figura 6. Saldo da radiação solar diária durante o período de produção da safra de soja 2020/2021 em Cantagalo-PR. As curvas demonstram as médias históricas do saldo de radiação solar diário suavizado pelo método de regressão local.

Em resumo, as condições climáticas favoreceram o desenvolvimento e a produtividade da soja, fazendo com que o efeito das zonas de manejo expressasse menores diferenças entre as zonas para a maioria das variáveis analisadas. É esperado que os fatores limitantes para a produtividade na ZM de menor potencial produtivo levem a diferenças mais evidentes no desenvolvimento da cultura em anos com condições climáticas mais desafiadoras, principalmente quanto à disponibilidade hídrica, e que as diferenças se comprimam em anos sem limitações climáticas (FRAISSE; SUDDUTH; KITCHEN, 2001).

5.2 Atributos físicos e químicos do solo nas zonas de manejo

5.2.1 Infiltração da água no solo

Não houve diferença significativa entre as ZM para as médias dos atributos obtidos pela avaliação da infiltração de água no solo, utilizando os dados de 5 (ZA) e 6 (ZB) avaliações. Houve muita variabilidade entre as medidas. Em ZA, a velocidade de infiltração básica (VIB), calculada pela média das últimas observações, foi 10% superior à obtida em ZB. Já quanto à VIB obtida pelo valor mínimo no modelo de regressão (Figura 7), em ZA foi 23% superior à obtida em ZB. A regressão múltipla da velocidade de infiltração (VI) utilizando o inverso da variável tempo como preditora não acusou como significativo o efeito das zonas, apenas a interação entre zonas e tempo. Isso significa que a VI difere entre as zonas nos primeiros minutos, até que o argumento da função dependente do tempo passa a não ser representativo, a partir dos 30 minutos, e a VI se iguala ao intercepto, que é idêntico à VIB. O modelo inverso se ajustou melhor que o linear-log para a variável VI, mas ambos chegam ao mesmo resultado, que há diferença entre as zonas apenas nos primeiros minutos, mas que se equivalem aos 120 minutos.

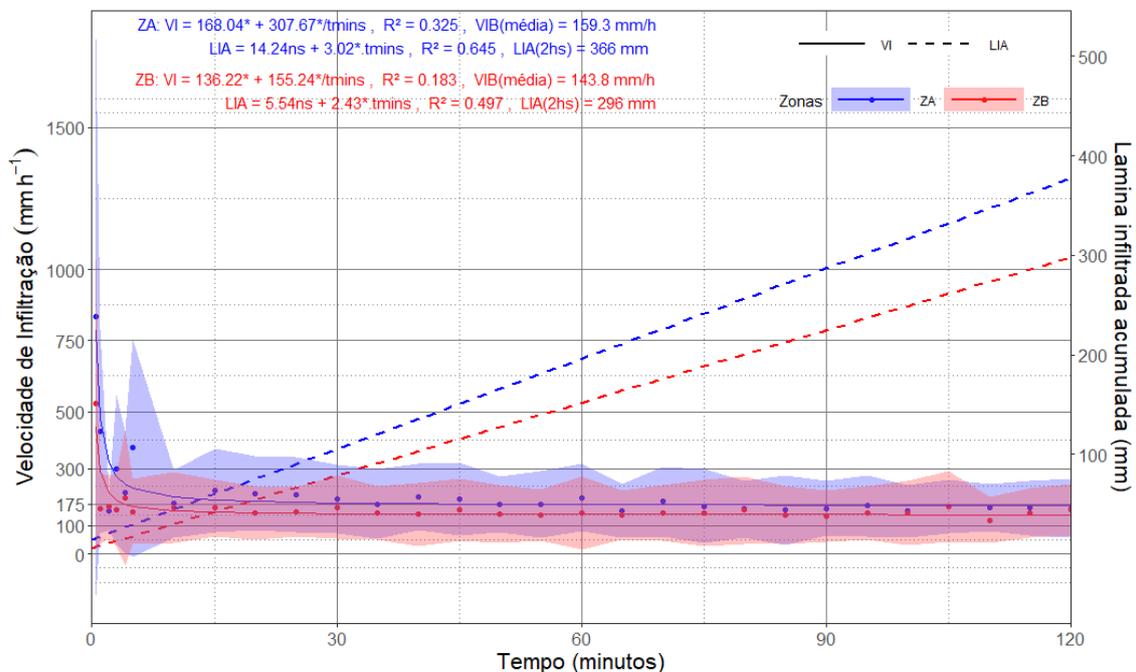


Figura 7. Infiltração da água no solo nas duas ZM. As linhas tracejadas representam a lâmina de infiltração acumulada (LIA). As linhas sólidas representam a velocidade de

infiltração em cada minuto (VI), e a área colorida é o intervalo de confiança (95%) da média de cada minuto.

A lâmina de água infiltrada em 2 horas foi 24% superior em ZA, em parte porque a velocidade de infiltração nos primeiros minutos foi mais alta, enquanto em ZB a velocidade de infiltração inicial já era próxima à VIB. Assim como ocorre para a variável VI, a regressão múltipla não acusou o efeito das zonas como significativo, apenas a interação entre zonas e tempo, o que significa que, na média da LIA, as zonas não diferiram entre si, mas a dependência da LIA ao tempo de precipitação varia entre as zonas, implicando que a reta de LIA é mais inclinada em ZA que em ZB. Como a regressão linear ocorre a partir da origem, os interceptos nos modelos lineares de LIA não diferiram de zero e por isso o valor de p não é significativo, portanto, o coeficiente angular sozinho é um bom parâmetro para previsão da LIA. E na regressão múltipla, o modelo que melhor se ajustou é o que possui apenas a interação entre zonas e tempo como variável preditora.

Mesmo sem diferenças entre as zonas, tanto ZA quanto ZB tiveram capacidade de infiltração de água alta e não limitante.

5.2.2 Porosidade e densidade do solo

Como se observa na Figura 8, as principais diferenças entre ZA e ZB foram encontradas na camada dos 0.125 aos 0.175 m (ponto médio aos 0.15 m), em que ZA foi estatisticamente superior nas variáveis porosidade total (PT, Figura 8 A densidade do solo foi maior aos 0.15 m que nas demais profundidades, e na média das três camadas a densidade do solo em ZB foi 6.2 % mais elevada que em ZA.

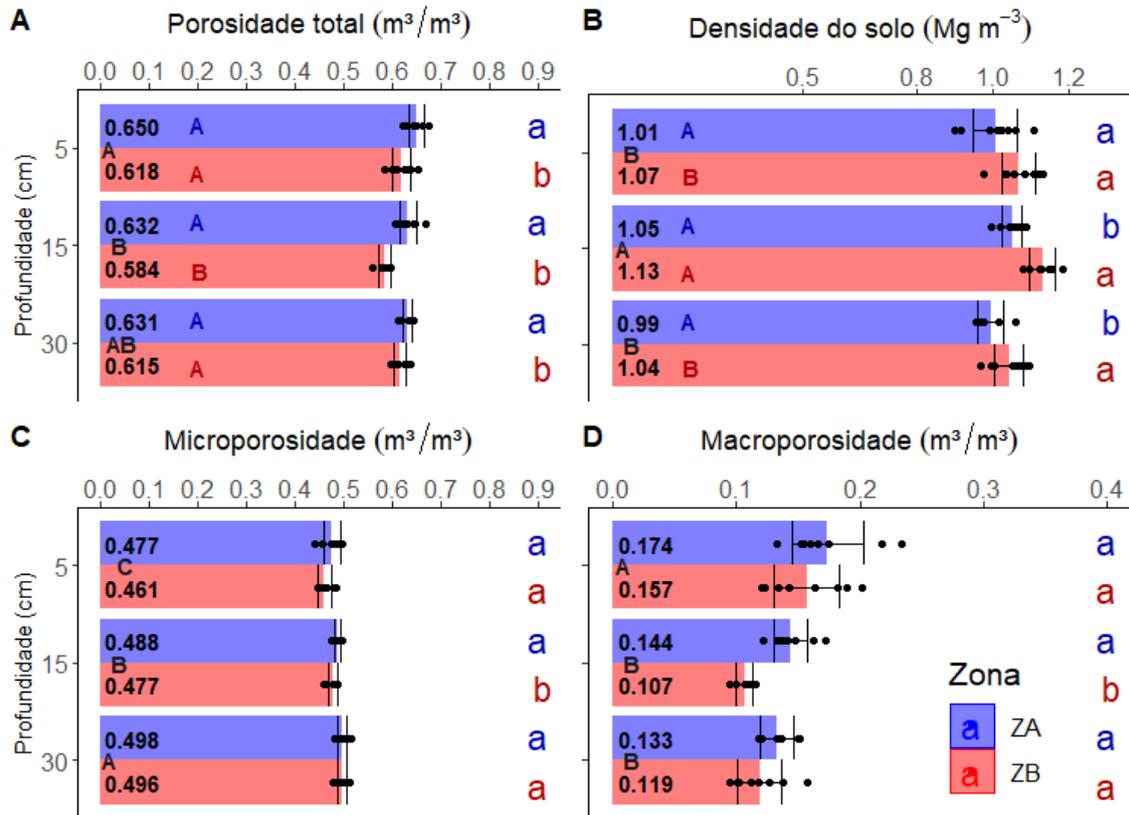


Figura 8. A), microporosidade (Figura 8. C) e macroporosidade (Figura 8. D), e inferior na densidade do solo (Figura 8. B). A porosidade total de ZA foi superior a ZB nas três camadas de solo avaliadas, e a densidade aparente também foi inferior em ZB em subsuperfície (camada de 0.15 e 0.30 m). A densidade do solo foi maior aos 0.15 m que nas demais profundidades, e na média das três camadas a densidade do solo em ZB foi 6.2 % mais elevada que em ZA.

