

**GUSTAVO FERREIRA DA SILVA**

**ADUBAÇÃO NITROGENADA EM SORGO BIOMASSA ANTECEDENDO A SOJA  
EM SISTEMAS DE MANEJO DE LONGA DURAÇÃO**

**Botucatu**

**2023**



**GUSTAVO FERREIRA DA SILVA**

**ADUBAÇÃO NITROGENADA EM SORGO BIOMASSA ANTECEDENDO A  
SOJA EM SISTEMAS DE MANEJO DE LONGA DURAÇÃO**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia (Agricultura).

Orientador: Prof. Dr. Juliano Carlos Calonego

Coorientador: Prof. Dr. Fernando Ferrari Putti

**Botucatu**

**2023**

S586a Silva, Gustavo Ferreira da  
Adubação nitrogenada em sorgo biomassa antecedendo a soja em sistemas de manejo de longa duração / Gustavo Ferreira da Silva. -- Botucatu, 2023  
174 p. : il., tabs.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu  
Orientador: Juliano Carlos Calonego  
Coorientador: Fernando Ferrari Putti

1. Manejo do solo. 2. Adubação em sistema de produção. 3. Propriedades físico-hídricas do solo. 4. Plantio direto. 5. Relação solo e planta. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Botucatu



**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

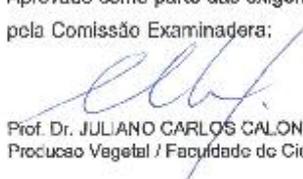
TÍTULO DA TESE: ADUBAÇÃO NITROGENADA EM SORGO BIOMASSA ANTECEDENDO A SOJA EM SISTEMAS DE MANEJO DE LONGA DURAÇÃO

**AUTOR: GUSTAVO FERREIRA DA SILVA**

**ORIENTADOR: JULIANO CARLOS CALONEGO**

**COORIENTADOR: FERNANDO FERRARI PUTTI**

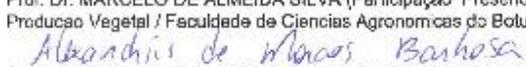
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Agronomia (Agricultura), pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. JULIANO CARLOS CALONEGO (Participação Presencial)  
Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu UNESP

Pesquisador Dr. HENRIQUE DEBIASI (Participação Virtual)   
Centro Nacional de Pesquisa de Soja / Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

Pesquisador Dr. EMERSON BORGHI (Participação Virtual)   
Núcleo de Desenvolvimento de Sistemas de Produção / Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

Prof. Dr. MARCELO DE ALMEIDA SILVA (Participação Presencial)   
Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu

  
Prof. Dr. ALEXANDRIUS DE MORAES BARBOSA (Participação Presencial)  
Produção Vegetal / Universidade do Oeste Paulista

Botucatu, 26 de janeiro de 2023



*Aos meus pais, Manoel e Maria Valdineia, e a minha irmã  
Gabrieli, por todo o carinho, incentivo, apoio e esforço para que eu  
chegasse até aqui.*

*Ao Happy e Natasha, meus companheiros inseparáveis e leais.*

***Dedico.***



## AGRADECIMENTOS

A Deus por tudo que me proporcionou, por cada experiência, pelas oportunidades e por tudo que me permitiu viver e aprender.

Aos meus pais e minha irmã. Pessoas com as quais cresci aprendendo tudo que sei hoje. Com suas lições de vida, me fazendo a pessoa que sou, sempre tentando ser um motivo de orgulho e aprendendo também a não perder a essência do viver de maneira simples, construindo meu caráter, seguindo seus exemplos.

Ao Professor Doutor Juliano Carlos Calonego, meu orientador. Obrigado pela orientação, ensinamentos e exemplo de profissional e pessoa. Sua conduta e forma de acolher seus orientados é única e incomparável. Agradeço pela confiança, pelas palavras de incentivo, por toda ajuda e ensinamentos desde o mestrado, que sempre me impulsionaram.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Fernando Ferrari Putti, por toda ajuda, contribuição e parceria. Obrigado pelos ensinamentos, correções, oportunidades, momentos de descontração e pela amizade.

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

À Faculdade de Ciências Agrônômicas – UNESP – Botucatu/SP pelas condições oferecidas e pela possibilidade de realização deste curso.

Ao Bruno Cesar Ottoboni Luperini por toda paciência, confiança, dedicação, compreensão, amizade, conselhos, pelas palavras sinceras, por me ouvir e pelo carinho. Agradeço a Deus a oportunidade de conhecê-lo.

Aos meus leais e amorosos “cãopanheiros” de todos os dias, Natasha e Happy. Obrigado por todo amor, carinho, parceria e pelas divertidas conversas. Ter a companhia de vocês é um dos melhores presentes que já recebi da vida. Não consigo imaginar a mim mesmo sem todo o seu carinho, suas brincadeiras, suas manias e, principalmente, sua lealdade. Vocês são a melhor parte da minha vida!

À Larissa Chamma, minha amiga de todos os momentos. Minha parceira de experimentos em campo e laboratório. Os momentos que dividimos durante esta jornada foram únicos, e sem dúvida passamos por muitas coisas. Que bom poder contar contigo sempre, para tudo e em todas as horas.

À Ana Paula Matusevicius, Bárbara Fernanda da Silva e Eriene Romeiro Alves, pelos bons momentos, momentos estes de muitas risadas e conversas. Obrigado pela ajuda e amizade durante esta trajetória, por serem companhia quando nós nos encontrávamos distantes dos familiares.

Ao Prof. Dr. Cassiano Cremon e à Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Nilbe Carla Mapeli por todo ensinamento científico e pessoal, pelo direcionamento e incentivo na pesquisa e pelo exemplo de pessoas. Obrigado por acreditarem em mim e darem o *start* na vida que escolhi seguir.

Aos amigos que conheci na pós-graduação, Daniele Scudeletti, Elizabete de Jesus Pinto, Hugo Mota Ferreira Leite, Igor Vilela, Juslei Figueiredo, Letícia Pastore Mendonça, Lidiane Fernandes Colombari, Lydia Helena da Silva de Oliveira Mota, Michely Alves da Silva, Natália Assunção e Prínscilla Pâmela Nunes Chaves. A todos vocês meu agradecimento pelo acolhimento, amizade e companheirismo.

À equipe de pesquisa do Prof. Dr. Juliano Calonego, em especial aos mestrandos Matheus Froes e Aline Oliveira, e aos estagiários Gabriel Aparecido, Gessica Kaylane, Matheus Simões, Pedro Marton, José Roberto Souza da Silva e Wallas Mendes. Obrigado pela parceria em experimentos e ajuda nas análises.

A todos os funcionários da FEPE, em especial ao Flávio, Rúbia, Dirceu, José Roberto, Silvia, Mauro e Daniel, que sempre com boa vontade me ajudaram na condução do experimento em campo.

Aos docentes e funcionários do Departamento de Produção Vegetal, em especial aos funcionários Adelina, Casimiro, Cirinho, Darieli, Eliane, Iara, Júlia, Talita e Vinícius, por toda ajuda e pelos momentos de descontração que passamos.

Aos funcionários da Seção Técnica de Pós-Graduação, especialmente à Adriana, Débora e Taynan, por toda colaboração nas questões burocráticas.

Aos membros da banca examinadora, pelas sugestões, considerações e contribuições feitas ao trabalho.

Ao laboratório de Ecofisiologia Aplicada à Agricultura (LECA), especialmente ao Prof. Dr. Marcelo de Almeida de Silva, Vicente Mota da Silva e Hariane Luiz Santos, pelas colaborações com as análises fisiológicas.

Ao Prof. Dr. Fernando Ferrari Putti, Renata Fernandes Alves e Yasmin Saegusa Tadayozzi, pelas contribuições nas análises bioquímicas.

À Embrapa Milho e Sorgo, na pessoa do pesquisador Dr. Emerson Borghi, pela parceria e colaboração na condução desta pesquisa.

E lá se foram 1270 dias. Hoje mais do que nunca posso dizer que tenho muito a agradecer. Não foi fácil, tampouco simples chegar até aqui. Sou grato a muitas pessoas e muitas situações com as quais cresci, evolui e aprendi a valorizar, aceitar, entender e principalmente a ter calma, fé e acreditar que as coisas sempre podem melhorar. Agradeço a todos que encontrei nesta caminhada e que de uma maneira ou outra contribuíram para realização deste sonho.

“Racismo é algo que não aparece...mas é visto.

É algo que não está escrito...mas é lido

É algo que não é gritado...mas é ouvido.

É algo que não é tocado...mas é sentido...

É algo que não é dor...mas é doído.

É algo que apenas

quem viu,

leu, ouviu

e sentiu,

sabe dizer o que

é!”



## RESUMO

Uma das principais dificuldades do sistema de semeadura direta (SSD) em condições de clima tropical é a manutenção da palhada sobre o solo, devido à baixa produção de fitomassa da cultura de entressafra e pela rápida decomposição do resíduo vegetal. Neste sentido, o sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] pode ser uma alternativa de cultivo na entressafra, pois possui alta capacidade de produção de fitomassa, mesmo com baixa disponibilidade hídrica. Junto a isso, a adubação nitrogenada em cobertura na cultura em segunda safra, pode maximizar o desenvolvimento do sorgo, com reflexo na cultura sucessora. Diante disso, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da adubação nitrogenada em cobertura no sorgo após soja no verão em sistema de preparo convencional (SPC) e SSD, nas propriedades do solo e no desenvolvimento radicular das culturas, bem como nas respostas fisiológicas, bioquímicas e produtivas e verificar o efeito destes parâmetros na produtividade da soja. O experimento foi conduzido na Fazenda Experimental Lageado (UNESP/FCA - Botucatu-SP), nas safras 2019/20 e 2021/22. O delineamento experimental utilizado foi de blocos casualizados, em esquema de parcelas subdivididas, com quatro repetições. As parcelas foram compostas pelos sistemas de manejo do solo (SPC e SSD). E as subparcelas pela adubação nitrogenada em cobertura no sorgo (0, 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N). Foram avaliadas a produção e persistência de palha do sorgo durante o cultivo da soja, ciclagem de nutrientes pela palhada, aporte de carbono no solo, propriedades físicas do solo, parâmetros fisiológicos, bioquímicos e de produção da soja, cultivada em sucessão ao sorgo. Em SPC a produtividade de fitomassa do sorgo no estágio de pleno florescimento foi maior com a dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N, produzindo em média 37% e 49% a mais que a ausência de aplicação e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, respectivamente. Em SSD a produção de fitomassa foi 36% maior com adubação nitrogenada. O SPC aumentou os teores de carbono orgânico total e particulado em subsuperfície. E o SSD com adubação nitrogenada proporcionou maiores teores das frações de carbono orgânico na camada superficial. O SSD aumentou a qualidade de agregação do solo e dos parâmetros físico-hídricos, principalmente com adubação nitrogenada no sistema de produção. A adubação nitrogenada em cobertura no sorgo com 50 kg ha<sup>-1</sup> aumentou o teor relativo de água na folha de soja, reduziu o

potencial hídrico e resultou em maior eficiência no uso da água, o que refletiu no aumento da produtividade de grãos de soja. O SSD promoveu maior disponibilidade de água às plantas de soja. A produtividade da soja associou-se à ciclagem de nutrientes pela palhada em cobertura, aos teores de nitrogênio total e frações de carbono orgânico no solo, a agregação do solo, as propriedades físicas, desenvolvimento radicular, parâmetros fisiológicos, bioquímicos e aos componentes de produção. Todos estes fatores afetados pela produção de fitomassa da cultura de entressafra. A adubação nitrogenada na dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> em sistema de produção com sorgo e soja melhora as propriedades do solo e favorece o desenvolvimento destas culturas em SSD e SPC, resultando em maior produtividade da soja.

**Palavras-chave:** *Glycine max* (L.) Merrill; *Sorghum bicolor* (L.) Moench; preparo convencional do solo; sistema de semeadura direta; propriedades físico-hídricas do solo.

## ABSTRACT

One of the main difficulties of the no-tillage system (NT) in tropical climate conditions is the maintenance of straw on the soil, due to the low phytomass production of the off-season crop and the rapid decomposition of plant residue. In this sense, sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] can be an alternative for off-season cultivation, as it has a high phytomass production capacity, even with low water availability. Along with this, nitrogen fertilization in top dressing in the crop in the second season can maximize sorghum development, with an impact on the successor crop. In view of this, the aim of this work was to evaluate the effect of topdressing nitrogen fertilization on sorghum after soybean in summer in conventional tillage system (CT) and NT, on soil properties and on the root development of crops, as well as on the physiological, biochemical and productive characteristics of soybean and verify the effect of these parameters on soybean yield. The experiment was carried out at the Experimental Lageado Farm (UNESP/FCA - Botucatu-SP), in the 2019/20 and 2021/22 seasons. The experimental design used was randomized blocks, in a split-plot scheme, with four replications. The plots were composed by soil management systems (CT and NT). And the subplots by topdressing nitrogen fertilization in sorghum (0, 50 and 100 kg ha<sup>-1</sup> of N). The production and persistence of sorghum straw during soybean cultivation, nutrient cycling by straw, carbon input into the soil, soil physical properties, physiological, biochemical and production parameters of soybean grown in succession to sorghum were evaluated. In CT, sorghum phytomass productivity at the full flowering stage was higher with the N dose of 50 kg ha<sup>-1</sup>, producing on average 37% and 49% more than the absence of N application and 100 kg ha<sup>-1</sup> of N, respectively. In NT, phytomass production was 36% higher with nitrogen fertilization. CT increased total and particulate organic carbon levels in the soil subsurface. And, the NT with nitrogen fertilization provided higher levels of organic carbon fractions in soil surface layer. The NT system increased the quality of soil aggregation and physical-hydric parameters, mainly with nitrogen fertilization in the production system. Topdressing nitrogen fertilization in sorghum with 50 kg ha<sup>-1</sup> increased the relative water content in the soybean leaf, reduced the water potential and resulted greater in the water use efficiency, which was reflected in the increase

in soybean grain yield. NT promoted greater water availability to soybean plants. Soybean yield was associated with the nutrients cycling by the cover straw, total nitrogen and organic carbon fractions in the soil, soil aggregation, soil physical properties, root development, physiological and biochemical traits and production components of soybean. All factors are affected by the phytomass production of the off-season crop. Nitrogen fertilization at a dose of 50 kg ha<sup>-1</sup> in a production system with sorghum and soybean improves soil properties and favors the development of these crops in NT and CT system, resulting in higher soybean yield.

**Keywords:** *Glycine max* (L.) Merrill; *Sorghum bicolor* (L.) Moench; conventional tillage; no-tillage; soil physical-hydric properties.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 - Precipitação e temperatura média mensal entre 1985 a 2022 e nas safras 2019/20 e 2021/22 .....42
- Figura 2 - Armazenamento e disponibilidade de água no solo, nas profundidades de 0,00 – 0,10 m (A), 0,10 – 0,20 m (B), 0,20 – 0,40 m (C) e 0,40 – 0,60 m (D), em sistema de preparo convencional do solo e de semeadura direta (SSD), na safra 2019/20 .....81
- Figura 3 - Armazenamento e disponibilidade de água no solo, nas profundidades de 0,00 – 0,10 m (A), 0,10 – 0,20 m (B), 0,20 – 0,40 m (C) e 0,40 – 0,60 m (D), em sistema de preparo convencional do solo e de semeadura direta (SSD), na safra 2021/22 .....82
- Figura 4 - Índice SPAD (SPAD – A e B) e de área foliar (IAF – C e D) de plantas de soja em sistema de preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD), cultivada em sistema de produção com sorgo sem adubação nitrogenada (dose 0) e com 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, na safra 2019/20 .....90
- Figura 5 - Índice SPAD (SPAD – A e B) e de área foliar (IAF – C e D) de plantas de soja em sistema de preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD), cultivada em sistema de produção com sorgo sem adubação nitrogenada (dose 0) e com 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, na safra 2021/22 .....91
- Figura 6 - Teores de clorofila *a* (A), clorofila *b* (B), clorofila total (C) e carotenóides (D) em plantas de soja em sistema de preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD), cultivada em sistema de produção com sorgo sem adubação nitrogenada (dose 0) e com 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, na safra de 2019/20 .....92
- Figura 7 - Teores de clorofila *a* (A), clorofila *b* (B) e clorofila total (C) em plantas de soja em sistema de preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD), cultivada em sistema de produção com sorgo sem adubação nitrogenada (dose 0) e com 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, na safra de 2021/22 .....93
- Figura 8 - Teor de carotenóides em plantas de soja em sistema de preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD), cultivada em sistema de produção com sorgo sem adubação nitrogenada (dose 0) e com 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, na safra de 2021/22 .....94
- Figura 9 - Potencial hídrico (A e C) e teor relativo de água na folha (B e D) de plantas de soja em sistema de preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD), cultivada em sistema de produção com sorgo sem

- adubação nitrogenada (dose 0) e com 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, nas safras de 2019/20 (A e B) e 2021/22 (C e D) .....96
- Figura 10 - Temperatura da folha de plantas de soja em sistema de preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD) cultivada em sistema de produção com sorgo sem adubação nitrogenada (dose 0) e com 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, nas safras de 2019/20 (A e B) e 2021/22 (C e D) .....97
- Figura 11 - Déficit de pressão de vapor (VPDL - A), condutância estomática (*g<sub>s</sub>* - B), taxa de assimilação líquida de CO<sub>2</sub> (A - C), concentração interna de CO<sub>2</sub> na folha (*C<sub>i</sub>* - D), eficiência de carboxilação (*EC* - E), taxa de transpiração (*E* - F) e eficiência do uso da água (*EUA* - G) de plantas de soja em sistema de preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD), cultivada em sistema de produção com sorgo sem adubação nitrogenada (dose 0) e com 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, na safra de 2019/20 .....99
- Figura 12 - Déficit de pressão de vapor (VPDL - A), condutância estomática (*g<sub>s</sub>* - B), taxa de assimilação líquida de CO<sub>2</sub> (A - C), concentração interna de CO<sub>2</sub> na folha (*C<sub>i</sub>* - D), eficiência de carboxilação (*EC* - E), taxa de transpiração (*E* - F) e eficiência do uso da água (*EUA* - G) de plantas de soja em sistema de preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD), cultivada em sistema de produção com sorgo sem adubação nitrogenada (dose 0) e com 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, na safra de 2021/22 .....100
- Figura 13 - Eficiência fotoquímica máxima do fotossistemas II (*F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>* - A), rendimento quântico potencial do fotossistemas II (*F<sub>v</sub>'/F<sub>m</sub>'* - B), coeficiente de extinção não fotoquímico (NPQ - C) e taxa aparente de transporte de elétrons (ETR - D) de plantas de soja em sistema de preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD), cultivada em sistema de produção com sorgo sem adubação nitrogenada (dose 0) e com 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, na safra de 2019/20 .....102
- Figura 14 - Coeficiente de extinção fotoquímico (*q<sub>P</sub>*) de plantas de soja em sistema de preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD), cultivada em sistema de produção com sorgo sem adubação nitrogenada (dose 0) e com 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, na safra de 2019/20 .....103
- Figura 15 - Eficiência fotoquímica máxima do fotossistemas II (*F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>* - A), rendimento quântico potencial do fotossistemas II (*F<sub>v</sub>'/F<sub>m</sub>'* - B), coeficiente de extinção fotoquímico (*q<sub>P</sub>* - C), coeficiente de extinção não fotoquímico (NPQ - D) e taxa aparente de transporte de elétrons (ETR - E) de plantas de soja em sistema de preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD), cultivada em sistema de produção com sorgo sem adubação nitrogenada (dose 0) e com 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, na safra de 2021/22 .....104

- Figura 16 - Teores de peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$  - A e B) e malondialdeído (MDA – C e D) em plantas de soja em sistema de preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD), cultivada em sistema de produção com sorgo sem adubação nitrogenada (dose 0) e com 50 e 100  $kg\ ha^{-1}$  de N, na safra de 2019/20 .....105
- Figura 17 - Teor de peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ) em plantas de soja em sistema de preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD), cultivada em sistema de produção com sorgo sem adubação nitrogenada (dose 0) e com 50 e 100  $kg\ ha^{-1}$  de N, na safra de 2021/22 .....106
- Figura 18 - Teor malondialdeído (MDA) em plantas de soja em sistema de preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD), cultivada em sistema de produção com sorgo sem adubação nitrogenada (dose 0) e com 50 e 100  $kg\ ha^{-1}$  de N, na safra de 2021/22 .....107
- Figura 19 - Atividade das enzimas superóxido dismutase (SOD – A e D), peroxidase (POD – B e E) e catalase (CAT – C e F) em plantas de soja em sistema de preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD), cultivada em sistema de produção com sorgo sem adubação nitrogenada (dose 0) e com 50 e 100  $kg\ ha^{-1}$  de N, nas safras de 2019/20 (A, B e C) e 2021/22 (D, E e F) .....108
- Figura 20 - População de planta (A), altura de planta (B), altura de inserção da primeira vagem (C), número de grãos por vagem (D) e peso de mil grãos (E) de plantas de soja cultivadas em sistema de preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD), na safra de 2019/20 .....109
- Figura 21 - População de planta (A), altura de planta (B), altura de inserção da primeira vagem (C), número de grãos por vagem (D) e peso de mil grãos (E) de plantas de soja cultivadas em sistema de preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD), na safra de 2021/22 .....110
- Figura 22 - População de planta (A), altura de planta (B), altura de inserção da primeira vagem (C), número de grãos por vagem (D) e peso de mil grãos (E) de plantas de soja cultivadas em sistema de produção com sorgo sem adubação nitrogenada (dose 0) e com 50 e 100  $kg\ ha^{-1}$  de N, na safra de 2019/20 .....111
- Figura 23 - População de planta (A), altura de planta (B), altura de inserção da primeira vagem (C), número de grãos por vagem (D) e peso de mil grãos (E) de plantas de soja cultivadas em sistema de produção com sorgo sem adubação nitrogenada (dose 0) e com 50 e 100  $kg\ ha^{-1}$  de N, na safra de 2021/22 .....112
- Figura 24 - Número de vagem em plantas de soja em sistema de preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD), cultivada em sistema de produção com sorgo sem adubação nitrogenada (dose 0) e com 50 e 100  $kg\ ha^{-1}$  de N, nas safras de 2019/20 (A) e 2021/22 (B) ..113

Figura 25 - Produtividade de grãos de soja em sistema de preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD), cultivada em sistema de produção com sorgo sem adubação nitrogenada (dose 0) e com 50 e 100 kg ha <sup>-1</sup> de N, nas safras de 2019/20 (A) e 2021/22 (B) .....	114
Figura 26 - <i>Loading</i> da primeira componente principal das variáveis do grupo de desenvolvimento do sorgo (A e B) e ciclagem de nutrientes (C e D), nas safras 2019/20 (A e C) e 2021/22 (B e D) .....	116
Figura 27 - <i>Loading</i> da primeira componente principal das variáveis do grupo de nitrogênio e carbono orgânico (A e B), agregados (C e D) e física do solo (E e F), nas safras 2019/20 (A, C e E) e 2021/22 (B, D e F) .....	117
Figura 28 - <i>Loading</i> da primeira componente principal das variáveis do grupo de desenvolvimento radicular da soja (A e B), parâmetros fisiológicos (C e D), parâmetros bioquímicos (E e F) e componentes de produção (G e H), nas safras 2019/20 (A, C, E e G) e 2021/22 (B, D, F e H) .....	118
Figura 29 - Dispersão das observações da primeira componente principal dos grupos de variáveis de desenvolvimento do sorgo (A e B) e ciclagem de nutrientes (C e D) sobre a produtividade da soja, nas safras 2019/20 (A e C) e 2021/22 (B e D) .....	120
Figura 30 - Dispersão das observações da primeira componente principal dos grupos de variáveis de nitrogênio e carbono orgânico (A e B), agregados (C e D) e física do solo (E e F) sobre a produtividade da soja, nas safras 2019/20 (A, C e E) e 2021/22 (B, D e F) .....	121
Figura 31 - Dispersão das observações da primeira componente principal dos grupos de variáveis de desenvolvimento radicular (A e B), parâmetros fisiológicos (C e D), parâmetros bioquímicos (E e F) e componentes de produção (G e H) sobre a produtividade da soja, nas safras 2019/20 (A, C, E e G) e 2021/22 (B, D, F e H) .....	122
Figura 32 - Correlação de Pearson entre a produtividade (PROD) e a primeira componente principal do grupo de desenvolvimento do sorgo (DeS), ciclagem de nutrientes (CiC), nitrogênio e carbono orgânico (NCo), agregados (Agr), física do solo (Fís), desenvolvimento radicular da soja (Raiz), parâmetros fisiológicos (Fisio), parâmetros bioquímicos (Bioq) e componentes de produção (Comp), nas safras 2019/20 (A) e 2021/22 (B) .....	123

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 – Sistemas de manejo do solo e rotação de culturas utilizados desde 1985, destacando o manejo e as espécies cultivadas nas estações outono-inverno e primavera-verão de cada ano agrícola .....43
- Tabela 2 – Caracterização química do solo da área experimental .....44
- Tabela 3 – Caracterização granulométrica do solo da área experimental .....45
- Tabela 4 – Produção, persistência e ciclagem de nutrientes<sup>(1)</sup> pela fitomassa de sorgo cultivado sob diferentes doses de nitrogênio em preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD), durante o cultivo da soja nas safras de 2019/20 e 2021/22 .....62
- Tabela 5 – Fitomassa seca de raiz, diâmetro médio radicular, densidade de comprimento radicular e volume radicular de plantas de sorgo cultivadas sob diferentes doses de nitrogênio em preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD) nas safras de 2019/20 e 2021/22, na profundidade de 0,00 – 0,10 m .....64
- Tabela 6 – Fitomassa seca de raiz, densidade de comprimento radicular e volume radicular de plantas de sorgo cultivadas sob diferentes doses de nitrogênio e sob preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD) nas safras de 2019/20 e 2021/22, na profundidade de 0,10 – 0,20 m .....65
- Tabela 7 – Diâmetro médio de raiz de plantas de sorgo cultivadas sob diferentes doses de nitrogênio e sob preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD) nas safras de 2019/20 e 2021/22, na profundidade de 0,10 – 0,20 m .....66
- Tabela 8 – Fitomassa seca de raiz (BSR), diâmetro médio radicular (DMR), densidade de comprimento radicular (DCR) e volume radicular (VR) de plantas de sorgo cultivadas sob diferentes doses de nitrogênio em preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD) nas safras de 2019/20 e 2021/22, na profundidade de 0,20 – 0,40 m .....66
- Tabela 9 – Fitomassa seca de raiz, diâmetro médio radicular, densidade de comprimento radicular e volume radicular de plantas de sorgo cultivadas sob diferentes doses de nitrogênio em preparo convencional do solo

(SPC) e semeadura direta (SSD) nas safras de 2019/20 e 2021/22, na profundidade de 0,40 – 0,60 m .....	67
Tabela 10 – Carbono orgânico total e carbono orgânico associado aos minerais, na profundidade de 0,00 – 0,10 m, em sistema de preparo convencional (SPC) e semeadura direta (SSD), com adubação nitrogenada em sistema de produção .....	69
Tabela 11 – Nitrogênio total (NT) e carbono orgânico particulado (COP), na profundidade de 0,00 – 0,10 m, em sistema de preparo convencional (SPC) e semeadura direta (SSD), com adubação nitrogenada em sistema de produção .....	69
Tabela 12 – Nitrogênio total, carbono orgânico total, carbono orgânico particulado e carbono orgânico associado aos minerais, na profundidade de 0,10 – 0,20 m, em sistema de preparo convencional (SPC) e semeadura direta (SSD), com adubação nitrogenada em sistema de produção .....	70
Tabela 13 – Nitrogênio total (NT), carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COP) e carbono orgânico associado aos minerais (COM), na profundidade de 0,20 – 0,40 m, em sistema de preparo convencional (SPC) e semeadura direta (SSD), com adubação nitrogenada em sistema de produção .....	71
Tabela 14 – Nitrogênio total (NT) e carbono orgânico particulado (COP), na profundidade de 0,40 – 0,60 m, em sistema de preparo convencional (SPC) e semeadura direta (SSD), com adubação nitrogenada em sistema de produção .....	71
Tabela 15 – Carbono orgânico total e carbono orgânico associado aos minerais, na profundidade de 0,40 – 0,60 m, em sistema de preparo convencional (SPC) e semeadura direta (SSD), com adubação nitrogenada em sistema de produção .....	72
Tabela 16 – Agregados maiores que 2 mm ( $Ag > 2$ mm), diâmetro médio geométrico (DMG), diâmetro médio ponderado (DMP) e índice de estabilidade de agregados (IEA), na profundidade de 0,00 – 0,10 m, em sistema de preparo convencional (SPC) e semeadura direta (SSD), com adubação nitrogenada em sistema de produção .....	73
Tabela 17 – Agregados maiores que 2 mm ( $Ag > 2$ mm), diâmetro médio geométrico (DMG) e diâmetro médio ponderado (DMP), na profundidade de 0,10 –	

0,20 m, em sistema de preparo convencional (SPC) e semeadura direta (SSD), com adubação nitrogenada em sistema de produção .....	73
Tabela 18 – Índice de estabilidade de agregados, na profundidade de 0,10 – 0,20 m, em sistema de preparo convencional (SPC) e semeadura direta (SSD), com adubação nitrogenada em sistema de produção .....	74
Tabela 19 – Agregados maiores que 2 mm ( $A_{g>2}$ mm) e diâmetro médio ponderado (DMP), na profundidade de 0,20 – 0,40 m, em sistema de preparo convencional (SPC) e semeadura direta (SSD), com adubação nitrogenada em sistema de produção .....	74
Tabela 20 – Diâmetro médio geométrico e índice de estabilidade de agregados, na profundidade de 0,20 – 0,40 m, em sistema de preparo convencional (SPC) e semeadura direta (SSD), com adubação nitrogenada em sistema de produção .....	75
Tabela 21 – Agregados maiores que 2 mm ( $A_{g>2}$ mm), diâmetro médio geométrico (DMG), diâmetro médio ponderado (DMP) e índice de estabilidade de agregados (IEA), na profundidade de 0,40 – 0,60 m, em sistema de preparo convencional (SPC) e semeadura direta (SSD), com adubação nitrogenada em sistema de produção .....	75
Tabela 22 – Macroporosidade, microporosidade e densidade do solo, na profundidade de 0,00 – 0,10 m, em sistema de preparo convencional (SPC) e semeadura direta (SSD), com adubação nitrogenada em sistema de produção .....	76
Tabela 23 – Porosidade total do solo (PT), capacidade de água disponível (CAD) e resistência do solo à penetração das raízes (RP), na profundidade de 0,00 – 0,10 m, em sistema de preparo convencional (SPC) e semeadura direta (SSD), com adubação nitrogenada em sistema de produção .....	77
Tabela 24 – Macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo, na profundidade de 0,10 – 0,20 m, em sistema de preparo convencional (SPC) e semeadura direta (SSD), com adubação nitrogenada em sistema de produção .....	78
Tabela 25 – Capacidade de água disponível (CAD) e resistência do solo à penetração das raízes (RP), na profundidade de 0,10 – 0,20 m, em sistema de preparo convencional (SPC) e semeadura direta (SSD), com adubação nitrogenada em sistema de produção .....	78