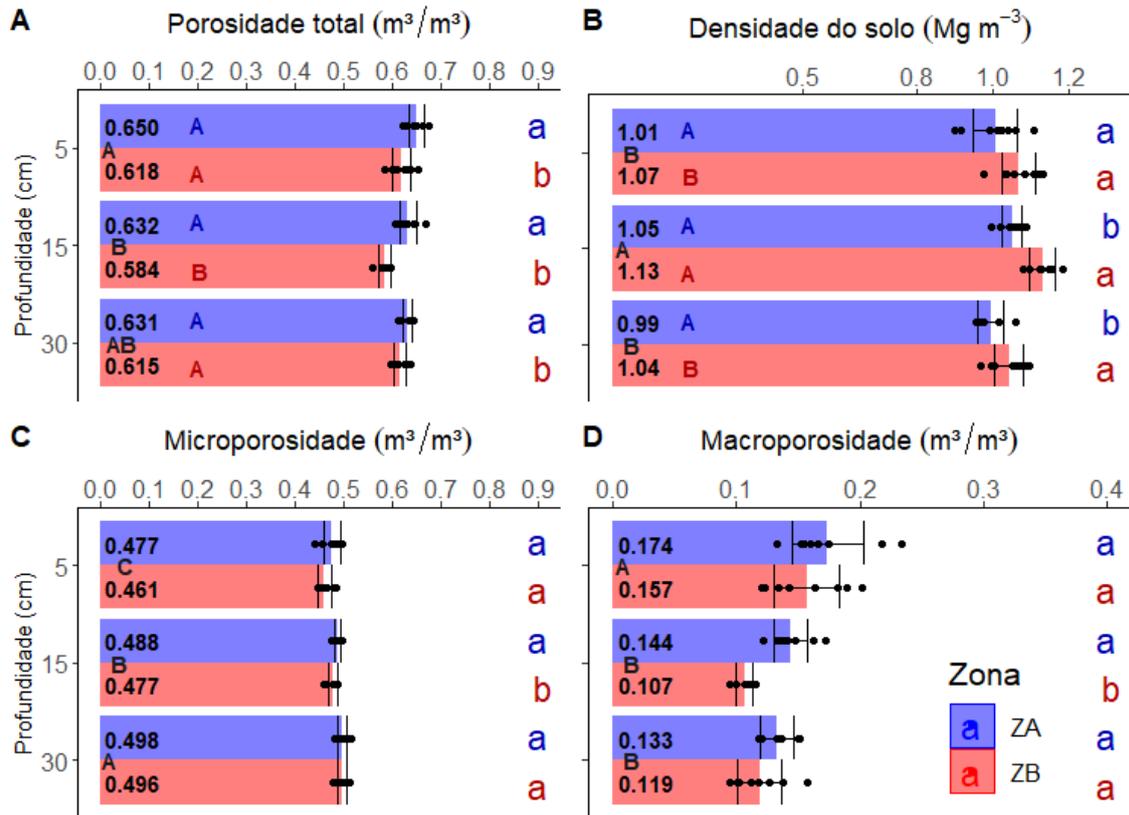


Figura 8. Porosidade total (A), Densidade do solo (B), Microporosidade (C) e Macroporosidade (D) do solo em três camadas de solo, as letras minúsculas na lateral direita comparam as médias de ZA e de ZB dentro da mesma camada, as letras maiúsculas pretas na lateral esquerda entre as barras comparam as médias das camadas (ZA+ZB) entre si das variáveis que não apresentaram interação, enquanto as maiúsculas coloridas comparam as camadas dentro de cada ZM. As barras de erro representam o intervalo de confiança ao nível de 95%. Os pontos pretos ilustram todas as observações.

A macroporosidade diminui com o aumento da profundidade. Em ZB aos 0.15 e aos 0.30 m a macroporosidade alcança o intervalo crítico de macroporosidade de 10 a 13 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ definido por Baretta Junior et al. (2022) na região.

5.2.3 Resistência à penetração

As avaliações com o penetrômetro ocorreram nos mesmos pontos e momentos que as coletas das amostras de solo indeformado, e a umidade volumétrica do solo também foi avaliada por essas amostras. Não se observou diferença entre as médias da umidade de cada zona nas diferentes camadas avaliadas, apenas que a umidade aos 0.30

m de profundidade é mais elevada que nas outras camadas avaliadas (Figura 9).

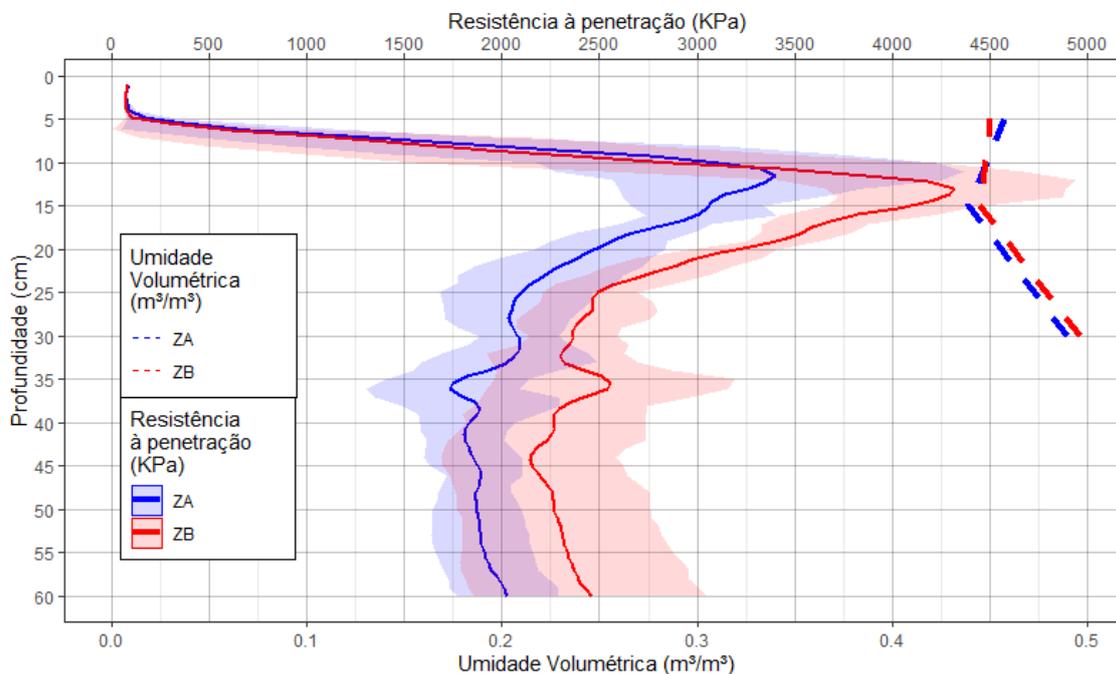


Figura 9. A) Resistência à penetração ao longo do perfil do solo nas duas zonas de manejo. A área colorida indica o intervalo de confiança a 95% e quando seguidas por número indicam que se encontrou diferença significativa na profundidade indicada pelo número. As linhas sólidas localizam as médias da RP suavizadas pelo método de Regressão local. As linhas tracejadas indicam a média da umidade volumétrica do solo em três profundidades.

Com os resultados do penetrômetro observou-se duas camadas distintas no perfil do solo com diferença na resistência à penetração (RP) entre ZA e ZB (Figura 9). Pela comparação usando o teste t de Student, o solo em ZB tem maior RP nas camadas de 0.13 a 0.23 m de profundidade e na camada de 0.35 a 0.36 m. Nas profundidades 0.01 e 0.03 m a RP foi superior em ZA.

As avaliações físicas do solo evidenciam que existe uma camada de solo com problemas de compactação próxima aos 0.15 m de profundidade, e que ZB tem qualidade física inferior a ZA, em especial nessa camada que é potencialmente um fator limitante à produtividade em ZB.

As análises realizadas por Pott et al. (2019) em ambientes de diferentes potenciais produtivo sobre latossolo vermelho distrófico no sul do Brasil encontraram contrastes

entre as áreas de baixo e alto potencial produtivo semelhantes ao presente estudo: na área de menor produtividade a camada de 0.10 a 0.20 m normalmente é a mais afetada pela compactação, a densidade do solo é mais alta, a macroporosidade é limitada e existe diferença na resistência à penetração.

Comparando os dois trabalhos, Pott et al. (2019) encontraram valores de macroporosidade menores (abaixo de $8 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) que consideraram condições limitantes, enquanto a média de ZB na profundidade de 0.15 m foi de $10.7 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, e a densidade do solo encontrada (1.65 Mg m^{-3}) foi superior a encontrada em ZB (1.13 Mg m^{-3}), grandeza que sofre grande influência da textura do solo (OLIVEIRA et al., 2016). Por outro lado, Pott et al. (2019) consideraram camadas de solo com resistência à penetração em torno de 2800 kPa em teores de umidade inferiores a $0.20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e que foram consideradas condições limitantes, enquanto em ZB foram encontrados valores superiores a 4000 kPa em umidade de $0.45 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Figura 9), que caracteriza estes solos com maior resistência física. No trabalho de Oliveira et al. (2016), concluiu-se que o limite crítico de resistência do solo à penetração para solos muito argilosos é em torno de 5200 kPa em capacidade de campo, a partir do qual já se observa prejuízo na cultura devido à compactação, e os resultados de ZB não alcançam esse nível crítico, o que justifica a alta produtividade obtida.

Por mais que os níveis críticos definidos na literatura ora não foram atingidos em nenhuma das ZM, a diferença encontrada na macroporosidade e na densidade do solo aos 0.15 m e na RP dos 0.13 aos 0.23 m de profundidade demonstram que ZA tem qualidade física superior a ZB nessas profundidades, e em subsuperfície também possui considerável vantagem, pois demonstrou menor RP aos 0.35 e 0.36 m e menor densidade do solo.

5.2.4 Análise química e granulométrica do solo

O pH é muito baixo nas duas zonas em todas as camadas analisadas (Tabela 1), exceto em ZA, de 0-0.1 m, em que é baixo, e a saturação por bases (V%) também se encontra em níveis baixos e médios abaixo dos 0.1 m de profundidade. A ZA possui níveis de alumínio (Al^{3+}) e de saturação por alumínio (m%) mais elevados que ZB abaixo dos 0.1 m. A CTC é alta nas duas zonas, assim como os teores de cálcio (Ca^{+2}) e magnésio (Mg^{+2}), porém o potássio (K^{+}) não alcançou o nível crítico (NC), exceto em ZB na camada

superficial. A saturação por K^+ é mais baixa em ZA que em ZB.

Tabela 1. Análise química para macronutrientes e outros atributos do solo.