Tabela 26 – Macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro), porosidade total (PT), densidade do solo (DS), capacidade de água disponível (CAD) e resistência do solo à penetração das raízes (RP), na profundidade de 0,20 – 0,40 m, em sistema de preparo convencional (SPC) e semeadura direta (SSD), com adubação nitrogenada em sistema de produção .....	79
Tabela 27 – Macroporosidade e microporosidade, na profundidade de 0,40 – 0,60 m, em sistema de preparo convencional (SPC) e semeadura direta (SSD), com adubação nitrogenada em sistema de produção .....	80
Tabela 28 – Porosidade total (PT), densidade do solo (DS), capacidade de água disponível (CAD) e resistência do solo à penetração das raízes (RP), na profundidade de 0,20 – 0,40 m, em sistema de preparo convencional (SPC) e semeadura direta (SSD), com adubação nitrogenada em sistema de produção .....	80
Tabela 29 – Fitomassa seca de raiz, diâmetro médio e densidade de comprimento radicular de plantas de soja cultivadas sob preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD) e com adubação nitrogenada no sistema de produção, nas safras de 2019/20 e 2021/22, na profundidade de 0,00 – 0,10 m .....	83
Tabela 30 – Volume radicular de plantas de soja cultivadas sob preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD) e com adubação nitrogenada no sistema de produção, nas safras de 2019/20 e 2021/22, na profundidade de 0,00 – 0,10 m .....	84
Tabela 31 – Fitomassa seca de raiz, densidade de comprimento e volume radicular de plantas de soja cultivadas sob preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD) e com adubação nitrogenada no sistema de produção, nas safras de 2019/20 e 2021/22, na profundidade de 0,10 – 0,20 m .....	85
Tabela 32 – Diâmetro médio radicular de plantas de soja cultivadas sob preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD) e com adubação nitrogenada no sistema de produção, nas safras de 2019/20 e 2021/22, na profundidade de 0,10 – 0,20 m .....	86
Tabela 33 – Fitomassa seca de raiz, diâmetro médio, densidade de comprimento e volume radicular de plantas de soja cultivadas sob preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD) e com adubação nitrogenada	

no sistema de produção, nas safras de 2019/20 e 2021/22, na profundidade de 0,20 – 0,40 m .....	87
Tabela 34 – Fitomassa seca de raiz, diâmetro médio, densidade de comprimento e volume radicular de plantas de soja cultivadas sob preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD) e com adubação nitrogenada no sistema de produção, nas safras de 2019/20 e 2021/22, na profundidade de 0,40 – 0,60 m .....	88
Tabela 35 – Diâmetro médio radicular de plantas de soja cultivadas sob preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD) e com adubação nitrogenada no sistema de produção, nas safras de 2019/20 e 2021/22, na profundidade de 0,40 – 0,60 m .....	89
Tabela 36 – Porcentagem de explicação da primeira componente do grupo de variáveis de desenvolvimento do sorgo, ciclagem de nutrientes, nitrogênio e carbono orgânico, física do solo, desenvolvimento radicular, parâmetros fisiológicos, bioquímicos e componentes de produção da soja .....	115



## Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>29</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>31</b>
<b>2.1</b>	<b>Soja.....</b>	<b>31</b>
<b>2.2</b>	<b>Sorgo.....</b>	<b>32</b>
<b>2.3</b>	<b>Sistemas de manejo do solo .....</b>	<b>35</b>
2.3.1	<i>Sistema de preparo convencional do solo.....</i>	36
2.3.2	<i>Sistema de semeadura direta .....</i>	38
2.3.3	<i>Alterações nas propriedades do solo promovidas pelos sistemas de manejo .....</i>	39
<b>2.4</b>	<b>Adubação nitrogenada em sistemas de produção com soja .....</b>	<b>41</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>44</b>
<b>3.1</b>	<b>Localização e descrição da área experimental.....</b>	<b>44</b>
<b>3.2</b>	<b>Histórico da área e delineamento experimental .....</b>	<b>45</b>
<b>3.3</b>	<b>Condução do experimento .....</b>	<b>47</b>
3.3.1	<i>Cultivo do sorgo biomassa .....</i>	47
3.3.2	<i>Cultivo da soja.....</i>	48
<b>3.4</b>	<b>Avaliações .....</b>	<b>48</b>
3.4.1	<i>Avaliações no sorgo biomassa.....</i>	48
3.4.2	<i>Avaliações na soja .....</i>	49
3.4.2.1	<i>Desenvolvimento radicular .....</i>	50
3.4.2.2	<i>Parâmetros fisiológicos .....</i>	50
3.4.2.2.1	<i>Índice SPAD.....</i>	50
3.4.2.2.2	<i>Índice de área foliar.....</i>	51
3.4.2.2.3	<i>Pigmentos fotossintéticos.....</i>	51
3.4.2.2.4	<i>Teor relativo de água na folha.....</i>	51
3.4.2.2.5	<i>Potencial hídrico na folha .....</i>	52
3.4.2.2.6	<i>Trocas gasosas .....</i>	52
3.4.2.2.7	<i>Parâmetros de fluorescência da clorofila a .....</i>	52
3.4.2.3	<i>Metabolismo oxidativo e atividade enzimática antioxidante .....</i>	53
3.4.2.3.1	<i>Determinação de parâmetros relacionados ao metabolismo oxidativo .....</i>	53
3.4.2.3.2	<i>Atividade enzimática antioxidante .....</i>	54

3.4.2.3.2.1	Superóxido dismutase (SOD – EC 1.15.1.1) .....	54
3.4.2.3.2.2	Peroxidase (POD – EC 1.11.1.7) .....	54
3.4.2.3.2.3	Catalase (CAT – EC 1.11.1.6) .....	55
3.4.2.4	Componentes de produção e produtividade .....	55
3.4.3	<i>Avaliações no solo</i> .....	56
3.4.3.1	Nitrogênio total no solo e fracionamento físico da matéria orgânica ....	56
3.4.3.2	Estabilidade de agregados em água .....	57
3.4.3.3	Propriedades físicas do solo, armazenamento e disponibilidade de água no solo .....	59
<b>3.5</b>	<b>Análise estatística .....</b>	<b>60</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>63</b>
<b>4.1</b>	<b>Produção, persistência e ciclagem de nutrientes pela fitomassa de sorgo biomassa .....</b>	<b>63</b>
<b>4.2</b>	<b>Desenvolvimento radicular das plantas de sorgo biomassa.....</b>	<b>65</b>
<b>4.3</b>	<b>Nitrogênio total no solo e fracionamento físico da matéria orgânica do solo.....</b>	<b>70</b>
<b>4.4</b>	<b>Estabilidade de agregados em água.....</b>	<b>74</b>
<b>4.5</b>	<b>Propriedades físicas do solo, armazenamento e disponibilidade de água no solo .....</b>	<b>78</b>
<b>4.6</b>	<b>Desenvolvimento radicular das plantas de soja.....</b>	<b>85</b>
<b>4.7</b>	<b>Parâmetros fisiológicos das plantas de soja .....</b>	<b>91</b>
<b>4.8</b>	<b>Metabolismo oxidativo e atividade enzimática antioxidante das plantas de soja.....</b>	<b>106</b>
<b>4.9</b>	<b>Componentes de produção e produtividade de grãos das plantas de soja .....</b>	<b>111</b>
<b>4.10</b>	<b>Produtividade da soja: análise multivariada dos dados .....</b>	<b>116</b>
<b>5</b>	<b>DISCUSSÃO .....</b>	<b>127</b>
<b>5.1</b>	<b>Produção de fitomassa aérea e radicular, persistência de palhada e ciclagem de nutrientes pelo sorgo biomassa durante o cultivo da soja .....</b>	<b>127</b>
<b>5.2</b>	<b>Nitrogênio total no solo e fracionamento da matéria orgânica ....</b>	<b>129</b>
<b>5.3</b>	<b>Estabilidade de agregados em água.....</b>	<b>133</b>
<b>5.4</b>	<b>Propriedades físicas do solo, armazenamento e disponibilidade de água no solo .....</b>	<b>134</b>

5.5	Desenvolvimento radicular das plantas de soja.....	136
5.6	Parâmetros fisiológicos das plantas de soja.....	138
5.7	Metabolismo oxidativo e atividade enzimática antioxidativa das plantas de soja .....	142
5.8	Componentes de produção e produtividade de grãos das plantas de soja.....	145
6	CONCLUSÕES .....	150
	REFERÊNCIAS.....	151



## 1 INTRODUÇÃO

A soja [*Glycine max* (L.) Merrill] é uma das principais commodities agrícolas mundial, com grande representatividade econômica. O Brasil é o maior produtor mundial, sendo que para a safra 2022/23 apresenta estimativa de aumento em 15,5% na produção de grãos (CONAB, 2022). Dentre os fatores que interferem no seu desempenho produtivo, encontra-se os sistemas de manejo do solo (BLANCO-CANQUI; RUIS, 2018b; SILVA et al., 2022a).

Os sistemas de manejo do solo interferem nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, de modo a afetar a disponibilidade de água, ar e nutrientes às plantas, com reflexo direto no seu desenvolvimento e produtividade (DEISS et al., 2019; FERREIRA et al., 2021; LEITE et al., 2021; SILVA et al., 2022a).

Existem pesquisas avaliando o efeito de sistemas de manejo do solo, principalmente entre preparo convencional (SPC) e sistema de semeadura direta (SSD), no entanto, a maior parte dos estudos avaliam os efeitos sobre o solo ou a planta, isoladamente (CASTELLINI et al., 2019; DEUSCHLE et al., 2019; FERREIRA et al., 2021; GALDOS et al., 2019), deixando assim uma lacuna a ser preenchida, sobre respostas desses manejos em conjunto, de forma a facilitar o entendimento do sistema solo, água e planta.

Áreas manejadas sob SPC apresentam ambiente mais vulnerável às plantas em condições de estresse hídrico, devido à menor taxa de infiltração de água, menor capacidade de armazenamento e disponibilidade de água para planta (PATRIGNANI et al., 2012; YANG et al., 2018). No entanto, há menor compactação na camada superficial, o que pode favorecer o desenvolvimento das raízes e, conseqüentemente, maior absorção de água e nutrientes, devido à maior exploração das raízes na camada superficial do solo, resultando em aumento da produtividade (FIORINI et al., 2018; SIVARAJAN et al., 2018). Vale ressaltar que os efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo em SPC são temporários, exigindo operações anuais (CALONEGO et al., 2017; HARUNA et al., 2018; INAGAKI et al., 2021).

As áreas cultivadas em SSD, geralmente, apresentam as camadas superficiais mais compactadas, devido ao tráfego de máquinas e implementos agrícolas, porém a ausência de revolvimento do solo proporciona maior continuidade dos poros, tornando a porosidade mais eficiente na movimentação de soluções e gases (GALDOS et al., 2019; HUBERT et al., 2007; OSUNBITAN; OYEDELE; ADEKALU, 2005). Em SSD,

também há maior volume de mesoporos, contribuindo para maior retenção de água (HARUNA et al., 2018). Assim, caracteriza-se como um sistema com maior estabilidade hídrica, oferecendo menor risco à produção (BLANCO-CANQUI; RUIS, 2018b; NOURI et al., 2021; SILVA et al., 2022a).

No entanto, nos ambientes tropicais um dos principais desafios no estabelecimento do SSD é a dificuldade de produção de palha, em razão da baixa produtividade das culturas de outono-inverno. Além disso, as condições climáticas não favorecem a manutenção de resíduos vegetais na superfície do solo (CRUSCIOL et al., 2015; MINGOTTE et al., 2020). Desta forma, há grande dificuldade na escolha das culturas para compor o sistema de sucessão ou rotação de culturas em SSD.

Neste cenário, o sorgo biomassa [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] pode ser uma alternativa de cultivo na entressafra, pois possui alta capacidade de produção de fitomassa, mesmo com baixa disponibilidade hídrica (BORGHI et al., 2020; CARVALHO et al., 2013; OLIVEIRA; OLIVEIRA; XAVIER, 2016; SARTO et al., 2021). Além disso, o sorgo biomassa continua a acumular massa seca após o florescimento (BORGHI et al., 2020). Porém, por ser considerado uma cultura rústica, normalmente, é cultivado em regiões marginais sem os tratos culturais necessários, em especial a adubação, o que reduz seu potencial de produção de fitomassa.

Neste contexto, pesquisas vêm sendo desenvolvidas com intuito de maximizar a produção de fitomassa na entressafra, sendo uma das estratégias a adubação nitrogenada em sistema de produção (PIRES et al., 2022; TANAKA et al., 2019). Contudo, ainda há poucas informações na literatura relacionadas à produção de fitomassa de sorgo biomassa destinada para cobertura do solo, especialmente quando se realiza adubação nitrogenada em diferentes sistemas de manejo do solo.

Desta forma, a hipótese deste trabalho foi que a adubação nitrogenada na cultura do sorgo semeado após a colheita da soja, promove aumento na produção de fitomassa na entressafra e melhoria nas propriedades físico-hídricas do solo, refletindo em aumento na produtividade da soja. E que esse efeito é diferenciado em função dos sistemas de manejo do solo adotados.

Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da adubação nitrogenada realizada na cultura do sorgo de outono-inverno, antecedendo o cultivo da soja no verão em SPC e SSD, nas propriedades físico-hídricas do solo, no desenvolvimento radicular das culturas, nas respostas fisiológicas e bioquímicas, bem como a influência dessas variáveis na produtividade da soja.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Soja

A soja [*Glycine max* (L) Merrill.] pertence à família botânica Fabaceae, é uma planta herbácea e autógama (MÜLLER, 1981). A origem mais provável da soja é a região ao longo do Vale do Rio Amarelo na China, a qual possui expressiva diversidade genética e, dessa forma, acredita-se que seja seu centro de origem primário. A região da Manchúria (noroeste da China), por sua vez, é o centro secundário, onde ocorreu a domesticação da planta (CHUNG; SINGH, 2008).

A soja é uma das principais commodities brasileira, a área plantada no Brasil na safra de 2021/22 cresceu 4,2%, totalizando 43.242,3 mil hectares, com produção de 153.583,2 mil toneladas, o que representa aumento de 22,3% em relação à safra anterior, com produtividade média de 3.551 kg ha<sup>-1</sup>. Para safra 2022/23 espera-se aumento da área plantada em 3,4%, alcançando 42,89 milhões de hectares (CONAB, 2022)

O Brasil é o maior produtor mundial de soja, sendo que a agricultura brasileira é uma das poucas que tem possibilidade de aumentar sua área de cultivo, principalmente nas Regiões Centro-Oeste e Norte, e atualmente para MATOPIBA (Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia) (ARAÚJO et al., 2019).

A vasta área de cultivo da soja no território brasileiro só foi possível devido ao melhoramento genético da espécie. No entanto, devido a esta extensa área de cultivo, o estresse hídrico tem sido um dos principais fatores que afetam negativamente a produtividade desta cultura, em função das variações do volume de chuva entre as regiões brasileiras. A soja tem dois períodos críticos bem definidos em relação ao estresse hídrico, o primeiro é entre a semeadura e a emergência das plântulas e o segundo é no enchimento de grãos (SALINAS et al., 1989). Deficiência ou excesso de água nestas fases comprometem o desenvolvimento e a sua produtividade (FAROOQ et al., 2016; MANAVALAN et al., 2009).

A disponibilidade hídrica é importante ao longo do desenvolvimento da soja, e a necessidade de água aumenta à medida que a planta cresce, atingindo a máxima demanda na fase reprodutiva (NAKAGAWA et al., 2018).

Apesar do destaque do Brasil na produção de grãos de soja, ainda são necessárias pesquisas que busquem soluções tecnológicas para o seu cultivo, com

intuito de maximizar o uso da área agrícola, sem prejudicar a sustentabilidade do agroecossistema. Neste sentido, destacam-se as pesquisas com adubação nitrogenada em sistemas de produção.

Apesar da soja ser pouco responsiva a adubação com nitrogênio, devido à alta eficiência da fixação biológica de nitrogênio (FBN), o N é o elemento requerido em maior quantidade por esta cultura (HUANG et al., 2015; HUNGRIA; MENDES, 2015; MARSCHNER, 2012).

No Brasil, a FBN tem sido explorado com sucesso através do uso de inoculantes com *Bradyrhizobium* spp. para atender as necessidades de N do cultivo da soja, gerando uma economia para o país de aproximadamente 15 bilhões de dólares anuais (HUNGRIA et al., 2015).

Desta forma, mesmo com esta alta eficiência em FBN, é possível que a soja ainda possa ter sua produtividade otimizada, por meio de sistemas de manejo que garantam maior disponibilidade de água às plantas e por sistemas de produção com adubação nitrogenada na cultura antecessora a soja, de modo a maximizar a ciclagem de nutrientes e a qualidade do solo no ambiente de produção.

## 2.2 Sorgo

O sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) é uma planta tropical de dias curtos, pertencente à família das Poaceae, com o metabolismo fotossintético do tipo C4. A temperatura ótima para seu desenvolvimento está entre 16 e 38°C, sendo cultivado principalmente em locais de precipitação anual entre 375 e 625 mm (RIBAS, 2003).

A planta de sorgo possui sistema radicular profundo, podendo chegar até 1,30 m de profundidade e 2 m em extensão lateral, e a existência de sílica na endoderme, lignificação no pedicelo e o volume de pelos absorventes, possibilitam a planta maior tolerância a períodos secos (SINGH et al., 2010).

O ciclo da planta varia entre 90 e 120 dias, dependendo do local onde a cultura é instalada (BORÉM; PIMENTEL; PARRELLA, 2014). No Brasil, seu cultivo é realizado em três épocas: no Rio Grande do Sul, plantado na primavera e colhido no outono; no Brasil Central, semeado em sucessão às culturas de verão, em fevereiro a abril; e no Nordeste, plantado em época de chuva ou de “inverno”, em março (BORÉM; PIMENTEL; PARRELLA, 2014).

O gênero *Sorghum* abrange todos os sorgos de interesse comercial, independente da morfologia e finalidade de sua utilização. O sorgo é agronomicamente dividido em cinco grupos: granífero, forrageiro, vassoura, sacarino e biomassa (BORÉM; PIMENTEL; PARRELLA, 2014). No sorgo granífero a principal finalidade é a produção de grãos, usado principalmente na fabricação de ração animal, porém também pode ser utilizado na fabricação de produtos para alimentação humana. No cultivo do sorgo forrageiro a principal objetivo é a produção de fitomassa para confecção de silagem, massa verde e feno. O sorgo vassoura tem como principal produto a panícula, usada na confecção de vassouras e fabricação de artesanatos. E o sorgo sacarino e biomassa, é utilizado para produção de etanol de primeira e segunda geração, respectivamente, e na cogeração de energia (BORÉM; PIMENTEL; PARRELLA, 2014).

Dentre os grupos comerciais de sorgo, o biomassa apresenta alto potencial de cultivo em ambientes tropicais. O cultivo do sorgo biomassa no Brasil é realizado principalmente pelas indústrias sucroalcooleiras, sendo utilizado para cogeração de energia elétrica e, por vezes, é um importante componente na geração de receita, pois amortizam os elevados custos industriais nesses ambientes produtivos (MAY; SILVA; SANTOS, 2013).

O sorgo biomassa tem ciclo curto (cerca de 150 a 180 dias), é propagado por sementes e permite total mecanização de seus processos de produção, desde o plantio até a colheita. Apresenta capacidade de produzir grande quantidade de fitomassa por hectare e alto rendimento energético (PARRELLA, 2011).

O sorgo biomassa está sendo desenvolvido e melhorado pelo programa de melhoramento genético da Embrapa Milho e Sorgo, com o objetivo de contribuir para o suprimento da demanda nacional de energia, tanto por meio da produção de etanol de segunda geração, como da cogeração de eletricidade (NAIK et al., 2010).

O sorgo biomassa é uma das plantas que melhor satisfazem à demanda de produção de biocombustíveis. Contudo, seu potencial está sendo explorado principalmente para produção de bioenergia. Como visto, esse tipo de sorgo possui alta capacidade de produção de fitomassa, desta forma, pode ser uma espécie estratégica para o uso em SSD, principalmente em ambientes tropicais de produção.

Em ambientes tropicais, onde a decomposição da palhada se torna acelerada, a manutenção da palhada sobre o solo é um grande desafio para sustentabilidade do SSD (CRUSCIOL et al., 2015; MINGOTTE et al., 2020). Neste cenário, o sorgo

biomassa pode ser uma alternativa de cultivo na entressafra, pois possui alta capacidade de produção de fitomassa, mesmo com baixa disponibilidade hídrica (BORGHI et al., 2020; CARVALHO et al., 2013; SARTO et al., 2021).

Pesquisas mostraram que a produção de matéria seca de genótipos pertencentes ao grupo biomassa foi superior aos materiais forrageiros e sacarinos (CAXITO, 2017). Borghi et al. (2020) relataram produção de fitomassa de sorgo biomassa superior a  $6 \text{ t ha}^{-1}$ , com apenas 87 mm de chuva acumulada durante o cultivo. Além disso, verificaram que aos 141 dias após dessecação do sorgo biomassa, ainda havia quantidade de palha sobre o solo superior a  $5 \text{ t ha}^{-1}$ . Os dados obtidos nestes trabalhos reforçam o potencial do sorgo biomassa como cultura de entressafra, principalmente para regiões com períodos intensos de veranicos.

Esse diferencial produtivo está relacionado com a plasticidade fenotípica do sorgo biomassa em resposta às estiagens e ao volume total precipitado, alterando o seu ciclo de crescimento e desenvolvimento para utilizar de forma eficiente a água disponível. É durante a fase vegetativa de crescimento que se manifestam as características da plasticidade fenotípica e, sobretudo, as adaptações modificativas em relação às condições do habitat (CAXITO, 2017). Ao contrário dos demais grupos de sorgo, como o granífero e o forrageiro, o sorgo biomassa tem a capacidade de continuar acumulando fitomassa após o florescimento, o que maximiza seu potencial produtivo (MAY; SILVA; SANTOS, 2013).

Apesar do potencial do sorgo biomassa, seu cultivo ainda é recente no Brasil, quando se compara aos demais grupos de sorgo. Por isso, ainda não há levantamentos à respeito de área plantada, produção e produtividade. Contudo, levantamentos realizados pela CONAB (2022), considerando dados do sorgo granífero, no Brasil, na safra 2021/22 a área de plantio de sorgo foi de 1.072,3 mil hectares, com produção de 2.916,1 mil toneladas e produtividade de  $2.719 \text{ kg ha}^{-1}$ . Para a safra 2022/23 a estimativa é que a área plantada aumente 1,7%, a produção tenha incremento em 1,8% e a produtividade em 12,4%.

Os dados de produtividade, produção e área plantada, segundo estimativas, apontam um cenário promissor para o sorgo, porém com crescimento lento tendo em vista o potencial da cultura, principalmente na nova fronteira agrícola de expansão do agronegócio, a região conhecida como MATOPIBA. Apesar deste cenário estar relacionado ao sorgo granífero, espera-se que o cultivo do sorgo biomassa também seja maximizado, tendo em vista suas potencialidades.

A cultura do sorgo, em especial o biomassa, possui grande potencial de cultivo no Brasil, porém seu manejo, na maioria das vezes é negligenciado, principalmente na adubação, o que acaba prejudicando sua produtividade (BORGHI et al., 2014). Além disso, ainda são necessários estudos voltados às práticas de manejos agrônômicos desta cultura, como a adubação, para maximizar a produção do sorgo do sorgo biomassa.

### **2.3 Sistemas de manejo do solo**

A qualidade do solo é fundamental para a sustentabilidade do sistema de produção. No entanto, estima-se que, aproximadamente um terço dos solos agrícolas do mundo estão afetados pela degradação, seja por meio das propriedades químicas, físicas ou biológicas (NOVARA et al., 2016; PROSDOCIMI et al., 2016). O aumento da degradação dos solos agrícolas está relacionado à intensificação das atividades, principalmente aos sistemas de produção com monocultivo, solo sem cobertura, com revolvimento constante e outras práticas que podem ocasionar erosão, perda da fertilidade e aumento da compactação do solo (PARUELO; BURKE; LAUENROTH, 2001).

A busca por sistemas de produção menos impactantes ao ambiente torna-se cada vez mais intensa na comunidade científica, visando minimizar os impactos sócios-ambientais da agricultura e conciliando alta produtividade das culturas. Dentre as práticas conhecidas e eficazes está o sistema de semeadura direta, com o intuito de mitigar os problemas associados ao preparo convencional do solo (CERDÀ et al., 2020; PALM et al., 2014; PEIXOTO et al., 2020).

Normalmente, sistemas com mínima perturbação do solo, como o sistema de semeadura direta, tende a melhorar a fertilidade e influenciar positivamente na produtividade da cultura (KARLEN et al., 2013). Sistemas de manejo que preconizam a mobilização do solo, como o SPC, diminuem a matéria orgânica (MOS) e aumentam o risco de erosão, afetando os aspectos de qualidade do solo, desenvolvimento das plantas e aumenta a vulnerabilidade das culturas ao estresse hídrico (BODDEY et al., 2010; SILVA et al., 2022a, 2022b).

Em situações de estresse por falta de água, as plantas desenvolvem mecanismos adaptativos que lhes permitem sobreviver sob estas condições. A resposta ao déficit hídrico, bem como a capacidade de recuperação é dependente da

espécie, idade da planta e severidade do estresse (FOSTER et al., 2015), podendo promover alterações morfológicas, fisiológicas e bioquímicas, como manutenção da estabilidade da membrana, ajuste osmótico e acúmulo de fitohormônios (HASANUZZAMAN et al., 2014).

O fechamento estomático é a primeira linha de defesa contra a desidratação. O estresse por seca, e conseqüente fechamento estomatal, leva a exposição de excesso de energia na planta, que, se não for dissipada com segurança, pode causar excitação no centro de reação do fotossistema PSII, levando à fotoinibição (PINHEIRO; CHAVES, 2011; TAKAHASHI; BADGER, 2011).

Além disso, em condições de estresse também há aumento da produção de espécies reativas de oxigênio (EROs), que causam uma seqüência de reações oxidativas, resultando em peroxidação de lipídios, danos à proteínas e material genético, os quais podem levar à morte celular (MONTEIRO et al., 2011). Em resposta aos danos ocasionados pelo estresse oxidativo, as plantas desenvolveram um sistema de defesa, em que se destacam as variações nas atividades de enzimas do sistema antioxidativo, que agem como eliminadores das formas reativas de oxigênio (YOSHIMURA et al., 2004; MURGIA et al., 2004).

A linha de defesa antioxidante enzimática é composta principalmente pelas enzimas superóxido dismutase, peroxidase, catalase, entre outras, bem como por compostos não enzimáticos que, direta ou indiretamente inativam as EROs, como a glutathiona, fitoquelatina, ácido ascórbico, prolina e carotenóides (GRATÃO et al., 2010).

Estes mecanismos de sobrevivência e adaptação (fisiológicos e bioquímicos) ao estresse hídrico podem resultar em decréscimo na produtividade da cultura. Contudo, uma forma de amenizar tais efeitos é a adoção de sistemas conservacionistas de manejo do solo, pois estes estão diretamente relacionados com a capacidade de armazenamento de água no solo e com a disponibilidade desta às plantas.

### **2.3.1 Sistema de preparo convencional do solo**

O sistema de preparo convencional do solo (SPC) se caracteriza pelo revolvimento ou movimentação do solo com determinada frequência, visando

melhorar as condições edáficas para o desenvolvimento da cultura e controlar a incidência de plantas daninhas (DICKY et al., 1992; PHILLIPS et al., 1980).

Pode ser realizado por apenas uma operação, ou por várias com diferentes implementos, geralmente, é uma aração na profundidade de 0,20-0,30 m, seguida de uma gradagem niveladora (TULLBERG, 2010).

Tais operações têm reflexos diretos nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (BLANCO-CANQUI; WORTMANN, 2020; PEIXOTO et al., 2020). Nesse sistema, normalmente, são encontrados menores valores de resistência à penetração em superfície, maior infiltração inicial de água, menor densidade superficial do solo, que juntos contribuem para melhor desenvolvimento da planta (MORAES et al., 2014; SARTORI et al., 2021; SILVA et al., 2022a). E ainda, a inversão de camadas do solo facilita a incorporação de adubos, corretivos e matéria orgânica no solo (TULLBERG, 2010).

O revolvimento da camada do solo, geralmente, visa o rompimento de camadas compactadas, com o objetivo de restabelecer a porosidade original do solo, melhorando a drenagem e penetração das raízes das plantas; destorroamento da camada superficial, aumentando o contato solo-semente e a emergência da plântula; facilita operações de plantio e colheita por meio do nivelamento do terreno; eliminação de plantas daninhas, pragas e doenças presentes na lavoura (HOYT; MONKS; MONACO, 1994).

Este preparo inicial do solo assume papel fundamental no desenvolvimento da planta, criando condições para o desenvolvimento das raízes, por meio da redução da densidade e resistência do solo à penetração (PALM et al., 2014; PEIXOTO et al., 2020).

Porém, o constante tráfego de maquinários e implementos agrícolas contribui para formação de uma camada subsuperficial compactada, que prejudica o desenvolvimento das plantas, também conhecido como pé-de-grade (KELLER et al., 2019). A compactação tem sido apontada como um dos principais fatores da redução da qualidade física e perda de estrutura do solo, afetando o crescimento das plantas e a disponibilidade de nutrientes (CALONEGO et al., 2017; FERREIRA et al., 2021; HU et al., 2018). Sendo esta a forma de degradação da estrutura do solo mais estudada no decorrer dos anos, proveniente de diversos fatores como a intensa mecanização dos cultivos, pisoteio de animais em áreas de pastagem e muitas vezes correlacionada com a mudança em características como densidade do solo,

porosidade total e resistência à penetração, que podem caracterizar o estado de compactação dos solos (AGUILERA ESTEBAN et al., 2019; MORAES et al., 2019b).

Além da formação da camada subsuperficial compactada, o SPC se caracteriza como um sistema não conservacionista do solo, principalmente no que diz respeito a quebra de agregados, risco de erosão, perda de tempo no preparo, custo com combustível, exigência de trator com maior potência e degradação da matéria orgânica (KOMISSAROV; KLIK, 2020; ZHANG et al., 2018).

### **2.3.2 Sistema de semeadura direta**

O sistema de semeadura direta (SSD) é um dos sistemas de manejo do solo mais importantes para a sustentabilidade dos agroecossistemas brasileiros. Segundo a Federação Brasileira de Plantio Direto - FEBRAPDP (2021), a área atual cultivada sob SSD ultrapassa 33 milhões de hectares. O SSD é caracterizado pelo não revolvimento do solo, cobertura permanente do solo e pela rotação de culturas (BLANCO-CANQUI; RUIS, 2018b; PEIXOTO et al., 2020).

O SSD se destacou como uma das principais estratégias de controle da erosão nos solos, tendo como objetivo proporcionar o recobrimento do solo de forma contínua com o uso de restos vegetais provenientes da rotação de culturas, deixando esse resíduo sobre a camada superficial do solo (CASTELLINI et al., 2019; CERDÀ et al., 2020). O conjunto de manejos adotados como a rotação de culturas e a manutenção de uma camada de resíduos orgânicos sobre o solo são capazes de proporcionar lenta decomposição da matéria orgânica e, conseqüente, estabilização dos teores, promovendo melhorias dos atributos químicos, físicos e biológicos do solo (BLANCO-CANQUI et al., 2015; PALM et al., 2014).

A eficácia desse sistema está ligada a diversos fatores, por meio dos resíduos deixados no solo por culturas de rotação ou cobertura e a sua persistência, levando à proteção da superfície do solo. Assim, garantir a correta quantidade de resíduos sob o solo é essencial, principalmente, em períodos de seca, gerando condições benéficas para a cultura sob veranicos e seca (CASTELLINI et al., 2019; PATRIGNANI et al., 2012). Outro importante aspecto do SSD é a diversificação do sistema radicular no solo, que contribuem para formação dos bioporos, contribuindo no desenvolvimento radicular das plantas sucessoras, infiltração de água, aeração do solo e ciclagem de nutrientes ao longo do perfil do solo (GALDOS et al., 2019; ZHANG; PENG, 2021).