Elemento/ Propriedade	pH (CaCl ₂)	Al ³⁺	m%	¹ K ⁺	CTC	V%	¹ P	B	² MO
Profundidade (m)	-	cmol _c dm ⁻³	%	cmol _c dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³	%	mg dm ⁻³	mg dm ⁻³	g dm ⁻³
ZA 0-0.1	4.9	0.32	2.6	0.20	19.1	62.9	6.76	1.0	54.4
ZB 0-0.1	4.6	0.42	4.3	0.31	16.9	56.0	9.36	0.8	50.1
ZA 0.1-0.2	4.4	1.27	20.5	0.06	13.6	36.2	1.00	0.8	47.9
ZB 0.1-0.2	4.4	0.79	11.6	0.09	13.5	44.7	1.20	0.6	37.7
ZA 0.2-0.4	4.4	1.27	24.1	0.06	11.9	33.6	0.20	0.4	40.9
ZB 0.2-0.4	4.6	0.48	8.4	0.06	11.1	47.3	0.27	0.4	31.8
ZA 0-0.2	4.65	0.80	11.6	0.13	16.4	49.5	3.88	0.9	51.2
ZB 0-0.2	4.5	0.61	7.9	0.20	15.2	50.4	5.28	0.7	43.9
Muito baixo	4.7	0.3	5	0.06	5	20	3	0.1	7
Baixo	5.1	0.7	10	0.12	7	35	6	0.2	14
Médio (NC)	5.6	1.5	20	0.21	14	50	9	0.3	24
Alto	6.2	2.5	50	0.45	24	70	12	0.6	34

Notas: as células de fundo azul e vermelho são coloridas para facilitar a visualização de dados de ZA e ZB, respectivamente. As barras cinzas comparam os resultados das análises com os parâmetros da literatura, as classes de disponibilidade são nomeadas a partir de seu limite superior, e acima do valor alto é considerado "Muito Alto". ¹Extração por Mehlich-1. ²Determinação pelo método de Walkley-Black.

O nível de fósforo (P) é muito baixo nas camadas inferiores a 0.1 m, e é possível visualizar uma diferença entre as zonas na camada superficial do solo, em que ZB ainda mantém teores acima do nível crítico de P. Os teores de micronutrientes são altos a muito altos no geral (dados não apresentados). A ZA apresentou teores de matéria orgânica (MO) superiores a ZB em todo o perfil, ainda assim são altos em comparação com a referência do estado (NEPAR-SBCS, 2017).

ZA se demonstrou ligeiramente mais argilosa que ZB em todo o perfil, enquanto ZB apresentou maiores teores de silte (**Tabela 2.** Análise granulométrica do solo. Tabela 2).

Tabela 2. Análise granulométrica do solo.

Propriedade	Profundidade (m)	ZA	ZB	ZA	ZB	ZA	ZB	ZA	ZB
		0 - 0.1	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.1 - 0.2	0.2 - 0.4	0.2 - 0.4	0 - 0.2	0 - 0.2
¹ Argila	g kg ⁻¹	700	636	709	638	726	634	704	637
Silte	g kg ⁻¹	271	331	263	336	253	346	267	333
Areia	g kg ⁻¹	29.0	33.7	28.1	25.8	21.8	19.9	28.5	29.7

Notas: as células de fundo azul e vermelho são coloridas para facilitar a visualização de dados de ZA e ZB, respectivamente. As barras cinzas comparam os resultados de cada propriedade entre as diferentes zonas e profundidade, barras no mesmo tom participam da mesma comparação. As médias de 0-0.2 é calculada pela média de 0-0.1 e 0-0.2 m de profundidade. ¹a determinação dos teores de argila e areia foram realizadas pelo método do densímetro, o silte é calculado por diferença.

Percebe-se que ambas as zonas podem ter limitações na saturação de bases, pH e teores de P (Tabela 1). ZA possui teores de K^+ e P mais baixos e saturação por Al^{3+} mais elevada, o que pode ter relação com maior extração pelas culturas, uma vez que a produtividade é mais elevada e que o manejo vem sendo realizado em taxa fixa. ZA demonstrou maiores teores de argila (Tabela 2) e MO (Tabela 1), que normalmente estão associadas a maior fertilidade do solo e maior potencial produtivo, essas são propriedades com potencial de uso para delimitação de zonas de manejo e preditores do potencial produtivo (LUCHIARI JUNIOR et al., 2011; NAWAR et al., 2017; SMIDT et al., 2016).

Kramer et al. (2014), avaliando a fertilidade do solo na mesma região, concluiu que em sistema plantio direto de longa duração, a fertilidade na camada de 0.1-0.2 m de profundidade tem grande impacto no potencial produtivo das culturas, em especial quanto aos teores de Al^{3+} que são negativamente correlacionados ao rendimento da cultura, ao pH do solo, teores de MO, saturação por bases e a disponibilidade dos macronutrientes catiônicos. As avaliações físicas do solo realizadas neste trabalho também demonstraram a importância da camada de 0.1-0.2 m na definição do potencial produtivo do solo.

5.3 Comparação entre os tratamentos na soja

5.3.1 Plantabilidade

A densidade de plantas observada teve alta correlação com densidade esperada, e a análise de regressão (Figura 10) demonstrou que esta variável não sofreu influência significativa das outras fontes de variação que não a densidade de semeadura. Porém, a densidade observada foi em média 12.7% acima da esperada. É possível que isso tenha ocorrido porque as condições edafoclimáticas durante o processo de germinação e emergência das plantas foram favoráveis. Uma vez que a quebra técnica recomendada pela empresa produtora da semente foi relativamente alta (25%), pois considera quebras pela germinação e vigor do lote de sementes, é provável que boa parte das sementes que não se esperava que germinasse e vigorasse conseguiram completar o crescimento inicial com sucesso, elevando o estande.

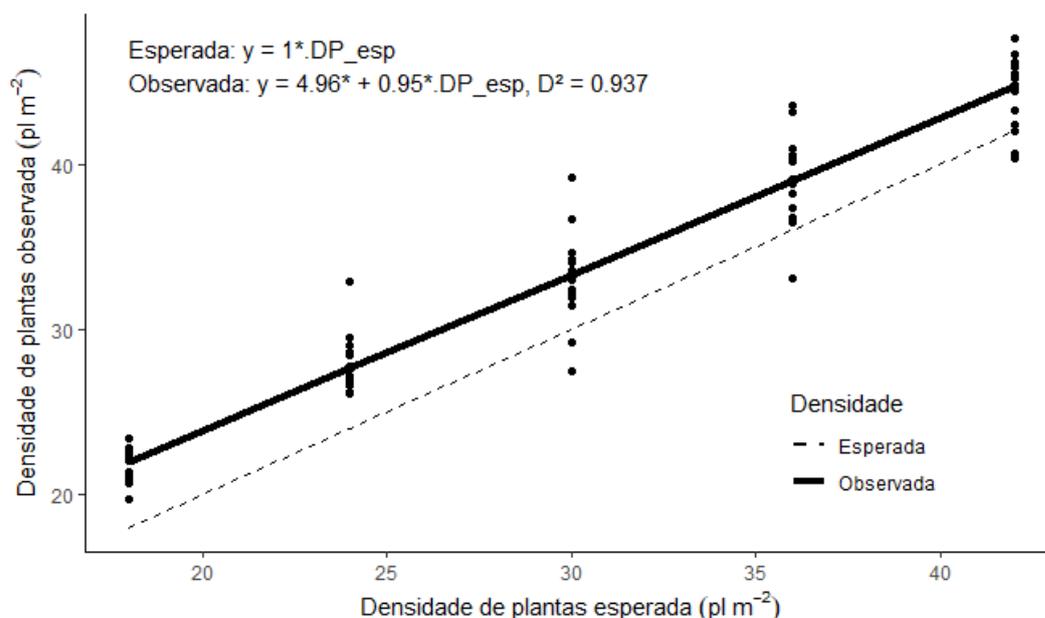


Figura 10. Relação entre a densidade de plantas esperada e a encontrada na soja. Os pontos pretos são as amostras que compõe o conjunto de dados. * coeficientes significativos a 5%.

Nota-se também que a diferença proporcional entre a densidade esperada e a observada é maior em baixas populações (20.9% superior a 18 plantas m^{-2}) e suaviza conforme a densidade esperada aumenta (6% superior a 42 plantas m^{-2}), como se observa na Figura 10, tanto que o intercepto foi significativamente superior a zero e o coeficiente angular é menor que um. Isso pode ser explicado pela maior competição por água na linha das densidades altas, dificultando a germinação para sementes de menor qualidade, ou pela dificuldade do mecanismo dosador de sementes em distribuir sementes em doses baixas ou em baixa rotação do sistema, problema que já foi relatado pelo produtor em outras ocasiões ao utilizar essa semeadora para densidades de soja muito baixas. Esse problema do mecanismo dosador deve ser levado em consideração no planejamento de semeadura a taxa variada.

Os tratamentos do fator das parcelas são nomeados pela densidade esperada de plantas (18, 24, 30, 36 e 42 plantas m^{-2}), em ZA as densidades observadas foram respectivamente 21.9, 28, 34, 38.7 e 43.3 e em ZB foram 21.6, 28.6, 32.2, 39.5 e 45.7 plantas m^{-2} . A média para as duas zonas seria 21.8, 28.3, 33.1, 39.1, 44.5 plantas m^{-2} , respectivamente.

De maneira generalizada, houve problemas de distribuição de plantas em todas

as parcelas, pois a soma de falhas e duplas ultrapassou 35% na média geral dos tratamentos, e na grande maioria das parcelas se observou mais de 25% de plantas em estande inadequado (soma de falhas e duplas). O estande inadequado se agrava com o aumento da densidade, principalmente devido ao aumento do número de plantas falhas, como se observa na Figura 11 A, que foi mais expressivo em ZB do que em ZA. Bahry et al. (2020) testaram a desuniformidade de semeadura na soja, considerando falhas e duplas, e concluíram que isso exerce pouca influência na produtividade e parâmetros morfológicos da soja. Também citaram que em densidades de semeadura mais altas podem levar ao aumento da desuniformidade do estande, o que ocorreu neste trabalho.

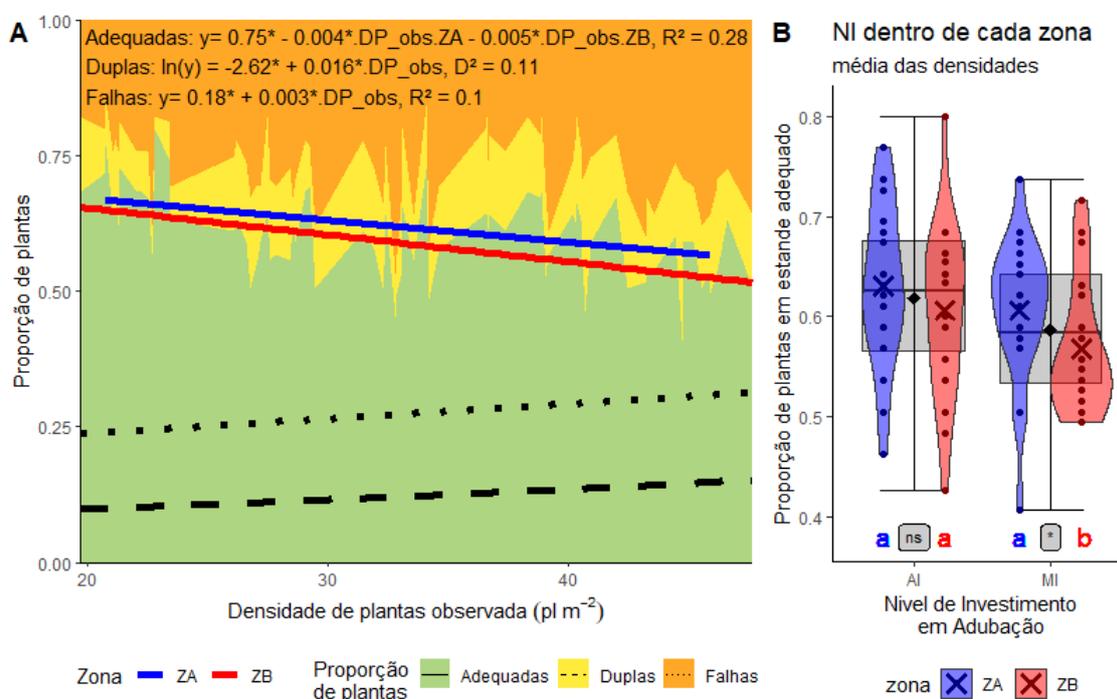


Figura 11. A) Análise de plantabilidade, apresentando a proporção de plantas duplas, falhas e plantas em estande adequado (que não se enquadram como duplas nem falhas), e suas respectivas linhas e equações de regressão, B) Comparação da proporção de plantas em estande adequado entre os níveis de investimento em adubação em cada zona. Os pontos pretos são as amostras que compõe o conjunto de dados, o “x” representa a média. * coeficientes significativos a 5%.

Ao comparar os níveis de investimento em adubação (Figura 11 B), em ZB o tratamento AI teve 6.7% mais plantas em estande adequado que em MI. Em MI, verifica-se que ZA teve estande mais adequado que ZB, diferença que não foi significativa dentro

do tratamento AI. A proporção de falhas e duplas analisadas isoladamente não demonstraram diferença significativa entre as zonas de manejo e níveis de fertilização.

5.3.2 Componentes produtivos

A produtividade de grãos foi 5.4% superior em ZA, como esperado por ser uma zona classificada com potencial produtivo mais elevado. A diferença é maior entre os tratamentos de MI (Figura 12 C), principalmente nas baixas densidades de plantas.

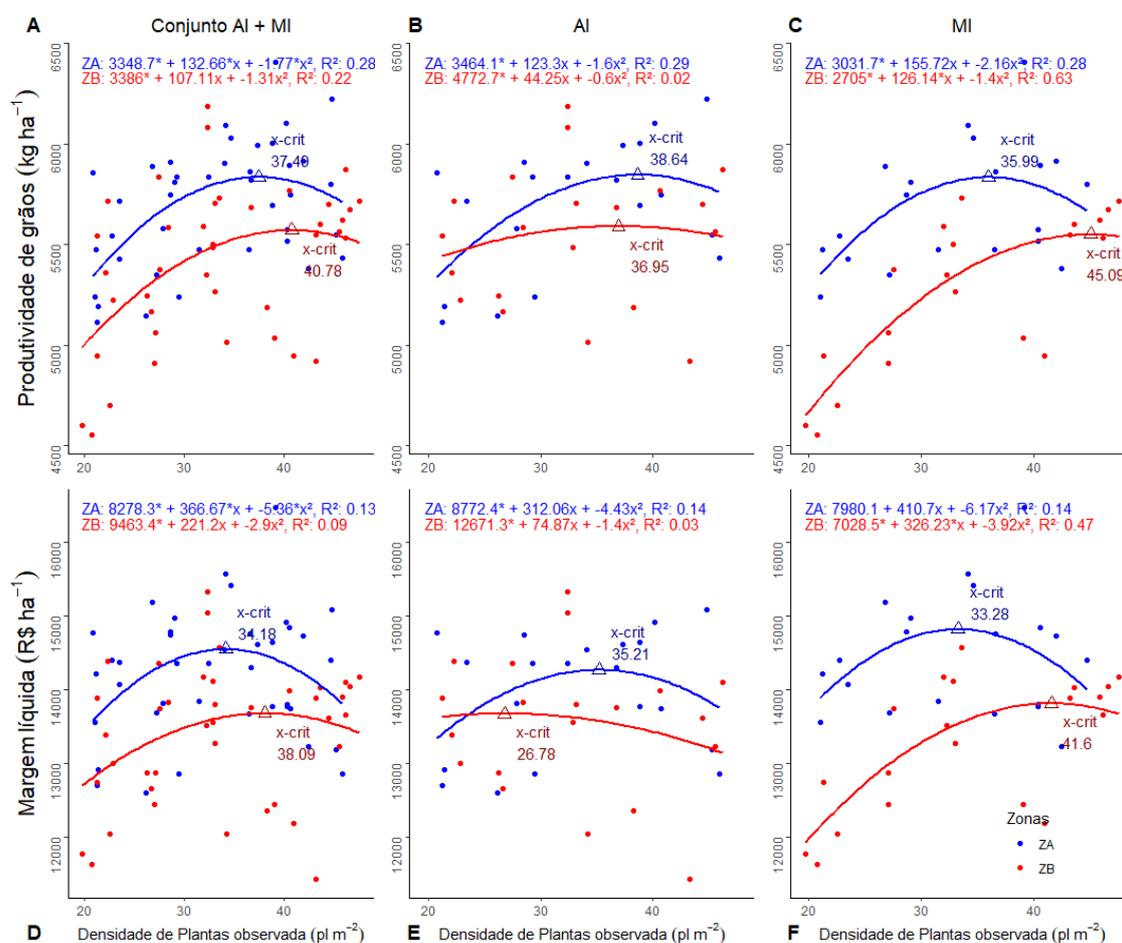


Figura 12. Relação quadrática entre a Produtividade de Grãos (linha superior) e a Margem Líquida da soja (linha inferior) com a Densidade de Plantas observada nas parcelas em cada zona de manejo, comparando os tratamentos de nível de investimento em adubação AI (B, E), MI (C, F) e a união dos dois NI (A, D). * significativos a 5%.

Ao analisar a união dos dados dos tratamentos AI e MI para as variáveis

produtividade e margem líquida em relação à densidade de plantas observada nas parcelas (Figura 12 A e D), percebe-se que a regressão quadrática teve coeficientes significativos para ZA, havendo um valor crítico de densidade bem definido, enquanto para ZB apenas o modelo de regressão linear tem coeficiente angular significativo (dados não mostrados), sugerindo que o valor crítico de densidade esteja mais elevado e necessitaria dados em maiores densidades para a modelagem de uma regressão com efeito quadrático. Analisando a regressão quadrática desse conjunto de dados, foi possível observar um valor crítico de densidade para a obtenção da maior produtividade de 37.5 plantas m⁻² em ZA, 8% a menos que as 40.8 plantas m⁻² em ZB. A maior rentabilidade em ZA é obtida com 10% menos plantas que em ZB, em ambos os casos a densidade ideal está acima das 30 plantas m⁻² recomendadas pelo obtentor da cultivar.

Porém, ao analisar os dados em AI isoladamente (Figura 12 B e E), não se encontra coeficientes significativos para o efeito linear ou quadrático, com exceção da produtividade em ZA em que a regressão linear simples teve coeficiente angular significativo (dados não mostrados), indicando ganho de produtividade com o aumento da densidade. Nos demais tratamentos em AI não foi detectado efeito da densidade de plantas, sugerindo que o aporte de adubação reduziu a possibilidade de resposta da cultura à densidade. Já nas parcelas em MI (Figura 12 C e F), ZB apresentou efeito linear positivo enquanto ZA não apresentou efeito linear ou quadrático para as duas variáveis analisadas. Ressalta-se que, apesar disso, o modelo quadrático se ajusta melhor aos dados de ZA em MI do que o modelo linear (comparação entre modelos pela anava) e seus valores de densidade crítica não diferem muito dos modelos de AI e da união AI + MI, ao contrário dos dados de ZB que se ajustaram bem ao modelo linear e tiveram valores críticos variáveis.

Carciochi et al. (2019), Corassa et al. (2018) e Gaspar et al. (2020) concluíram que a densidade de plantas que traz a produtividade mais alta com o mínimo de plantas possível (DPAO – densidade de plantas agronomicamente ótima) geralmente é mais baixa em zonas de alto potencial produtivo, e maiores densidades são necessárias em zonas fracas para atingir o pico de produtividade, justificando o uso da taxa variada de sementes.

No experimento de Monteiro et al. (2016), em que foram testadas diferentes doses de adubo formulado NPK em duas densidades de semeadura, verificou-se que a soja semeada em maior densidade teve maior acréscimo de produtividade ao ser adubada com maiores quantidades de NPK, enquanto o resultado do presente estudo demonstrou que

há mais resposta para a adubação em baixas densidades, mas apenas em ZB. Enquanto o tratamento AI traz aumento da produtividade em ZB, não há diferença na rentabilidade em ZB pela variação do NI, é percebida diferença apenas nas densidades de 18 e 24 plantas m⁻² em ZB, pois o aumento no uso de fertilizante proporcionou maior resposta na produtividade.

Com o tratamento de AI, ZA e ZB tiveram rentabilidades muito próximas, principalmente devido ao aumento dos custos em ZA sem retorno em produtividade. Porém, tanto no tratamento MI quanto na média geral, ZA proporcionou melhor retorno econômico.

Em complemento à análise dos dados utilizando a densidade observada como variável independente, na Figura 13 analisa-se os modelos de regressão quadrática das variáveis margem líquida e produtividade para os mesmos conjuntos de dados, utilizando as médias dos tratamentos de densidade de plantas utilizados no delineamento experimental, sob a denominação densidade de plantas m⁻² esperada. Apesar da regressão não apresentar coeficientes significativos, na maioria dos casos os modelos se ajustaram bem às médias. Observa-se que os valores críticos de densidade respeitam o mesmo comportamento dos modelos utilizando a densidade observada, mas seus valores são mais baixos justamente porque a densidade observada foi maior que a esperada.