No entanto, uma das grandes dificuldades de se manter o SSD com qualidade tem sido a escolha de espécies para uso na rotação que consiga produzir adequada quantidade de palha, que seja persistente e com capacidade de ciclagem de nutrientes, principalmente para o Cerrado brasileiro (PALM et al., 2014; RAHMAN et al., 2020; SILVA et al., 2022c). Em geral, os longos períodos de seca do Brasil Central afetam o desenvolvimento dessas culturas, comprometendo a obtenção de quantidades adequadas de cobertura morta, comprometendo a qualidade e manutenção do SSD (SILVA et al., 2022c).

A quantidade de fitomassa vegetal produzida pelas plantas de cobertura é fundamental para a sustentabilidade do sistema do SSD, e está diretamente ligada as condições climáticas locais. A decomposição acelerada dos resíduos vegetais no Cerrado brasileiro dificulta a manutenção da cobertura sob o solo, assim interferindo também nas propriedades edáficas e no desenvolvimento das plantas (RODRIGUES et al., 2021; SILVA et al., 2022c; VELOSO et al., 2018; VELOSO; CECAGNO; BAYER, 2019).

### **2.3.3 Alterações nas propriedades do solo promovidas pelos sistemas de manejo**

Vários benefícios têm sido verificados a partir uso do SSD em relação ao SPC, como a maior produtividade em longo prazo (CALONEGO et al., 2017; FERREIRA et al., 2021; FRANCHINI et al., 2012; SILVA et al., 2022a), a redução da erosão (DEUSCHLE et al., 2019), a maior retenção da umidade do solo (CASTELLINI et al., 2019; SILVA et al., 2022a), a preservação da agregação do solo (SILVA et al., 2022c), o aumento da capacidade de troca catiônica do solo (DEISS et al., 2019) e a necessidade de menor investimento em fertilizantes minerais (CHEN et al., 2021; WU et al., 2021).

Os solos tropicais, em maior parte, apresentam baixos teores MOS, devido às condições climáticas que promovem a rápida decomposição dos resíduos vegetais incorporados ao solo ou mantidos na superfície (ASSUNÇÃO et al., 2019; RAMOS et al., 2018). Aliado a isso, a distribuição irregular das chuvas e o inverno seco dificultam o aporte de carbono via resíduos vegetais na entressafra, o que torna fundamental o uso de plantas de cobertura (SILVA et al., 2019).

No SSD, o carbono incorporado aos tecidos vegetais, tem sua velocidade de decomposição reduzida, devido à ausência do revolvimento, intensificando o processo de estabilização da MOS (STEWART et al., 2009). Além disso, os agregados do solo não são rompidos, preservando a MOS protegida no seu interior, evitando assim o ataque por microrganismos; desta forma, a formação de cobertura morta permite, dependendo das condições climáticas, não só a manutenção, mas também o aumento no conteúdo de MOS (RAPHAEL et al., 2016; WULANNINGTYAS et al., 2021).

Outro fator importante no SSD que favorece o aumento no teor de MOS, é o fato de se priorizar a rotação de culturas (CHUNG; GROVE; SIX, 2008; PALM et al., 2014). Solos com maior teor de MOS, como os conduzidos em SSD, permitem maior estabilidade do sistema poroso, aumentando a capacidade do solo em suportar cargas sem ter compactação adicional, pois aumenta a força de união entre as partículas, aumentando a estabilidade dos agregados, conseqüentemente, melhorando a qualidade física do solo (FRANZLUEBBERS, 2002).

Os sistemas de manejo envolvendo SSD e SPC afetam as propriedades físicas do solo, interferindo diretamente no desenvolvimento da cultura (SILVA et al., 2022a). Apesar do desenvolvimento continuado e o avanço da tecnologia no SSD, alguns problemas ainda persistem, dentre eles destaca-se a compactação nas camadas superficiais do solo (CALONEGO; ROSOLEM, 2010; PEIXOTO et al., 2019).

A compactação do solo em SPC, normalmente, localiza-se entre 10 e 30 cm de profundidade, enquanto em SSD essa camada de maior densidade, localiza-se mais superficialmente, entre 5 e 12 cm de profundidade (BOGUNOVIC et al., 2018; HARUNA et al., 2018; SIVARAJAN et al., 2018).

A maioria dos trabalhos aponta para uma compactação na camada superficial em SSD, em experimentos de curta duração. Porém, em sistemas já consolidados é esperado que este maior índice de compactação não seja prejudicial ao desenvolvimento das culturas, uma vez que a formação dos bioporos e a continuidade em profundidade, favorece a infiltração e armazenamento de água, o desenvolvimento radicular e, conseqüentemente, o desempenho produtivo da cultura (CALONEGO et al., 2017; GALDOS et al., 2019; KAUTZ, 2015; MORAES et al., 2019a; ZHANG; PENG, 2021).

Em SPC, o revolvimento do solo, na maioria das vezes, aumenta a suscetibilidade à compactação. Pois, a intensa mobilização dos solos traz como consequência sua desagregação superficial, sujeita à formação de uma fina crosta

resultante da dispersão das partículas, e ainda outra camada subsuperficial compactada, resultante tanto da pressão exercida pelo peso dos implementos agrícolas, como pela ação direta dos pneus (GUIMARÃES JÚNNYOR et al., 2019; HU et al., 2018).

Com o aumento da compactação do solo ocorre a redução da porosidade total e o aumento da densidade do solo e da resistência à penetração das raízes. Assim, causando impedimento físico ao desenvolvimento do sistema radicular, restringindo o movimento da água e do ar ao longo do perfil e acelerando o processo erosivo (STONE; SCHLEGEL, 2010).

Entretanto, ainda há carência de resultados mais claros em relação ao potencial do SSD em preservar ou melhorar as propriedades do solo e seus impactos na produtividade das culturas. Assim, fica evidente a necessidade de novos estudos, com a finalidade de esclarecer melhor a dinâmica do solo em SSD, com base em experimentos já consolidados.

#### **2.4 Adubação nitrogenada em sistemas de produção com soja**

O nitrogênio é o nutriente requerido em maior quantidade pela cultura da soja, pois é constituinte de várias moléculas importantes para seu desenvolvimento como proteínas, ácidos nucléicos, alguns hormônios e clorofila (HUANG et al., 2015; MARSCHNER, 2012), sendo que sua deficiência impacta negativamente na produtividade (LI et al., 2018).

A cultura da soja é pouco responsiva a adubação nitrogenada em semeadura ou em cobertura, devido à alta eficiência da fixação biológica de nitrogênio (FBN), por meio da simbiose com bactérias do gênero *Bradyrhizobium* (HUNGRIA; MENDES, 2015).

No entanto, para atender a demanda do crescimento populacional, é necessário aumento na produção agrícola, sem alterar a área plantada e o uso de água e energia, em especial da soja, pois é um das principais commodities mundial (LONG; MARSHALL-COLON; ZHU, 2015; RAY et al., 2013; TILMAN et al., 2011).

O uso da adubação nitrogenada nas demais culturas que compõe o sistema de produção com a soja tem mostrado resultados promissores em relação ao seu desenvolvimento e na qualidade do solo, principalmente em solos tropicais intemperizados, como os do Cerrado brasileiro, em que as culturas agrícolas são

altamente dependentes e responsivas à fertilização com N (CRUSCIOL et al., 2020; FARIAS et al., 2020; PIRES et al., 2022).

A adubação nitrogenada na cultura de entressafra pode aumentar a produção de fitomassa aérea e radicular, assim aumentando o aporte de matéria orgânica e melhorando as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo, refletindo no desempenho produtivo da soja em sucessão (GE; ZHU; JIANG, 2018; PIRES et al., 2022; ZUFFO et al., 2022).

A maior quantidade de resíduos vegetais sobre o solo, contribui para o aumento da umidade, manutenção e melhoria das propriedades físicas e atividade de microrganismos, que uma vez constituídos na matéria orgânica, promovem a liberação de determinados elementos contribuindo na nutrição da cultura em sucessão (CORDEIRO et al., 2022; COSTA et al., 2021; MATEUS et al., 2020; SORATTO et al., 2022).

A adubação nitrogenada na cultura antecessora também melhora o seu desenvolvimento radicular (CHEN et al., 2020). Desta forma, pode favorecer a formação de bioporos e aumentar o aporte de C orgânico, assim melhorando as propriedades físicas do solo, contribuindo no desenvolvimento radicular da cultura em sucessão, com reflexo na produtividade de grãos (COOPER et al., 2021; GALDOS et al., 2019; SILVA et al., 2022b; ZHANG; PENG, 2021).

Como visto, a adubação nitrogenada desempenha papel fundamental no aumento dos níveis de C do solo, principalmente devido ao aumento da produção de fitomassa aérea e radicular (PIRES et al., 2022; ZUFFO et al., 2022). A decomposição desta fitomassa pelos microrganismos depende da atividade de suas enzimas (ZAGO et al., 2018), como a  $\beta$ -glicosidase, que está associada ao ciclo C e atua na etapa final do processo de decomposição da celulose, acelerando a transferência de C do resíduo para o solo (TURNER et al., 2002). E a fertilização com N aumenta a atividade de enzimas como a  $\beta$ -glucosidase (YUAN et al., 2020), assim, contribuindo no aumento da disponibilidade de nutrientes e acelerando a dinâmica de sequestro de C no solo (SOLLENBERGER et al., 2019).

Pires et al. (2022), avaliando o efeito da adubação nitrogenada em sistema de semeadura direta com integração lavoura-pecuária, obtiveram maior produtividade da soja quando houve adubação na pastagem (*Urochloa brizantha*, cv. BRS Piatã). Este incremento esteve associado a melhorias nas propriedades bioquímicas e biológicas do solo, uma vez que, a adubação nitrogenada aumentou a eficiência de utilização do

carbono (C), conforme demonstrado pelo aumento das atividades de  $\beta$ -glicosidase e fosfatase ácida, garantindo maior eficiência de conversão do C residual em C microbiano, resultando em maiores teores de C na biomassa microbiana do solo.

Costa et al. (2021) estudaram o efeito da adubação nitrogenada em forragens tropicais antecedendo o cultivo da soja e concluíram que a aplicação de N nas forrageiras [*U. brizantha* (A. Rich.) Stapf Marandu and *Megathyrus maximus* (Jacq.) B.K. Simon & S.W.L. Jacobs Tanzania] em consórcio ou em cultivo solteiro favoreceu o desenvolvimento das plantas de entressafra, contribuiu na melhoria da fertilidade do solo e aumentou a produtividade da soja em sucessão.

Tanaka et al. (2019), analisando o desempenho da soja cultivada em sistema de produção com adubação nitrogenada na cultura antecessora, constataram aumento na produtividade de grãos da soja em sucessão à *U. brizantha* cv. Marandu e *U. ruziziensis*. Além disso, verificaram que a aplicação de N favoreceu a produção e o acúmulo de nutrientes na fitomassa das culturas de entressafra e, conseqüentemente, melhorou a ciclagem de nutrientes no sistema de produção.

Desta forma, apesar das pesquisas demonstrarem ausência de efeitos significativos da adubação nitrogenada na cultura da soja (por ocasião da semeadura da soja), a adubação nitrogenada em sistema de produção afeta a resposta da soja cultivada em sucessão.

Sendo assim, a adubação nitrogenada em sistemas de produção pode ser uma alternativa para aumentar a eficiência no uso de recursos e melhorar a qualidade do solo. Além disso, fica evidente que a adubação nitrogenada em sistemas de produção favorece o desenvolvimento da soja, no entanto, ainda são necessárias pesquisas que avaliem o potencial e a resposta à adubação com N de outras espécies para cultivo na entressafra, tendo em vista que, um dos desafios dos sistemas que envolvem cobertura do solo com palhada, é a manutenção da fitomassa sobre o solo em quantidade e qualidade satisfatória (PALM et al., 2014; RAHMAN et al., 2020).

Pesquisas envolvendo experimentos de longo prazo em condições de campo em diferentes sistemas de cultivo também são necessárias. Sendo escasso ainda na literatura, o impacto deste manejo na qualidade do grão, na resposta fisiológica e bioquímica da soja em sucessão e o impacto da manutenção desses sistemas de cultivo na sustentabilidade agrícola.

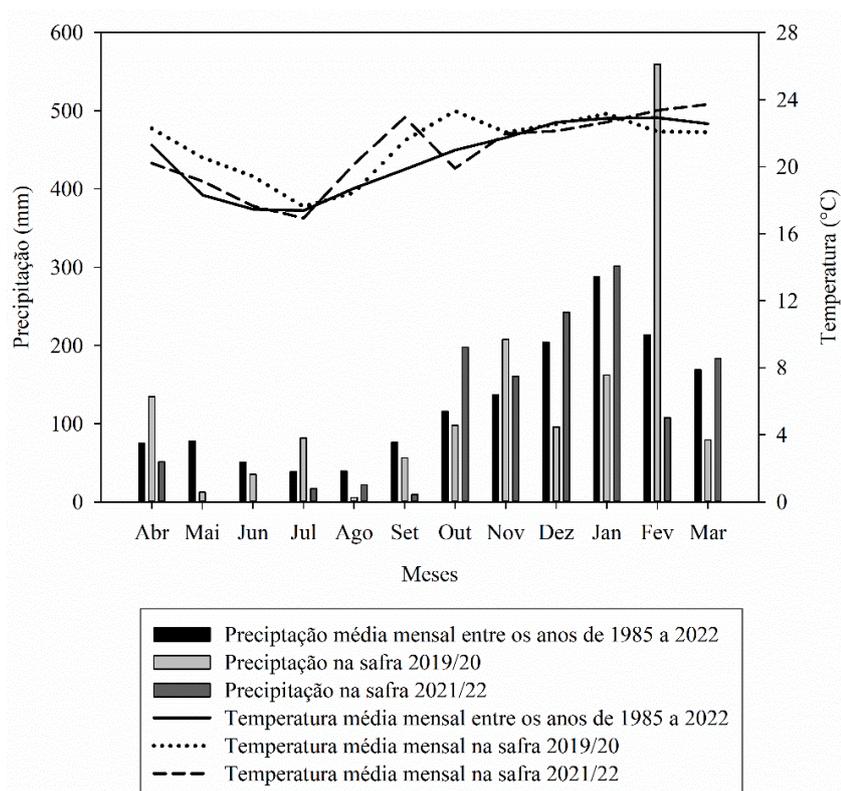
### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Localização e descrição da área experimental

O experimento foi conduzido na área experimental da Fazenda Lageado, pertencente à Faculdade de Ciência Agronômicas (FCA) da Universidade Estadual Paulista (UNESP – Botucatu), durante as safras de 2019/20 e 2021/22. A área está localizada nas seguintes coordenadas: latitude 22°49' S, longitude 48°25' WGrw e altitude de 786 m.

O clima da região, segundo classificação de Köppen, é do tipo Cwa, que significa clima mesotérmico com inverno seco. A estação seca é bem definida e ocorre entre os meses de maio a setembro. A precipitação média anual é de aproximadamente 1.400 mm, com temperatura do mês mais quente superior a 22 °C e a do mês mais frio entre 3 e 18 °C (ESCOBEDO et al., 2009). Os dados de temperatura média e precipitação desde a implantação do experimento e das safras 2019/20 e 2021/22 estão apresentados na Figura 1.