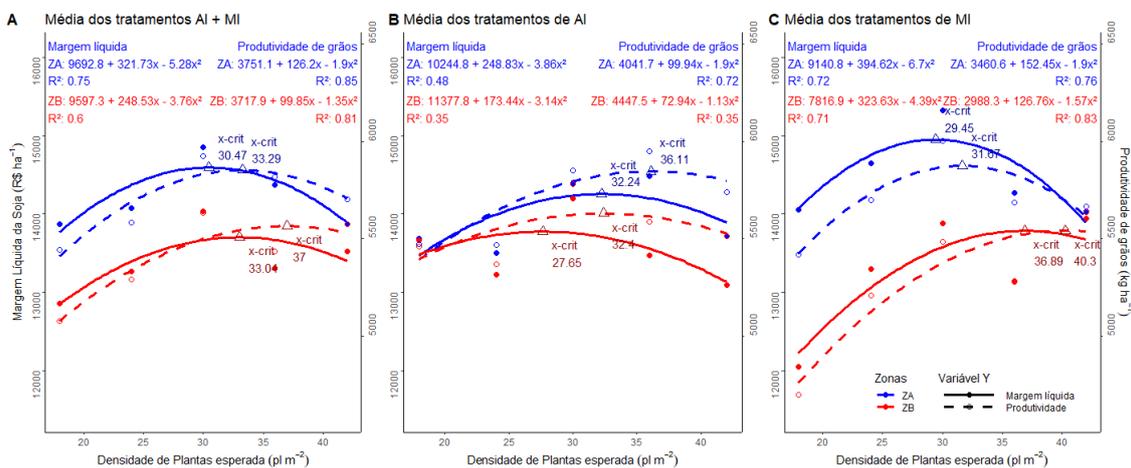


Figura 13. Relação entre a Margem Líquida da soja (eixo esquerdo) e a Produtividade de Grãos (eixo direito) com a Densidade de Plantas esperada em cada zona de manejo, comparando os tratamentos de nível de investimento em adubação AI (B), MI (C) e a união dos dois (A).

A produção de culturas agrícolas, como a soja, geralmente obedece à lei dos rendimentos decrescentes, pois o aumento de um fator de produção, como a taxa de sementes, ocasiona uma resposta na produção da cultura que regride progressivamente, provocando retornos cada vez menores em produção a medida que se investe no fator de produção (CABAS; WEERSINK; OLALE, 2010). O ponto crítico de rentabilidade da soja (DPEO – Densidade de Plantas Economicamente ótima) foi encontrado com densidade de plantas menores que o ponto crítico de produtividade em todas as comparações (Figura 13). O aumento da densidade de semeadura acarretou em maiores custos de semente que, a partir do ponto crítico de rentabilidade, não são compensados pelo aumento de produtividade. Tanto a DPAO quanto a DPEO são encontradas em densidades superiores a 30 plantas m⁻², recomendada pelo obtentor na região.

Nas condições dessa safra, em que não houve problemas relacionados ao acamamento e doenças, assim como o custo da semente foi proporcionalmente baixo em relação aos ganhos com o aporte de produtividade, é aceitável o aumento da densidade de semeadura, tanto em ambientes de baixo quanto de alto potencial de produção, mirando densidades de plantas até 15% acima da recomendada pelo obtentor em zonas de alto potencial de produção e 27% em zonas de baixo potencial, de forma a atingir o máximo de eficiência econômica ao realizar a taxa variável de semeadura. A área com limitações pode ser beneficiada ao ter 10% a mais de plantas que a área de mais alto potencial.

Outros autores, apesar de não terem comparado com uma taxa de semeadura padrão, concluíram que áreas de baixo potencial podem apresentar ganho econômico ao receberem 18% (CORASSA et al., 2018) a 24% (CARCIOCHI et al., 2019) de plantas m⁻² a mais que áreas de bom potencial. Pelos dados aqui apresentados, doses suplementares de fertilizante podem reduzir a resposta das plantas a modificações na densidade, possivelmente por favorecer o desenvolvimento de plantas mais vigorosas e com mais poder compensatório, permitindo o uso de densidades menores de semeadura nessas condições, principalmente em áreas com limitações produtivas. Por outro lado, na agricultura de precisão se busca a otimização das aplicações de fertilizantes, atendendo o mais próximo das reais necessidades do solo e da cultura sem o aporte exacerbado de insumos que acarreta desperdícios, e visto o cenário atual, em que os preços de fertilizantes são mais representativos nos custos da lavoura do que as sementes, é recomendável para o melhor aproveitamento dos fertilizantes usar tecnologias como a taxa variável de semeadura.

A massa de mil grãos apresentou o comportamento de se elevar com o aumento da densidade de plantas, como se observa na Figura 14 A. A análise de regressão identificou efeito para as zonas e para a densidade, tanto observada quanto esperada. Existe uma relação linear positiva entre a densidade de plantas e a MMG, que só não foi significativa para o tratamento AI em ZA. Na união dos dados de AI e MI, a regressão quadrática foi significativa em ZA, atingindo o pico de MMG aos 38.4 pl m⁻², próximo ao pico de produtividade (dados não mostrados). As médias de MMG foram estatisticamente superiores em ZA para quase todas as comparações entre tratamentos, com média geral de 237 g, 5% superior à média de ZB. É possível que a MMG mais elevada em ZA compense o baixo número de vagens para a obtenção de altos tetos produtivos.

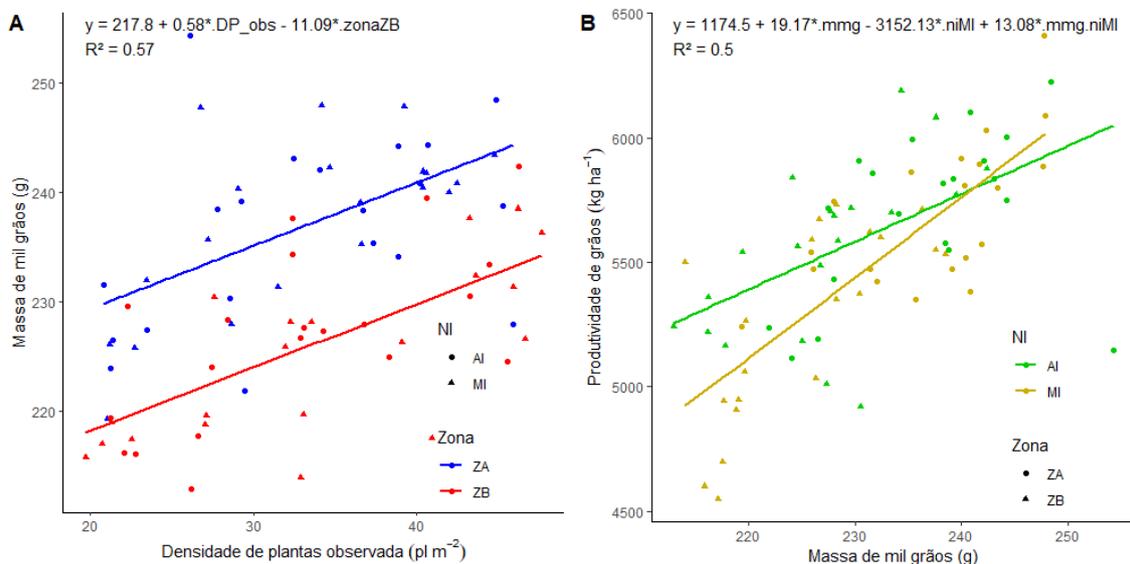


Figura 14. Regressão múltipla da massa de mil grãos (MMG) em função da densidade observada e da produtividade de grãos em função da MMG. * coeficientes significativos a 5%.

O aumento da MMG proporcional à densidade de plantas corrobora com os achados de Bortoli et al. (2013), em que foi encontrada relação quadrática da MMG com a densidade, com pico em densidades mais altas, e com os resultados de Kuss et al. (2008) e Ludwig et al. (2011), os quais a maior densidade obteve o maior peso médio de grãos. Por outro lado, esse resultado demonstra o contrário do observado por Mendes (2019), pois a soja de ciclo indeterminado apresentou regressão linear inversamente proporcional

ao aumento da densidade de semeadura em ambos os ambientes de produção, ou o resultado de Mauad et al. (2010), em que não se encontrou relação.

Um possível motivo para o acontecido em nossos resultados é explicado por Kuss et al. (2008) que, com menor número de vagens por planta nas maiores densidades, associado a condições de déficit hídrico (que aconteceu no final do enchimento de grãos), há maior acúmulo de fotoassimilados nesses grãos, pois a planta direciona o fluxo de fotoassimilados para legumes mais adiantados que teriam chances mais altas de produzir sementes viáveis. Pelos resultados destoantes encontrados na literatura, é de considerar que a relação entre a MMG e a densidade é influenciada por diversos fatores, como genética e condições climáticas no ciclo, e também pode ter relação com a fertilidade do solo ou potencial produtivo da área.

A variável MMG é a que teve maior correlação com a produtividade de grãos, e juntas apresentaram efeito linear positivo, mas que sofre interação com o nível de fertilização (Figura 14 B). É possível interpretar que a produtividade é diretamente dependente da MMG, mas a disponibilidade de nutrientes pode ter influência na definição do potencial produtivo. Considerando os diferentes potenciais produtivos, ZA teve MMG superior em todas as densidades, assim como nos resultados de Carciochi (2019), que consideraram a MMG como um importante componente formador da produtividade.

O número de vagens apresentou um comportamento de redução do número de com o aumento da densidade de plantas, percebido apenas em ZA. Em contraste, ZB não apresentou redução significativa no número de vagens por planta, expressando também o maior número de vagens em todas as densidades e NI, com diferenças maiores nas densidades altas, como se observa na Figura 15 A. Os dados de ZA apresentaram uma clássica distribuição Poisson, enquanto ZB teve dados distribuídos normalmente. Foi constatada grande variação no número de vagens por planta dentro da mesma parcela, e plantas com número abruptamente maior de vagens em comparação com a média foram frequentes, principalmente nas parcelas com menor densidade de plantas. Bortoli et al. (2013), Kuss et al. (2008), Ludwig et al. (2011), Mauad et al. (2010) e Mendes (2019) encontraram tendência de decréscimo do número de vagens por planta com aumento da população, independente das condições.

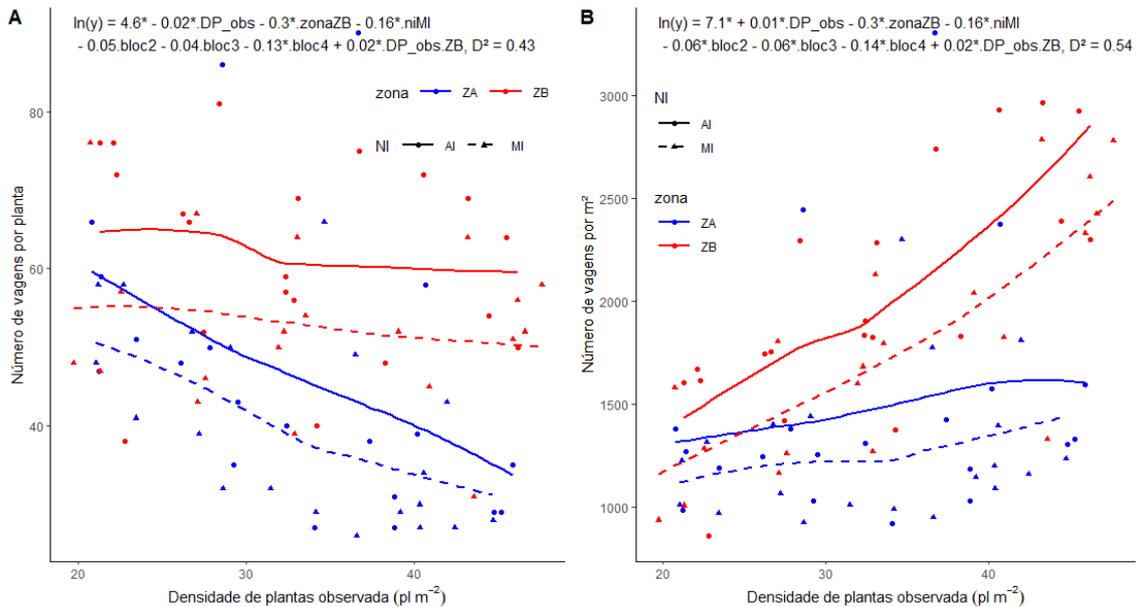


Figura 15. Regressão múltipla do número de vagens por planta (A) e por metro quadrado (B). O efeito de blocos foi significativo nessas regressões, pois isso há coeficientes que multiplicam as variáveis qualitativas denominadas pelo nome dos blocos. * coeficientes significativos a 5%.

Ao multiplicar o número de vagens por plantas pela densidade de plantas por unidade de área, nota-se que o número de plantas por m² se eleva proporcional ao aumento da densidade (Figura 15 B), demonstrando interação entre as zonas de manejo. Em ZB, baixas densidades prejudicam muito a quantidade de vagens por m², em relação ao encontrado em altas densidades, enquanto em ZA consegue manter uma razão de vagens por m² mais estável com a variação da densidade. Esse pode ser um dos componentes produtivos que explica a necessidade de densidades mais altas em zonas de baixo potencial produtivo. O fato de ZA apresentar menor densidade de vagens pode indicar que outros componentes produtivos são relativamente mais importantes na definição do potencial produtivo.

O acréscimo de vagens por planta e por m² em ZB podem estar relacionados com o estande desuniforme e limitações edáficas. Caverzan et al. (2018) demonstraram que o número de vagens e sementes por planta é inversamente proporcional à produtividade de grãos, e plantas desenvolvidas em estande mais desuniforme tendem a produzir mais desses componentes produtivos, mas geralmente não tem as maiores produtividades pois a alta produção por planta não compensa nessas situações a baixa densidade de plantas.

A regressão múltipla apontou o nível de investimento como um fator significativo,

em que as médias de AI se mantêm mais elevadas que de MI. Monteiro et al. (2016) encontraram maior número de vagem com o aumento da adubação NPK somente na densidade mais alta, enquanto que na densidade baixa não percebeu-se alteração.

5.3.3 Características Morfológicas

O número de vagem por planta se correlaciona razoavelmente bem com a altura de inserção de vagem, o número de entrenós e o diâmetro de coleto (Figura 16). O número de entrenós (e consequentemente entrenós) se relaciona bem com o número de vagens por planta (Figura 16 B), pois o número de flores é determinado pelo número de nós, portanto esses atributos devem apresentar o mesmo comportamento (MAUAD et al., 2010). A média geral de entrenós não diferiu entre as zonas, portanto em ZB as plantas têm em média mais vagens por entrenó que em ZA, lembrando que vagens também se formam nas hastes laterais e no ápice da haste principal, os quais não foram contabilizados no número de entrenós.

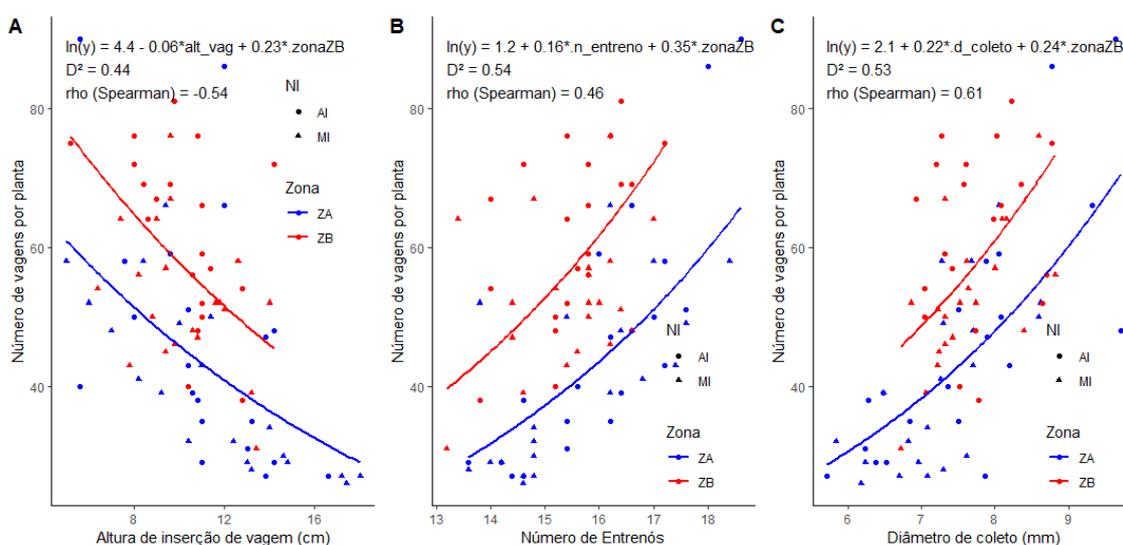


Figura 16. Número de vagens em função de variáveis correlatas: Altura de inserção de vagem (A), Número de entrenós (B) e Diâmetro de coleto (C). * Coeficientes significativos a 5%.

Em ZA houve a presença de maior número de entrenós na haste principal de plantas nas menores densidades (P1 e P2) comparada às demais (P3, P4 e P5). Resultados semelhantes, em que o número de entrenós ou nós decresce com o aumento da densidade

foram encontrados em Mauad et al. (2010) e Bortoli et al. (2013). O aumento da densidade leva a maior competição por luz e menos incentivo ao engalhamento, fazendo com que a planta diminua o número de ramificações e assim menor número de nós. Em ZB o número ficou estável quanto aos dois fatores.

O diâmetro de coleto da soja não apresentou comportamento bem definido quanto aos tratamentos testados. Em ZA foi possível observar diâmetros maiores nas densidades mais baixas (18 e 24 plantas m⁻²) em comparação a densidades mais altas, Martins et al. (1999) também encontrou maior diâmetro de coleto em densidades mais baixas, ao mesmo tempo que afirma que com o aumento da densidade de plantas a tendência é o aumento da altura final da planta, menor o diâmetro da haste principal, menor o número de ramificações, número de vagens por planta e de grãos por vagem. Em P2 o diâmetro do coleto foi superior no tratamento AI, semelhante ao resultado de Monteiro et al. (2016), que verificou o aumento do diâmetro de coleto pela maior adubação na baixa densidade, e sem resposta na alta densidade.

Uma planta com maior diâmetro de coleto pode ter maior capacidade de translocação de nutrientes e sustentação para suportar maior número de vagens, é possível que isso explique a relação linear positiva entre as duas variáveis (Figura 16 C). Ao mesmo tempo, o diâmetro de coleto é positivamente correlacionado com o número de entrenós (Spearman rho = 0.48, dados não mostrados), pois uma planta mais vigorosa, com maior número de entrenós e hastes laterais, precisa de maior sustentação.

Já a redução na altura de inserção de vagem pode ser importante no aumento do número de vagens (Figura 16 A), pois há espaço e axilas disponíveis para a formação de vagens em uma planta em que vagens começam a brotar mais perto do colo.

A altura de inserção da primeira vagem não demonstrou comportamento bem definido quanto à variação da densidade e não apresentou diferenças em função das zonas de manejo ou NI. Apenas em ZA no tratamento MI que essa variável teve resposta crescente proporcional à densidade, semelhante a esse resultado, Mauad et al. (2010) definiram uma correlação linear alta positiva em relação à densidade, segundo eles esse parâmetro tem importância por determinar a regulação da altura da barra de corte da colhedora, e consideram que de 10 a 12 cm (em solo plano) ou até 15 cm (em solo declivoso) seria a altura mínima da primeira vagem para reduzir as perdas na plataforma da colhedora.

As densidades mais altas (P4 e P5) em ZA permitiram a inserção de vagem em

altura suficiente para colheita, mas em ZB nenhum tratamento alcançou o mínimo, no geral a altura de inserção de vagem ficou abaixo do adequado, que provavelmente é uma característica da cultivar de soja escolhida. Monteiro et al. (2016) não encontrou nenhuma influência da densidade e do nível de investimento em adubação sobre a altura de inserção da primeira vagem. O NI influenciou a altura de inserção de vagem apenas no tratamento P1, em que a AI proporcionou maior altura de planta (dados não mostrados).

A altura de planta foi constante ao longo das densidades e dos tratamentos de NI, só foi observada diferença significativa na comparação das médias das zonas de manejo. ZA apresentou altura média de 99.2 cm, 4.7% maior que ZB. Mendes (2019) também encontrou diferença na altura de planta entre os ambientes de produção, mais expressiva nas densidades altas. A maior altura de planta pode ser associada com a incidência de acamamento.