**Figura 1 - Precipitação e temperatura média mensal entre 1985 a 2022 e nas safras 2019/20 e 2021/22**



### 3.2 Histórico da área e delineamento experimental

A área experimental foi conduzida em sistema de semeadura direta (SSD) e sistema de preparo convencional (SPC) desde a safra 1985/86, sendo o histórico de cultivo e operações de preparo do solo apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1 - Sistemas de manejo do solo e rotação de culturas utilizados desde 1985, destacando o manejo e as espécies cultivadas nas estações outono-inverno e primavera-verão de cada ano agrícola**

Ano agrícola	Sistema de manejo				Safra outono-inverno/primavera-verão
	Preparo Convencional		Sistema de semeadura direta		
	Outono	Primavera	Outono	Primavera	
1985/86	Aração + gradagem	Aração + gradagem	Aração + gradagem	Sem preparo	Trigo/soja
1986/87 a 1994/95	Aração + gradagem	Aração + gradagem	Sem preparo	Sem preparo	Trigo/soja
1995/96 a 1998/99	Sem preparo	Sem preparo	Sem preparo	Sem preparo	Pousio/pousio
1999/00	Aração + gradagem	Aração + gradagem	Sem preparo	Sem preparo	Aveia preta/milho
2000/01 e 2001/02	Sem preparo	Sem preparo	Sem preparo	Sem preparo	Pousio/pousio
2002/03 e 2003/04	Aração + gradagem	Aração + gradagem	Sem preparo	Sem preparo	Aveia preta/milheto-feijão
2004/05 e 2005/06	Aração + gradagem	Aração + gradagem	Sem preparo	Sem preparo	Aveia preta/milho
2006/07	Sem preparo	Sem preparo	Sem preparo	Sem preparo	Pousio/soja
2007/08	Aração + gradagem	Sem Preparo	Sem preparo	Sem preparo	Aveia amarela/feijão
2008/09	Aração + gradagem	Sem preparo	Sem preparo	Sem preparo	Aveia amarela/feijão
2009/10 a 2011/12	Aração + gradagem	Sem preparo	Sem preparo	Sem preparo	Aveia preta/milho+braquiária
2012/13	Sem preparo	Aração + gradagem	Sem preparo	Sem preparo	Braquiária/soja
2013/14	Sem preparo	Aração + gradagem	Sem preparo	Sem preparo	Trigo/soja
2014/15	Sem preparo	Aração + gradagem	Sem preparo	Sem preparo	Cártamo/soja
2015/16	Sem preparo	Aração + gradagem	Sem preparo	Sem preparo	Cártamo/milho
2016/17	Aração + gradagem	Sem preparo	Sem preparo	Sem preparo	Aveia preta/milho
2017/18	Aração + gradagem	Sem preparo	Sem preparo	Sem preparo	Aveia preta/milho

2018/19	Aração + gradagem	Sem preparo	Sem preparo	Sem preparo	Sorgo/soja
2019/20	Aração + gradagem	Sem preparo	Sem preparo	Sem preparo	Sorgo/soja
2020/21	Aração + gradagem	Sem preparo	Sem preparo	Sem preparo	Sorgo/soja
2021/22	Aração + gradagem	Sem preparo	Sem preparo	Sem preparo	Sorgo/soja

O experimento foi conduzido em delineamento experimental de blocos casualizados, em esquema de parcela subdividida, com quatro repetições. As parcelas (369 m<sup>2</sup>) foram constituídas pelos sistemas de manejo do solo (SPC e SSD). E as subparcelas (123 m<sup>2</sup>) foram compostas pela adubação nitrogenada na cultura do sorgo biomassa (sem adubação, 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup>). As adubações nitrogenadas em cobertura no sorgo iniciou-se na safra 2019/20.

As doses de N utilizadas em cobertura foram escolhidas com base na faixa de adubação recomendada por Santos et al. (2015), para a cultura do sorgo biomassa.

O solo da área experimental foi classificado como Nitossolo Vermelho distroférico, estruturado, de textura argilosa (EMBRAPA, 2018), com relevo suave ondulado. A caracterização química do solo foi realizada seguindo a metodologia de Raij et al. (2001), sendo a coleta do solo realizada antes da semeadura da soja na safra 2019/20. As características químicas do solo estão apresentadas na Tabela 2.

**Tabela 2 - Caracterização química do solo da área experimental**

Tratamentos	Profundidade cm	pH CaCl <sub>2</sub>	P <sub>resina</sub> mg dm <sup>-3</sup>	M.O. mg dm <sup>-3</sup>	H+Al	Ca	Mg	K	Al
					mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>				
Sistema de preparo convencional	0-10	4,8	72,4	28,3	52,0	6,8	2,7	6,9	4,3
	10-20	4,8	70,1	28,1	50,0	9,5	2,4	5,3	3,5
	20-40	5,0	76,1	21,7	44,0	7,1	3,5	5,2	2,7
	40-60	5,5	90,7	19,4	28,9	8,4	3,3	4,1	1,8
Sistema de semeadura direta	0-10	5,2	95,0	35,5	45,7	9,6	2,1	7,2	3,7
	10-20	4,8	68,7	27,2	51,7	4,5	2,6	5,3	4,1
	20-40	5,3	43,9	20,7	32,0	6,3	2,3	5,1	1,7
	40-60	5,5	56,8	18,0	28,9	5,1	3,0	4,1	1,4

M.O.: matéria orgânica do solo.

Para caracterização granulométrica do solo, foram coletadas amostras indeformadas em 10/02/2022, sendo a análise realizada conforme metodologia da Embrapa (2017). Os dados das frações granulométricas estão apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3 - Caracterização granulométrica do solo da área experimental**

Tratamentos	Profundidade	Areia	Silte	Argila
	cm			
Sistema de preparo convencional	0-10	235	193	572
	10-20	226	254	520
	20-40	216	220	563
	40-60	170	140	690
Sistema de semeadura direta	0-10	238	271	491
	10-20	232	211	557
	20-40	188	185	627
	40-60	158	129	713

### 3.3 Condução do experimento

#### 3.3.1 Cultivo do sorgo biomassa

Antes da semeadura, nas safras 2019/20 e 2021/22, foi realizado o preparo do solo com uma aração e uma gradagem, nos tratamentos conduzidos sob SPC (05/04/2019 e 15/04/2021). Nas parcelas sob SSD, foi realizado controle químico das plantas com herbicida glyphosate (2,88 kg i.a. ha<sup>-1</sup>).

A semeadura do sorgo biomassa, cultivar BRS 716, foi mecanizada, ocorreu em 18/04/2019 e 26/04/2021, utilizando espaçamento de 0,45 m entrelinhas, com densidade de 145 mil plantas ha<sup>-1</sup>, sem adubação. O espaçamento de 0,45 m, mais estreito do que o recomendado para a cultura, foi escolhido por se tratar de um cultivo de outono-inverno, visando a produção de palha para cobertura do solo. Como as condições climáticas nessa época do ano proporcionam um crescimento mais lento das plantas, para que ocorresse o fechamento rápido das entrelinhas e a maior cobertura do solo, optou-se por esse menor espaçamento, muito utilizado em sistema de semeadura direta, nos cultivos de outono-inverno nessa região (CASTRO et al., 2017). Para semeadura, as sementes foram tratadas com fungicida Carboxin + Thiram e inseticida Tiametoxam.

A adubação nitrogenada foi realizada em cobertura, 40 dias após a emergência do sorgo, tendo como fonte o sulfato de amônio. As plantas foram cultivadas até 31 de outubro de cada ano, sendo, posteriormente, manejadas mecanicamente com Triton.

### 3.3.2 Cultivo da soja

A semeadura da soja na safra 2019/20 ocorreu em 21/11/2019, utilizando a cultivar TMG 7062 IPRO, sendo semeada mecanicamente. Na safra 2021/22 a semeadura foi realizada de forma mecanizada em 03/12/2021, com a cultivar NEO 0610 IPRO. Em ambas as safras, a semeadura ocorreu sobre a palhada do sorgo, com espaçamento de 0,45 m entrelinhas, visando densidade de 300 mil plantas ha<sup>-1</sup>, utilizando-se sementes tratadas com fungicida Carboxin + Thiran, inseticida Tiametoxam, inoculante *Bradyrhizobium* sp., e micronutrientes Co e Mo. A adubação de semeadura foi com 60 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O e 60 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, utilizando cloreto de potássio e superfosfato triplo, respectivamente.

O manejo fitossanitário da soja envolveu o controle de plantas daninhas com aplicação do herbicida Glyphosate (1,8 kg i.a. ha<sup>-1</sup>) associado com o herbicida Setoxidim (1,25 kg a.i. ha<sup>-1</sup>) em 10/01/2020 e 07/01/2022. Foram aplicados, de forma preventiva, o fungicida Pyraclostrobin + Epoxiconazol (0,08 + 0,03 kg i.a. ha<sup>-1</sup>, respectivamente) e o inseticida Tiametoxam + Lambda-Cialotrin (0,028 + 0,21 kg i.a. ha<sup>-1</sup>), no dia 16/01/2020 e 28/01/2021. Nos dias 30/01/2020 e 11/02/2021 fez-se a aplicação do fungicida Azoxystrobin + Cyproconazole (0,06 + 0,024 kg i.a. ha<sup>-1</sup>, respectivamente) e inseticida Tiametoxam + Lambda-Cialotrin (0,028 + 0,21 kg i.a. ha<sup>-1</sup>). No dia 07/03/2020 e 18/03/2021 fez-se a aplicação do inseticida Tiametoxam + Lambda-Cialotrin (0,028 + 0,21 kg i.a. ha<sup>-1</sup>).

A soja foi dessecada nas duas safras com Paraquate (2,0 L ha<sup>-1</sup>) em 03/04/2020 e 11/04/2022 e a colheita foi realizada em 13/04/2020 e 22/03/2022.

A soja também foi cultivada na safra 2020/21, porém não foram procedidas as avaliações em função da baixa precipitação no mês de abril, o que prejudicou a emergência e o desenvolvimento do sorgo na safra de outono-inverno.

## 3.4 Avaliações

### 3.4.1 Avaliações no sorgo biomassa

O sorgo foi avaliado quanto a produção de fitomassa no florescimento em 27/06/2019 e 12/07/2021, correspondendo a 70 e 78 dias após a semeadura nas safras 2019/20 e 2021/22, respectivamente. Para esta avaliação, foram amostradas

as plantas de três linhas de 1 m de comprimento, em pontos aleatórios de cada subparcela. As amostras coletadas foram colocadas em estufa de circulação forçada de ar forçada, a 65 °C, até atingir massa constante. Posteriormente, as amostras foram pesadas, e o valor foi extrapolado para kg ha<sup>-1</sup> de fitomassa seca.

No florescimento do sorgo, também foi avaliado o desenvolvimento radicular na profundidade de 0,00-0,10, 0,10 – 0,20, 0,20 – 0,40 e 0,40 – 0,60 m. Para isso, foram coletadas amostras de solo com trado “tipo caneca” (com volume conhecido), na entrelinha (0,10 m de distância da planta), em cada profundidade, sendo quatro subamostras por profundidade para compor uma amostra. Após a coleta, as porções de solo contendo as raízes foram acondicionadas em sacos plásticos vedados e congeladas a -2°C e em seguida foram lavadas, guardadas em recipiente contendo 30% de álcool e 70% de água e armazenadas em ambiente refrigerado. Posteriormente, as amostras foram submetidas a um “scanner” de leitura ótica na resolução de 250 dpi, e as imagens obtidas foram analisadas com o programa “Win Mac Rhizo” para determinar o diâmetro médio (mm), densidade de comprimento radicular (cm de raiz por cm<sup>3</sup> de solo) e volume radicular (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>). Logo após, as amostras foram colocadas em sacos de papel e secas em estufa de aeração forçada a 60°C até atingir massa constante, para determinação da fitomassa seca em kg ha<sup>-1</sup>.

No momento da semeadura e no estágio fenológico R5 da soja (enchimento de grãos), foi avaliada a quantidade de fitomassa de sorgo sobre o solo (palhada). Para isso, amostras da palhada foram coletadas com auxílio de gabarito de madeira com área de 0,25 m<sup>2</sup>, em três pontos aleatórios em cada subparcela, e o material foi seco em estufa e pesado para obtenção da massa de palhada residual sobre o solo em kg ha<sup>-1</sup>. Posteriormente, estas amostras foram moídas em moinho do tipo Willey com peneira de malha de 1 mm, e determinou-se os teores de macronutrientes, de acordo com a metodologia proposta por Malavolta et al. (1997). De posse desses valores, determinou-se a ciclagem de nutrientes pela palhada do sorgo, subtraindo a quantidade de cada macronutriente presente na palhada do sorgo no momento da semeadura da soja pela quantidade do mesmo nutriente presente na palhada de sorgo em R5, sendo os resultados expressos em kg ha<sup>-1</sup>.

### **3.4.2 Avaliações na soja**

Todas as avaliações realizadas na cultura da soja foram feitas na safra de 2019/20 e 2021/22.

### **3.4.2.1 Desenvolvimento radicular**

A avaliação do desenvolvimento radicular da soja foi realizada nos dias 09/01/2020 e 12/01/2022, quando as plantas estavam em estágio fenológico R2 (pleno florescimento). Para isso, foram coletadas amostras de solo nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10 – 0,20, 0,20 – 0,40 e 0,40 – 0,60 m. As amostras foram coletadas com trado “tipo caneca” na entrelinha (0,10 m de distância da planta), sendo coletada quatro subamostras em cada subparcela, em cada profundidade do solo, para compor uma amostra. Após a coleta, as porções de solo contendo as raízes foram acondicionadas em sacos plásticos vedados e congeladas a  $-2^{\circ}\text{C}$  e em seguida foram lavadas, guardadas em recipiente contendo 30% de álcool e 70% de água e armazenadas em ambiente refrigerado. Posteriormente, as amostras foram submetidas a um “scanner” de leitura ótica na resolução de 250 dpi, e as imagens obtidas foram analisadas com o programa “Win Mac Rhizo” para determinar o diâmetro médio (mm), densidade de comprimento radicular (cm de raiz por  $\text{cm}^3$  de solo) e volume radicular ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ ). Logo após, as amostras foram colocadas em sacos de papel e secas em estufa de aeração forçada a  $60^{\circ}\text{C}$  até atingir massa constante, para determinação da fitomassa seca em  $\text{kg ha}^{-1}$ .

### **3.4.2.2 Parâmetros fisiológicos**

Todas as avaliações de parâmetros fisiológicos foram realizadas em R2 da soja, nos dias 11/01/2020 e 16/01/2022.

#### **3.4.2.2.1 Índice SPAD**

O índice SPAD foi avaliado por meio do clorofilômetro SPAD-502 (Minolta Corp., Ransey, NJ, EUA), em 10 plantas por subparcela. A leitura foi realizada na terceira folha completamente desenvolvida, no sentido ápice-base. O valor da leitura da unidade SPAD indica o teor de pigmento na folha e é equivalente à quantidade de luz transmitida pela folha em duas faixas de comprimento de onda, nas quais a

absorção pela clorofila é diferente (Malavolta et al., 1997). Neste caso, o valor é proporcional à quantidade de clorofila presente na folha.

#### 3.4.2.2.2 Índice de área foliar

O índice de área foliar (IAF) foi avaliado por meio da coleta de todas as folhas das plantas em 0,5 m, e em seguida analisadas em integrador de área foliar de bancada (LICOR, modelo LI-3100C, Lincoln, NE, EUA). O IAF foi calculado com a relação da área foliar total das plantas (m<sup>2</sup>) por unidade de terreno (0,225 m<sup>2</sup>) disponível para as plantas (Watson, 1947a, b), conforme a equação 1:

$$IAF = \frac{\text{área foliar total}}{\text{área da superfície do solo}} \quad (1)$$

#### 3.4.2.2.3 Pigmentos fotossintéticos

Para avaliação dos teores de clorofila *a* (Cl<sub>a</sub>), clorofila *b* (Cl<sub>b</sub>), clorofila total (Cl<sub>t</sub>) e carotenóides (Carot), foram coletadas a terceira folha no sentido ápice-base de 10 plantas por subparcela, e a determinação dos teores foi realizada com base na metodologia de Lichtenthaler (1987).