Assim como Monteiro et al. (2016), em ZA não foi encontrada diferença na altura da planta entre as densidades, e também não encontrou-se efeito do NI na altura de planta em nenhum ambiente. A ausência de efeito pode também ser característica de cultivar não responsiva a modificações na altura e tolerância a acamamento. Ao contrário do esperado, em ZB a altura na menor densidade (P1) foi superior a densidades mais altas (P4), comportamento destoante dos resultados de Bortoli et al. (2013), Martins et al. (1999), Mauad et al. (2010) e Mendes (2019), pois entende-se que o aumento da altura de planta ocorre naturalmente pelo fenômeno do estiolamento, em que os entrenós se alongam para alcançarem mais incidência solar e pela dominância apical em detrimento do subdesenvolvimento de gemas laterais.

Inicialmente, o objetivo da avaliação de acamamento era de dar notas de 1 a 5 em função da severidade do acamamento nas parcelas, como na metodologia apresentada por Balbinot Junior et al. (2015), porém devido à baixa severidade observada, foram dadas apenas notas de ausência de acamamento ou leves sintomas de acamamento. Foi utilizada a análise de regressão logística para encontrar a probabilidade da presença de acamamento leve e a razão de chances para cada fator (Figura 17).

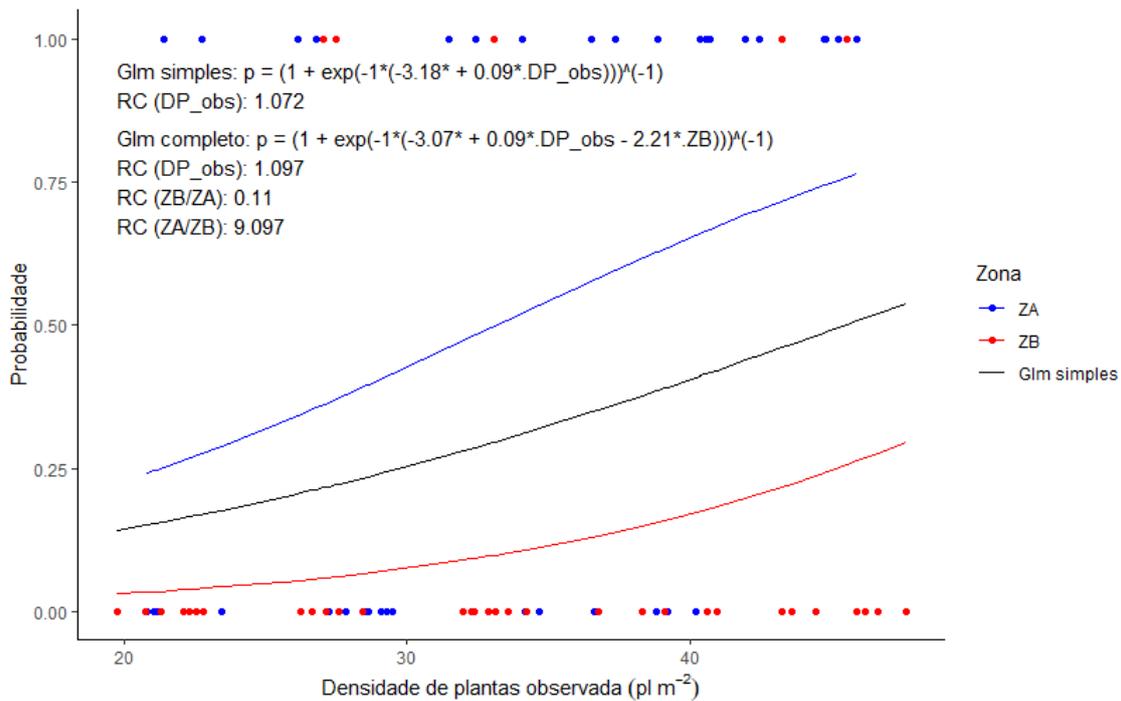


Figura 17. Probabilidade de ocorrência de acamamento em plantas de soja em função da densidade de plantas e da zona de manejo. Glm simples é o modelo linear generalizado que não utiliza as zonas como fonte de variação e glm completo adiciona esses parâmetros. RC é a razão de chance da ocorrência do evento acamamento em um tratamento em relação ao outro ou em relação a uma unidade a menos da variável independente contínua.

O fator nível de fertilização não contribuiu ao modelo, enquanto o fator zonas de manejo e densidade de plantas foram significativos, sendo que o modelo mais completo, sem a interação, é o de melhor ajuste. Como se observa na Figura 17, a cada planta adicional por m², a chance de acamamento se é 1.1 vezes maior, indicando que o aumento da densidade proporciona maior risco de acamamento, mesmo que leve, nessa cultura. A chance de ocorrer acamamento em ZA é 9.1 vezes mais alta que em ZB. Os dados mostram que mesmo uma cultivar de soja com resistência ao acamamento (BRASMAX GENÉTICA, 2022), o acamamento pode incidir dependendo do ambiente de produção e da densidade. Isso evidencia necessidade de levar o risco de acamamento em conta ao planejar uma operação com taxa variável de semeadura.

7 CONCLUSÕES

A diferença no potencial produtivo das ZM foi causada principalmente por fatores físicos do solo que afetam mais intensamente a camada de solo próxima aos 0.15 m de profundidade.

A produtividade e rentabilidade do ambiente de menor potencial produtivo pode ser favorecida pelo aumento da densidade de plantas de soja em relação ao ambiente de maior potencial produtivo.

Investimento suplementar em adubação tem pouca probabilidade de trazer benefício econômico.

O acamamento é mais frequente em densidades mais altas e em área de maior potencial produtivo.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A camada de solo próxima aos 0.15 m de profundidade em ZB tem menor qualidade física que em ZA e pode estar limitando o desenvolvimento das plantas, portanto a diferença no potencial produtivo das ZM foi causada principalmente por fatores físicos do solo.

A maior produtividade e rentabilidade são atingidas em ambas as ZM com densidades de plantas pelo menos 15% acima da recomendada pelo obtentor. Entre as ZM é esperado ganho econômico em ZB ao elevar a densidade de plantas em 10% em comparação com ZA.

Maior investimento em adubação pode trazer aumento de produtividade em áreas com limitações produtivas, mas a possibilidade de retorno econômico utilizando densidades de plantas adequadas é pouco provável, com os aumentos nos preços dos fertilizantes, o investimento em maiores densidades de plantas em zonas fracas deve trazer maior retorno que o uso de fertilizantes além do exigido pela cultura e pelo solo.

Em áreas com alto potencial produtivo, enquanto não há limitações causadas pela ausência de fertilidade química do solo, é pouco provável que haja ganho de produtividade com o aumento da fertilização acima do necessário, e é provável a redução da rentabilidade.

O tratamento NI não provocou alterações morfológicas perceptíveis nas plantas. Os parâmetros morfológicos altura de planta, altura de inserção de vagem, número de entrenós e vagens por planta não apresentaram efeito da densidade em ZB, mas em ZA alguns desses variaram conforme a densidade, indicando maior plasticidade das plantas em ambiente mais fértil.

O maior número de vagens por planta e menor MMG são componentes produtivos associados com o potencial produtivo mais baixo de ZB. Em função do aumento da densidade, em ZA apenas o componente MMG se eleva, provocando maiores produtividades, enquanto em ZB há elevação da MMG e do número de plantas m^{-2} , o que explica em partes a maior produtividade em densidades mais altas.

A ocorrência de acamamento em lavouras de soja é mais comum em densidades de plantas elevadas e em áreas de maior potencial produtivo, isso deve ser levado em consideração ao realizar a taxa variada de semeadura com cultivares suscetíveis a acamamento.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBA, J. M. F. Modelagem SIG em agricultura de precisão: conceitos, revisão e aplicações. Em: **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. 1. ed. Brasília, DF: Embrapa Instrumentação, 2014. p. 85–96.

APARECIDO, L. E. DE O. et al. Köppen, Thornthwaite and Camargo climate classifications for climatic zoning in the State of Paraná, Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 40, n. 4, p. 405–417, ago. 2016.

BAHRY, C. A. et al. Performance of soybean due to variability in the spatial distribution of plants / Desempenho da soja devido à variabilidade na distribuição espacial de plantas. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 5, p. 29235–29250, 20 maio 2020.

BALBINOT JUNIOR, A. A. et al. Espaçamento reduzido e plantio cruzado associados a diferentes densidades de plantas em soja. **Embrapa Soja-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 2015.

BARBOSA, A. M. et al. modEvA: Model Evaluation and Analysis. 2016.

BARETA JUNIOR, E. et al. Critical limits of soil physical attributes for corn and black oat in a Xanthic Hapludox. **Revista Ciência Agronômica**, v. 53, n. 0, p. 1–10, 2022.

BERNARDI, A. DE C. et al. **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. 1. ed. Brasília, DF: Embrapa Instrumentação, 2014.

BHERING, S. B. et al. **Mapa de solos do estado do Paraná**. Embrapa Solos - Documentos (INFOTECA-E), 2007. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/339505>>. Acesso em: 15 set. 2020

BORTOLI, L. T.; ASSMANN, E.; CREPALLI, M. DA S. Efeito da densidade populacional sobre os componentes de produção e vegetativos na cultura da soja [Glycine max (L.) Merrill]. **Revista Cultivando o Saber**, v. 6, n. 4, p. 224–236, 2013.

BRASMAX GENÉTICA. **Cultivares selecionadas para o máximo rendimento — BRASMAX ZEUS IPRO 55i57RSF**. BRASMAX Genética, 2022. Disponível em:

<<https://www.brasmaxgenetica.com.br/>>. Acesso em: 11 fev. 2022

BROCH, D. L.; RANNO, S. K. Fertilidade do solo, adubação e nutrição da cultura da soja. **Tecnologia de produção de soja e milho**, v. 2009, p. 5–36, 2008.

BUTZEN, S. Variable-Rate Seeding Considerations for Soybeans. **DuPont Pioneer Agronomy Sciences**, p. 2, 2016.

CABAS, J.; WEERSINK, A.; OLALE, E. Crop yield response to economic, site and climatic variables. **Climatic Change**, v. 101, n. 3, p. 599–616, 1 ago. 2010.