#### 3.4.2.2.4 Teor relativo de água na folha

Para a análise do teor relativo de água na folha (TRA) foram analisadas cinco plantas, sendo coletados dois discos foliares (0,69 cm<sup>2</sup> cada) da terceira folha (sentido do ápice para a base) de cada planta e determinada a massa fresca do tecido (W<sub>f</sub>) em balança analítica (Bel Photonics do Brasil E. C. Ltda, M214Ai, Osasco, SP, Brasil). Após isso, as amostras foram reidratadas em água destilada por 24 horas, para a obtenção da massa túrgida (W<sub>t</sub>), fazendo-se uso de papel toalha para extrair o excesso de água. A massa seca (W<sub>d</sub>) foi obtida após os discos permanecerem em estufa de circulação de ar forçada a 80°C por 48 horas. Os valores de TRA foram obtidos pela equação 2, descrita por Jamaux et al.(1997):

$$TRA (\%) = [(W_f - W_d) \times (W_t - W_d)^{-1}] \times 100 \quad (2)$$

#### 3.4.2.2.5 Potencial hídrico na folha

O potencial hídrico foliar ( $\Psi_f$ ) foi medido no período mais quente do dia, entre 12:00 e 14:00h, pois assim, observam-se os menores valores de potencial hídrico foliar. O  $\Psi_w$  foi determinado na extremidade (ponta) da terceira folha (sentido do ápice para a base), onde foi aplicada pressão até ocorrer à exsudação pelo corte feito no pecíolo da folha, com auxílio de câmara de pressão do tipo Scholander (Soil Moisture Equipment Corporation, 3005, Santa Barbara, CA, EUA) (SCHOLANDER et al., 1965). Os resultados foram expressos em MPa.

#### 3.4.2.2.6 Trocas gasosas

A leitura da taxa de assimilação líquida do  $\text{CO}_2$  ( $A$ ), condutância estomática ( $g_s$ ), concentração interna de  $\text{CO}_2$  na folha ( $C_i$ ), taxa de transpiração ( $E$ ), temperatura da folha e déficit de pressão de vapor (VPDL) foram realizadas no trifólio central da terceira folha completamente expandida no sentido ápice-base, com analisador de gases a infravermelho (IRGA) (LI-COR Biosciences Inc., LI-6400xt, Lincoln, NE, EUA). As medições foram realizadas entre 08:00 e 11:00 horas da manhã, utilizando radiação fotossinteticamente ativa (PAR) constante ( $1000 \mu\text{mol f\u00f3tons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), concentração atmosférica de  $\text{CO}_2$ , temperatura e umidade ambiente. A eficiência do uso da água (EUA) foi calculada pela razão  $A/E$  e a eficiência de carboxilação (EC) pela razão  $A/C_i$ .

#### 3.4.2.2.7 Parâmetros de fluorescência da clorofila *a*

As variáveis relacionadas à fluorescência da clorofila *a* foram obtidas na mesma área da folha e horário em que foram realizadas as medidas das trocas gasosas, com auxílio de fluorômetro acoplado ao IRGA. No entanto, antes das avaliações de fluorescência, em cada folha avaliada foi colocado papel alumínio por no mínimo 30 minutos, objetivando manter a folha no escuro para que ocorresse a oxidação de todo o sistema de transporte fotossintético de elétrons.

Desta forma, foi medida a fluorescência máxima ( $F_m'$ ), a fluorescência no estado de equilíbrio dinâmico ( $F'$ ) e a fluorescência mínima ( $F_0'$ ), permitindo-se calcular os seguintes critérios (BAKER, 2008): eficiência fotoquímica máxima do

fotossistema II (PSII) ( $F_v/F_m$ ), rendimento quântico potencial do PSII ( $F_v'/F_m'$ ), coeficiente de extinção fotoquímico ( $qP$ ), coeficiente de extinção não-fotoquímico (NPQ) e taxa aparente de transporte de elétrons (ETR).

### **3.4.2.3 Metabolismo oxidativo e atividade enzimática antioxidante**

Para as análises do metabolismo oxidativo e atividade enzimática antioxidante, foram coletadas a terceira folha completamente desenvolvida, no sentido ápice-base, de 10 plantas por subparcelas, em estágio fenológico R2. Após a coleta, acondicionou-se as folhas em tubos de 45 mL e, imediatamente, adicionou-se nitrogênio líquido para o rápido congelamento das amostras. Em seguida, os tubos foram mantidos em freezer na temperatura de  $-80^{\circ}\text{C}$ . Para o processamento das folhas, foram realizadas macerações em almofariz com nitrogênio líquido até a obtenção de partículas de pó fino, as quais foram devidamente pesadas e transferidas para tubos, sendo novamente armazenadas em freezer a  $-80^{\circ}\text{C}$ .

#### **3.4.2.3.1 Determinação de parâmetros relacionados ao metabolismo oxidativo**

Para a análise do conteúdo de peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) e malondialdeído (MDA), foi necessário realizar a extração do material vegetal em extrator de ácido tricloroacético (TCA) 0,1%.

As amostras do tecido vegetal, aproximadamente 1 g, foram extraídas e maceradas em 4 mL de solução TCA 0,1%. Após esse procedimento, o material foi centrifugado a 10000 rpm, por 10 minutos e à  $4^{\circ}\text{C}$  e o material sobrenadante foi armazenado para posterior utilização.

A peroxidação de lipídios foi determinada por meio da produção de metabólitos reativos a ácido 2-tiobarbitúrico (TBA), principalmente o MDA, segundo Heath e Packer (1968).

Para determinação dos teores de MDA, em microtubo eppendorf foram pipetados 200  $\mu\text{L}$  de sobrenadante e 1 mL de solução TCA 20% + TBA 0,5%. Após a pipetagem, os tubos foram mantidos durante 30 minutos em estufa a  $95^{\circ}\text{C}$ . Posteriormente, os tubos foram retirados da estufa e mantidos em gelo por 10 minutos. Após esse procedimento, o material foi centrifugado para a separação de fases. As leituras foram realizadas em absorvâncias de 535 e 600 nm.

O conteúdo de peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ) foi determinado segundo Alexieva et al. (2001). Em microtubo eppendorf foram pipetados 200  $\mu$ L de sobrenadante, 200  $\mu$ L de tampão fosfato de K pH 7,5 0,1M e 800  $\mu$ L de KI 1M. Após a pipetagem, os tubos foram agitados em vórtex e mantidos em gelo e no escuro por aproximadamente 1 hora. Em seguida, foram realizadas as leituras em absorvância de 390nm e em quadruplicata.

### **3.4.2.3.2 Atividade enzimática antioxidante**

#### **3.4.2.3.2.1 Superóxido dismutase (SOD – EC 1.15.1.1)**

O princípio da análise de determinação da atividade enzimática da SOD considera a capacidade da enzima em inibir a fotoredução do NBT (cloreto de azul nitrotetrazólio). Com isso, a atividade da SOD foi determinada pela adição de uma alíquota de 30  $\mu$ L do extrato bruto processado, após sua ressuspensão, a outra solução contendo 13 mmol  $L^{-1}$  de metionina, 100 nmol  $L^{-1}$  de EDTA (ácido etilenodiamino tetra-acético), 75  $\mu$ mol  $L^{-1}$  de NBT e 2  $\mu$ mol  $L^{-1}$  de riboflavina em 3 mL de tampão fosfato de potássio 50 mmol  $L^{-1}$  em pH 7,8, de acordo com protocolo descrito por Del Longo et al. (1993). A reação iniciou-se com a iluminação dos tubos, numa câmara que continha lâmpadas fluorescentes de 15 W a 25°C. Após 5 minutos desta incubação, determinou-se o final da catálise pelo desligamento das lâmpadas (GIANNOPOLITIS; RIES, 1977). O composto azul formado, a formazana, produto da fotoredução do NBT, foi determinada pelo aumento na intensidade de absorção, também obtido via espectrofotometria em leituras no comprimento de onda de 560 nm. Os brancos foram mantidos cobertos com papel alumínio para proteção da luminosidade. Para os resultados, convencionou-se que uma unidade de SOD foi a quantidade de enzima necessária para a inibição de 50% da fotoredução do NBT. Com o objetivo de se calcular a atividade específica da enzima, levou-se em consideração a porcentagem de inibição obtida, o volume da amostra e a concentração de proteína na amostra em  $\mu$ g  $\mu$ L $^{-1}$ .

#### **3.4.2.3.2.2 Peroxidase (POD – EC 1.11.1.7)**

A atividade da POD foi determinada em duplicata de acordo com o método de Peixoto et al. (1999), com algumas modificações, utilizando quatro repetições por tratamento. A reação foi montada pela adição de 100  $\mu\text{L}$  do extrato bruto em 4.9 mL de um meio de reação formado por 0.025 M de tampão fosfato de potássio (pH 6.8), 20 mM de ácido pirogálico e 20 mM de  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Após um minuto de reação em temperatura ambiente, a mesma foi interrompida pela adição de 500  $\mu\text{L}$  de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  a 5%. Em seguida, o meio de reação foi levado para a leitura da absorbância em espectrofotômetro no comprimento de onda de 420 nm.

#### **3.4.2.3.2.3 Catalase (CAT – EC 1.11.1.6)**

A determinação da atividade enzimática da catalase foi feita por meio de medidas realizadas em espectrofotômetro, com o monitoramento da variação da intensidade de absorção do  $\text{H}_2\text{O}_2$ , no comprimento de onda de 240 nm, de acordo com o método descrito por Peixoto et al. (1999). Para a realização do experimento, 100  $\mu\text{L}$  de extrato bruto ressuspenso foram adicionados em 1,9 mL de tampão fosfato de potássio 50  $\text{mmol L}^{-1}$  em pH 7,0, o qual foi adicionado o peróxido de hidrogênio na concentração final de 12,5  $\text{mmol L}^{-1}$ . A variação da absorção ( $\Delta E$ ) foi calculada em um intervalo de 80 s, sendo utilizado o coeficiente de extinção molar,  $\epsilon=39,4 \text{ mmol L}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ , para a determinação da atividade da enzima. Para o cálculo da atividade específica ( $\mu\text{Kat } \mu\text{g Prot}^{-1}$ ) da catalase, levou-se em consideração a concentração de proteína solúvel encontrada no teste.

#### **3.4.2.4 Componentes de produção e produtividade**

No estágio de maturidade fisiológica da soja, em 02/04/2020 e 10/04/2022, foram avaliados os seguintes componentes de produção:

- a) População de plantas (POP): contabilizou-se o número de plantas por metro em cinco pontos aleatórios em cada subparcela;
- b) Altura da planta (AP): mediu-se a altura da planta desde a superfície do solo até o ápice, sendo o resultado expresso em cm;
- c) Altura de inserção da primeira vagem (AIPV): mediu-se a altura em centímetro a partir da superfície do solo até a primeira vagem;

d) Número de vagens por planta (NVP): foram avaliados o número de vagens em 10 plantas por subparcela, escolhidas de forma aleatória;

e) Número de grãos por vagem (NGV): foram contabilizados o número de grãos em 100 vagens por subparcela;

f) Peso de mil grãos (PMG): foi determinado de acordo com a metodologia descrita por Brasil (2009).

A produtividade da soja foi determinada após a maturidade fisiológica dos grãos (R9), colhendo-se as plantas das 10 linhas centrais com 4 m de comprimento, perfazendo uma área de 18 m<sup>2</sup> por subparcela, e as amostras foram trilhadas mecanicamente. O teor de água dos grãos foi corrigido para 130 g kg<sup>-1</sup>, e o resultado extrapolado para kg ha<sup>-1</sup>.

### **3.4.3 Avaliações no solo**

As avaliações dos atributos do solo foram realizadas na safra 2021/22, quando a soja estava no estágio fenológico R2 (10/01/2022).

#### **3.4.3.1 Nitrogênio total no solo e fracionamento físico da matéria orgânica**

Para esta análise foram coletadas amostras de solo deformadas, na profundidade de 0,00 - 0,10, 0,10 - 0,20, 0,20 - 0,40 e 0,40 - 0,60 m. As amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de 2 mm para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA).

Antes de realizar o fracionamento, foi retirada uma amostra de solo de cada profundidade para determinação dos teores de nitrogênio total (NT) e carbono orgânico total (COT), em analisador elementar automático modelo TruSpec™ CHNS, da LECO®.

Para realização do fracionamento físico da matéria orgânica do solo, seguiu-se a metodologia adaptada de Cambardella e Elliott (1992). Por essa metodologia obtêm-se duas frações de carbono, o carbono orgânico particulado (COP), que consiste no material mais recentemente adicionado ao solo e pouco decomposto e, o carbono associado a minerais (COM), mais recalcitrante e humificado.

Foi utilizado 20 gramas de solo, em copos de polietileno de 250 mL e adicionados 80 mL de solução dispersante de hexametáfosfato de sódio 5 g L<sup>-1</sup>. Em seguida, as amostras foram agitadas por 15 horas em agitador horizontal, passadas

por peneira de malha de 0,053 mm (270 Mesh) e lavadas com água destilada até remoção total da argila. O material particulado retido na peneira, ou fração particulada (FP), foi transferido para potes de alumínio, com auxílio de jatos de água, e seco em estufa de circulação de ar forçada a 45 °C até atingir massa constante.

Após a secagem, o material foi pesado, determinando-se assim a massa da fração particulada (MFP), moído e homogeneizado com auxílio de um bastão de vidro, e submetido à determinação de C em analisador elementar, obtendo-se o teor de carbono da fração particulada do solo (CFP). O teor de carbono orgânico particulado (COP) do solo foi calculado de acordo com a equação 3:

$$COP = \frac{CFP \times MFP}{Ps} \quad (3)$$

Onde: COP é o teor de carbono orgânico particulado do solo, em g de C kg<sup>-1</sup> de solo; CFP é o teor de carbono da fração particulada, em g kg<sup>-1</sup>; MFP é a massa da fração particulada, em gramas; Ps é massa da amostra inicial do solo (20 gramas).

O teor COM foi calculado pela diferença entre o COT e COP, conforme equação 4:

$$COM = COT - COP \quad (4)$$

Onde: COM representa o teor de carbono orgânico associado a minerais no solo, em g kg<sup>-1</sup>; COT é o teor de carbono orgânico total do solo, em g kg<sup>-1</sup>; COP é o teor de carbono orgânico particulado do solo, em g kg<sup>-1</sup>.

### 3.4.3.2 Estabilidade de agregados em água

Em cada subparcela foi aberta uma trincheira utilizando-se enxadão e pá de corte, com dimensões aproximadas de 0,40 m de largura por 0,60 m de comprimento e 0,90 m de profundidade. Foram retirados monólitos de solo em cada profundidade (0,00 - 0,10, 0,10 - 0,20, 0,20 - 0,40 e 0,40 - 0,60 m), com auxílio de espátula de aço e marreta de 1 kg, na parede das trincheiras. Essas amostras foram utilizadas na avaliação de estabilidade de agregados.

Os monólitos de solo foram acondicionados em sacos plásticos e posteriormente pré-selecionados em um jogo de peneiras sobrepostas, tendo as peneiras superior e inferior malhas de 8 e 4 mm, respectivamente. Utilizou-se somente a porção retida na de 4 mm. Os agregados do solo pré-selecionados foram avaliados

quanto à estabilidade de agregados via úmida, conforme Kemper e Chepil (1965), em aparelho de oscilação vertical (YODER, 1936).

Foram pesadas duas subamostras de 25 g de solo de cada amostra, sendo uma delas submetida à determinação de umidade em estufa a 105°C e a outra encaminhada para o tamisamento. As subamostras destinadas ao tamisamento foram pré-umedecidas levemente com um borrifador e mantidas em repouso em temperatura ambiente por 10 minutos. Em seguida, foram transferidas para um conjunto de peneiras acopladas de 2,00; 1,00; 0,50; 0,25 e 0,105 mm de diâmetro dentro do aparelho de oscilação vertical. O aparelho movimentava verticalmente o conjunto de peneiras imersas em água, de modo que amostra de solo depositada inicialmente na peneira superior (2,00 mm) mergulhe totalmente e depois suba até aflorar acima do nível da água. O tamisamento mecânico na água foi realizado por 15 minutos, com 30 ciclos por minuto. As porções retidas em cada peneira foram transferidas para potes de alumínio com o auxílio de jatos de água e secas em estufa a 105°C por um período de 24 horas para posterior pesagem.