CARCIOCHI, W. D. et al. Soybean Seed Yield Response to Plant Density by Yield Environment in North America. **Agronomy Journal**, v. 111, n. 4, p. 1923–1932, 2019.

CAVERZAN, A. et al. How Does Seed Vigor Affect Soybean Yield Components? **Agronomy Journal**, v. 110, n. 4, p. 1318–1327, 2018.

CORASSA, G. M. et al. Optimum Soybean Seeding Rates by Yield Environment in Southern Brazil. **Agronomy Journal**, v. 110, n. 6, p. 2430–2438, 2018.

DA SILVA, N. F. et al. Métodos para Estimativa da Infiltração de Água em um Latossolo sob Plantio Direto e Convencional. **Global Science and Technology**, v. 10, n. 1, 2017.

DAMIAN, J. M. et al. Applying the NDVI from satellite images in delimiting management zones for annual crops. **Scientia Agricola**, v. 77, n. 1, 2020.

DE ALMEIDA, B. G. et al. Padronização de métodos para análise granulométrica no Brasil. **Embrapa Solos-Comunicado Técnico (INFOTECA-E)**, 2012.

DE OLIVEIRA, E. L. **Sugestão de adubação e calagem para culturas de interesse econômico no Estado do Paraná**. Londrina, PR: Instituto Agrônomo do Paraná, 2003.

DE RESENDE, A. V. et al. Aplicações da agricultura de precisão em sistemas de produção de grãos no Brasil. Em: **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. 1. ed. Brasília, DF: Embrapa Instrumentação, 2014. p. 194–208.

DEFRA, D. OF E., Food & Rural Affairs. **Fertiliser manual (RB209)**. 8. ed. Norwich, Reino Unido: TSO, 2010.

FAO. **Food and Agriculture data**. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat>>. Acesso em: 5 set. 2020.

FLORES, C. A.; FILIPPINI ALBA, J. A Pedologia e a Agricultura de Precisão. Em: **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. 1. ed. Brasília, DF: Embrapa Instrumentação, 2014. p. 36–47.

FONTOURA, S. M. V. et al. **Fertilidade do solo e seu manejo em plantio direto do Centro-Sul do Paraná**. 1. ed. Guarapuava, PR: Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária (FAPA), 2015.

FONTOURA, S. M. V. et al. **Fertilidade do solo**. Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária (FAPA), 29 abr. 2020.

FRAISSE, C.; SUDDUTH, K.; KITCHEN, N. Delineation of Site-Specific Management Zones by Unsupervised Classification of Topographic Attributes and Soil Electrical Conductivity. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 44, 1 jan. 2001.

GASPAR, A. P. et al. Defining optimal soybean seeding rates and associated risk across North America. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 3, p. 2103–2114, 2020.

GEBBERS, R.; ADAMCHUK, V. I. Precision Agriculture and Food Security. **Science**, v. 327, n. 5967, p. 828–831, 12 fev. 2010.

GEORGI, C. et al. Automatic delineation algorithm for site-specific management zones based on satellite remote sensing data. **Precision Agriculture**, v. 19, n. 4, p. 684–707, 2018.

GRISSE, R. D. et al. Precision farming tools: variable-rate application. **Virginia Cooperative Extension**, n. Virginia Polytechnic Institute and State University, 2011.

HAMMAN, W. P. **Comparison of Variable Rate Prescriptions and Optimum Seeding Rate in Soybean [*Glycine max* (L.) Merr] and the Impact of Soybean**

Seeding Rate on Combine Fuel Use and Grain Loss at Harvest. Tese—Columbus, OH, EUA: The Ohio State University, 2019.

JEFFRIES, G. R. et al. Mapping sub-field maize yields in Nebraska, USA by combining remote sensing imagery, crop simulation models, and machine learning. **Precision Agriculture**, v. 21, n. 3, p. 678–694, 1 jun. 2020.

KRAMER, L. F. M. et al. Atributos químicos do solo associados à produtividade do trigo em um talhão com diferentes potenciais produtivos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 4, p. 1190–1199, 2014.

KUSS, R. C. R. et al. Populações de plantas e estratégias de manejo de irrigação na cultura da soja. **Ciência Rural**, v. 38, p. 1133–1137, ago. 2008.

LICHT, M. A.; LENSSEN, A. W.; ELMORE, R. W. Corn (*Zea mays* L.) seeding rate optimization in Iowa, USA. **Precision Agriculture**, v. 18, n. 4, p. 452–469, 2017.

LINDSEY, A. J.; THOMISON, P. R.; NAFZIGER, E. D. Modeling the Effect of Varied and Fixed Seeding Rates at a Small-Plot Scale. **Agronomy Journal**, v. 110, n. 6, p. 2456–2461, 2018.

LUCHIARI JUNIOR, A. et al. **Zonas de Manejo: teoria e prática.** Embrapa Instrumentação (ALICE), 2011.

LUDWIG, M. P. et al. Populações de plantas na cultura da soja em cultivares convencionais e Roundup Ready™. **Revista Ceres**, v. 58, p. 305–313, jun. 2011.

MACHADO, O. D. DA C. et al. Accuracy of variable rate planters. **Ciência Rural**, v. 45, n. 7, p. 1205–1213, jul. 2015.

MARTINS, M. C. et al. Épocas de semeadura, densidades de plantas e desempenho vegetativo de cultivares de soja. **Scientia Agricola**, v. 56, p. 851–858, out. 1999.

MARTINS, R. N. et al. Site-specific Nutrient Management Zones in Soybean Field Using Multivariate Analysis: An Approach Based on Variable Rate Fertilization. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 51, n. 5, p. 687–700, 8 mar.

2020.

MATCHAM, E. G. et al. Soil and terrain properties that predict differences in local ideal seeding rate for soybean. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 3, p. 1981–1991, 2020.

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

MENDES, T. F. **PRODUTIVIDADE DE CULTIVARES DE SOJA EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DA DENSIDADE DE PLANTAS**. Dissertação—Rio Verde - GO: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, 28 fev. 2019.

MIAO, Y.; MULLA, D. J.; ROBERT, P. C. An integrated approach to site-specific management zone delineation. **Frontiers of Agricultural Science and Engineering**, v. 0, n. 0, p. 0, 2018.

MIQUELONI, D. P.; GIANELLO, E. M.; BUENO, C. R. P. Variabilidade espacial de atributos e perda de solo na definição de zonas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, n. 1, p. 18–28, 2015.

MOLIN, J. P. **Geração e interpretação de mapas de produtividade para agricultura de precisão**. 2000.

MOLIN, J. P. Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade. **Engenharia Agrícola**, v. 22, n. 1, p. 83–92, 2002.

MOLIN, J. P.; DIAS, C. T. DOS S.; CARBONERA, L. Estudos com penetrometria: Novos equipamentos e amostragem correta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 5, p. 584–590, 2012.

MONTEIRO, A. N. L. et al. Densidade de plantas e doses de NPK nos componentes de produção de soja-hortaliça na Savana de Roraima. **REVISTA AGRO@MBIENTE ON-LINE**, v. 9, n. 4, p. 352–360, 5 fev. 2016.

NAWAR, S. et al. Delineation of soil management zones for variable-rate fertilization: A review. Em: **Advances in agronomy**. [s.l.] Elsevier, 2017. v. 143p. 175–

245.

NEPAR-SBCS. **Manual de adubação e calagem para o Estado do Paraná**. 1. ed. Curitiba: Núcleo Estadual do Paraná da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2017.

NEPAR-SBCS. **Manual de Manejo e Conservação do Solo e da Água para o Estado do Paraná**. 1. ed. Curitiba, PR: Núcleo Estadual do Paraná da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019.

NEUMAIER, N. et al. Ecofisiologia da soja. Em: **Tecnologias de produção de soja**. Londrina, PR: Embrapa Soja, 2020.

OLIVEIRA, P. D. D. et al. Critical limits of the degree of compactness and soil penetration resistance for the soybean crop in N Brazil. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 179, n. 1, p. 78–87, 2016.

PAVAN, M. A. et al. **Manual de análise química de solo e controle de qualidade**. Londrina: Iapar, 1992. v. 76

PEREZ, N. B. et al. Condutividade elétrica do solo e produtividade: uso no sistema de integração lavoura-pecuária para determinar zonas de manejo durante o cultivo de soja. **Embrapa Pecuária Sul-Capítulo em livro científico (ALICE)**, 2014.

POTT, L. P. et al. Mitigation of soil compaction for boosting crop productivity at varying yield environments in southern Brazil. **European Journal of Soil Science**, 2019.

R. CORE TEAM. R: A Language and Environment for Statistical Computing. 2020, R Foundation for Statistical Computing: 2020, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org>, 2020.

RAMPIM, L. et al. Unidades de manejo em sistema de agricultura de precisão na cultura da soja. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 11, n. 0, p. 70–83, 2012.

RESENDE, A. V. DE. Reflexões sobre adubação fosfatada a taxa variável. **Embrapa Milho e Sorgo-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 2011.

REYNOLDS, W. D. et al. Indicators of good soil physical quality: density and

storage parameters. **Geoderma**, v. 110, n. 1–2, p. 131–146, 2002.

RODRIGUES JUNIOR, F. A. et al. Geração de zonas de manejo para cafeicultura empregando-se sensor SPAD e análise foliar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 8, p. 778–787, 2011.

SANTI, A. L. et al. Definição de zonas de produtividade em áreas manejadas com agricultura de precisão. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 8, n. 3, p. 510–515, 2013.

SANTOS, H. G. DOS et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, DF: EmbrapaORCD, 2018.

SMIDT, E. R. et al. Identifying Field Attributes that Predict Soybean Yield Using Random Forest Analysis. **Agronomy Journal**, v. 108, n. 2, p. 637–646, 2016.

SPADER, V. et al. **Soja**. Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária (FAPA), 29 abr. 2020. Acesso em: 16 set. 2020

SPLIETHOFF, J. et al. Ferramenta auxiliar. **Revista Cultivar Máquinas**, v. 16, n. 187, p. 16–19, ago. 2018.

UHRY, D. **Avaliação e critério para a utilização de semeadora com sistema de taxa variável de sementes na cultura da soja**. Dissertação—Santa Maria, RS, Brasil: UFSM, 2013.

VON PINHO, R. G. et al. Avaliação agronômica do cultivo de milho em diferentes níveis de investimento. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 33, n. 1, p. 39–46, 2009.

WICKHAM, H. ggplot2. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics**, v. 3, n. 2, p. 180–185, 2011.