A partir dos valores de massa, e conhecendo-se os teores de umidade das amostras originais de solo submetidas ao tamisamento, foram calculados a porcentagem de agregados retidos na peneira de 2 mm ( $A_{g>2mm}$ ), o diâmetro médio ponderado (DMP) e o diâmetro médio geométrico (DMG). Também foi calculado o índice de estabilidade de agregados (IEA), conforme Castro Filho et al. (1998). Para as determinações de DMP, DMG e IEA foram utilizadas as equações 5, 6 e 7, respectivamente.

$$DMP = \sum_{i=1}^n (x_i \cdot w_i) \quad (5)$$

Onde:  $x_i$  é o diâmetro médio das classes de agregados (mm);  $w_i$  representa a proporção de cada classe em relação ao total.

$$DMG = \frac{\exp \sum_{i=1}^n w_p \cdot \log x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (6)$$

Onde:  $w_p$  representa a massa dos agregados de cada classes (g).

$$IEA = \frac{(w_s - w_{p<0,25})}{w_s} \cdot 100 \quad (7)$$

Onde:  $w_s$  é a massa da amostra de solo seca (g);  $w_{p<0,25}$  é a massa de agregados menores que 0,25 mm (g).

### 3.4.3.3 Propriedades físicas do solo, armazenamento e disponibilidade de água no solo

Para avaliação das características de porosidade e densidade do solo ( $D_s$ ) foram coletadas amostras com estrutura preservada em trincheiras, por meio de anéis volumétricos com 5,0 cm de altura por 4,8 cm de diâmetro interno, nas camadas de 0,00 – 0,10, 0,10 – 0,20, 0,20 – 0,40 e 0,40 – 0,60 m. Em cada subparcela foi coletada uma amostra por profundidade do solo.

Após a coleta das amostras, ainda no campo, foi retirado o excesso de solo em torno dos anéis, com o auxílio de um estilete. Em seguida, os anéis volumétricos foram vedados com tampas plásticas para evitar possíveis danos e deformações, e armazenados em refrigerador a 2 °C, até serem processados.

Em laboratório, as amostras com estrutura preservada foram colocadas para saturar em bandejas plásticas com cerca de 2/3 da altura dos anéis. Para evitar a perda de solo, a borda inferior do anel foi envolvida com tecido de poliéster preso por um atilho de borracha, permitindo somente a passagem da água. Após 48 horas de imersão das amostras, e com todos os poros do solo ocupados pela água, obteve-se a massa saturada das amostras e, em seguida, as amostras foram colocadas sobre placas porosas em câmara de Richards (KLUTE, 2018).

As amostras foram submetidas as pressões de -0,006, -0,33 e -1,5 MPa, para assim determinar a macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro), porosidade total (PT), capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP).

A água retida no solo em cada potencial foi determinada pesando as amostras no ponto de saturação e após aplicação de cada tensão. Após a extração de água com tensão de 1,5 MPa e pesagem, as amostras foram colocadas para secar a 105 °C, por 48 horas, em estufa de aeração forçada, para em seguida serem determinados os pesos secos das amostras com volume de solo conhecido.

Com a diferença entre a massa das amostras saturadas com água e secas a 105 °C, e com volume conhecido das amostras, calculou-se a PT (EMBRAPA, 2017). Para calcular a  $D_s$ , dividiu-se a massa das amostras secas a 105 °C pelo volume do anel volumétrico (BLAKE; HARTGE, 1986).

A Macro e Micro foram determinadas utilizando o teor de água retida nas amostras em equilíbrio com a tensão de 0,006 MPa, considerando que essa tensão é suficiente para retirar toda a água retida nos macroporos, sendo que a água restante

representa o volume de microporos (EMBRAPA, 2017). Assim, conhecendo a PT e a Micro foi possível calcular a MP, conforme a equação 8:

$$Macro = PT - Micro \quad (8)$$

Onde: Macro é a macroporosidade do solo em  $\text{cm}^{-3} \text{cm}^{-3}$ ; PT representa a porosidade total em  $\text{cm}^{-3} \text{cm}^{-3}$ ; Micro é a microporosidade do solo em  $\text{cm}^{-3} \text{cm}^{-3}$ .

A CC foi determinada com a tensão de 0,33 MPa e o PMP a 1,5 MPa. Com os valores de CC e PMP foi possível calcular a capacidade de água disponível (CAD) (REEVE; CARTER, 1991), conforme apresentado na equação 9:

$$CAD = CC - PMP \quad (9)$$

Onde: CAD é a capacidade de água disponível em  $\text{cm}^{-3} \text{cm}^{-3}$ ; CC representa a umidade do solo em capacidade de campo ( $\text{cm}^{-3} \text{cm}^{-3}$ ); PMP é a umidade do solo no ponto de murcha permanente ( $\text{cm}^{-3} \text{cm}^{-3}$ ).

O conteúdo de água no solo foi avaliado por meio de tubos de acesso para leituras de umidade através de uma sonda de capacitância (modelo Diviner®, SentekPt Ltda.). O monitoramento do conteúdo de água foi avaliado nas profundidades de 0,00 - 0,10; 0,10 - 0,20, 0,20 - 0,40 e 0,40 - 0,60 m, com leituras aos 1, 3, 5, 8 e 15 dias após a chuva (DAC). Para esta avaliação foi considerada chuvas acima de 10 mm. Esta avaliação foi realizada apenas nos sistemas de manejo do solo com ausência de adubação nitrogenada.

O conteúdo de água no solo foi avaliado durante todo o ciclo da soja nas duas safras. De posse do conteúdo de água no solo foi determinado o armazenamento de água e a disponibilidade de água no solo para as plantas. Foi considerada como água disponível às plantas, o conteúdo de água armazenado entre a CC e o PMP do solo.

O teste de resistência do solo à penetração (RP) foi realizado em três pontos por subparcela, por meio do penetrômetro de impacto (modelo IAA/ Planalsucar-Stolf), e os dados foram calculados em programa computacional de dados em EXCEL-VBA (STOLF et al., 2014).

### 3.5 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância e quando significativa, as médias foram comparadas pelo teste t (LSD – Student), ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Os dados de armazenamento e disponibilidade de água no solo foram analisados pelo teste não paramétrico de Mann-Whitney.

Com intuito de avaliar a influência das variáveis na produtividade da soja, foi realizada a análise exploratória dos dados, por meio de técnicas multivariadas. Para isso, as variáveis analisadas foram divididas em nove grupos, sendo:

- a) Desenvolvimento do sorgo: compreendeu as variáveis de fitomassa de sorgo no florescimento, fitomassa de sorgo na semeadura da soja, fitomassa de sorgo em R5 da soja, fitomassa de raiz de sorgo, diâmetro médio das raízes de sorgo, densidade de comprimento radicular do sorgo e volume radicular do sorgo;
- b) Ciclagem de nutrientes: englobou as variáveis de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) liberados pela fitomassa do sorgo sobre o solo até a fase fenológica R5 da soja;
- c) Nitrogênio e carbono orgânico: envolveu as variáveis NT, COT, COP e COM;
- d) Agregados: abrangeu as variáveis de  $Ag > 2mm$ , DMG, DMP e IEA;
- e) Física do solo: incluiu as variáveis de Macro, Micro, PT, Ds, RP, CC, PMP e CAD;
- f) Desenvolvimento radicular da soja: fitomassa de raiz, diâmetro médio das raízes, densidade de comprimento radicular e volume radicular;
- g) Parâmetros fisiológicos: SPAD, IAF,  $Cl_a$ ,  $Cl_b$ ,  $Cl_t$ , Carot,  $\Psi_t$ , TRA, temperatura da folha, VPDL,  $g_s$ , A,  $C_i$ , EC, E, EUA,  $F_v/F_m$ ,  $F_v'/F_m'$ , qP, NPQ e ETR;
- h) Parâmetros bioquímicos:  $H_2O_2$ , MDA, SOD, POD e CAT;
- i) Componentes de produção: POP, AP, AIPV, NVP, NGV e PMG.

Em cada grupo de variável foi aplicado a análise de componentes principais (ACP) (HAIR JR et al., 2009), por meio do algoritmo de mínimos quadrados parciais iterativos não-lineares (NIPALS).

Para cada conjunto de variáveis buscou-se o menor número possível de componentes que explicassem pelo menos 70% da variabilidade total.

Os escores dos nove grupos de variáveis foram comparados com os escores de produtividade e plotados em gráficos de dispersão, considerando os valores de cada repetição.

A partir dos escores dos componentes principais selecionados de cada grupo de variáveis, foi avaliada a associação de cada componente na produtividade das plantas de soja, por meio do coeficiente de correlação linear de Pearson ( $p < 0,05$ ).

Ressalta-se, que para as variáveis que envolveram profundidade do solo, para a análise estatística de ACP, foram consideradas as médias da profundidade de 0,00 - 0,60 m.

Para as análises multivariadas, correlação de Pearson e teste de Mann-Whitney foi utilizado no software R, e para a ANOVA e teste de média o programa estatístico AgroEstat (BARBOSA; MALDONADO JÚNIOR, 2015).

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Produção, persistência e ciclagem de nutrientes pela fitomassa de sorgo biomassa

Nos dois anos de condução do experimento (safra 2019/20 e 2021/22), houve interação significativa entre os fatores adubação nitrogenada e sistema de manejo do solo para as variáveis de produção, persistência e ciclagem de macronutrientes (Tabela 4).

Nas duas safras conduzidas, em sistema de preparo convencional a produtividade de fitomassa do sorgo no estágio de pleno florescimento foi maior com a dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N, produzindo em média 37% e 49% a mais que a ausência de aplicação e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, respectivamente (Tabela 4). No SSD, a adubação nitrogenada favoreceu a produção de fitomassa, e apesar de no primeiro ano a dose de 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N diferirem entre si, ambas foram superiores à ausência de aplicação de N. Na safra 2019/20 a adubação nitrogenada em SSD resultou em maior produtividade de fitomassa em média de 45%, comparada a ausência de aplicação de N, e na safra 2021/22 a produtividade foi 27% maior.

No momento da semeadura da soja, nas safras 2019/20 e 2021/22, a adubação nitrogenada em SSD favoreceu a quantidade de fitomassa de sorgo, em média com 78% e 23% a mais de fitomassa, na primeira e segunda safra, respectivamente, quando comparada com a quantidade verificada no SSD sem adubação nitrogenada (Tabela 4). Em SPC, na safra 2019/20 a maior quantidade de fitomassa de sorgo no momento da semeadura da soja foi verificada com a dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N. E na safra 2021/22 a maior quantidade de fitomassa foi observada na ausência de adubação nitrogenada. Contudo, nos dois anos de cultivo, a dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> de N resultou em menor fitomassa de sorgo nessa época de avaliação.

Em relação a fitomassa de sorgo presente durante o enchimento de grãos da soja (R5), em ambos os sistemas de manejo do solo a dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N foi a que promoveu maior persistência da palhada nos dois anos de cultivo (Tabela 4). Cabe ressaltar que, na safra 2019/20 os sistemas de manejo do solo diferiram entre si apenas na dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, com maior presença de fitomassa no SPC. Enquanto que, na safra 2021/22, o SSD apresentou maior quantidade de fitomassa sobre o solo, independentemente da quantidade de N aplicado no cultivo do sorgo.

**Tabela 4 - Produção, persistência e ciclagem de nutrientes<sup>(1)</sup> pela fitomassa de sorgo cultivado sob diferentes doses de nitrogênio em preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD), durante o cultivo da soja nas safras de 2019/20 e 2021/22.**

Manejo do solo	Safrá 2019/20			Safrá 2021/22		
	Doses de N (kg ha <sup>-1</sup> )			Doses de N (kg ha <sup>-1</sup> )		
	0	50	100	0	50	100
Fitomassa de sorgo no florescimento (kg ha <sup>-1</sup> )						
SPC	4526aB	6380aA	4963bB	4872aB	6462aA	3638bC
SSD	3847aC	4604bB	6543aA	3931bB	5058bA	4936aA
Fitomassa de sorgo na semeadura da soja (kg ha <sup>-1</sup> )						
SPC	6339aB	7878bA	5167bC	5652aA	5053aB	4053bC
SSD	4594bC	8867aA	7500aB	4348bB	5224aA	5430aA
Fitomassa de sorgo em R5 da soja (kg ha <sup>-1</sup> )						
SPC	2956aC	4036aA	3510aB	2467bC	2677bA	2579bB
SSD	3067aB	4075aA	2917bC	2826aC	3907aA	3272aB
Ciclagem de N (kg ha <sup>-1</sup> )						
SPC	90,70aA	114,18aA	54,64aB	80,96aB	106,38aA	46,63bC
SSD	39,59bB	97,53aA	52,12aB	40,03bC	96,17bA	48,29aB
Ciclagem de P (kg ha <sup>-1</sup> )						
SPC	13,03aA	12,96aA	14,17aA	14,53aA	11,53bB	11,82aB
SSD	8,32bC	10,10bB	13,14aA	8,02bC	13,36aA	11,26aB
Ciclagem de K (kg ha <sup>-1</sup> )						
SPC	72,34aB	79,67bA	55,60bC	56,76aB	63,09bA	35,76bC
SSD	48,42bC	87,25aA	75,25aB	38,07bC	78,83aA	64,78aB
Ciclagem de Ca (kg ha <sup>-1</sup> )						
SPC	34,92aA	25,01bB	16,14bC	27,69aA	23,74bB	16,49bC
SSD	13,85bB	33,91aA	32,82aA	14,28bC	36,45aA	33,74aB
Ciclagem de Mg (kg ha <sup>-1</sup> )						
SPC	12,09aB	15,44aA	9,59bC	12,27aB	17,08aA	7,54bC
SSD	9,26bB	12,81bA	13,35aA	6,79bB	11,88bA	12,77aA
Ciclagem de S (kg ha <sup>-1</sup> )						
SPC	4,06aA	3,66aA	2,11aB	3,41aA	1,60aB	0,78aC
SSD	1,38bB	3,58aA	1,97aA	1,28bA	1,23bA	0,63aB

Média seguida de letras iguais, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo test t de Student ( $p < 0,05$ ). <sup>(1)</sup> Diferença na quantidade de nutrientes observada na palhada de sorgo entre a semeadura e o estádio R5 da soja.

Entre a semeadura e o início do enchimento de grãos da soja, a dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N em ambos os sistemas de manejo do solo foi a que apresentou maior ciclagem de N, K e Mg nas duas safras avaliadas (Tabela 4).

Quanto à ciclagem de P, os sistemas de manejo se diferiram em função da dose de N. Nas safras 2019/20 e 2021/22, em SPC a maior liberação de P pela fitomassa de sorgo ocorreu na ausência da aplicação de N, em contrapartida, no SSD a adubação nitrogenada promoveu a maior ciclagem de P (Tabela 4).

Além da maior ciclagem de P verificado em SSD associado à adubação nitrogenada, este tratamento (SSD com 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N) também apresentou maior ciclagem de Ca, Mg e S, nas duas safras (Tabela 4).

A liberação de Ca e S pela fitomassa do sorgo até R5 da soja também apresentou comportamento distinto entre os sistemas de manejo e doses de N. Nas duas safras avaliadas, a maior liberação destes nutrientes em SPC esteve associada a ausência de N, enquanto em SSD com a dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N (Tabela 4).

De modo geral, nas duas safras conduzidas, a dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N em ambos os sistemas de manejo do solo, promoveu maior ciclagem de nutrientes pela fitomassa do sorgo até o enchimento de grãos de soja. Considerando as médias entre as duas safras, em SPC com 50 kg ha<sup>-1</sup> de N foi ciclado 110, 12, 71, 24, 16 e 3 kg ha<sup>-1</sup> de N, P, K, Ca, Mg e S, respectivamente, e em SSD com 50 kg ha<sup>-1</sup> de N a fitomassa de sorgo liberou no sistema de produção 97, 11, 83, 35, 12 e 2 kg ha<sup>-1</sup> de N, P, K, Ca, Mg e S, respectivamente (Tabela 4). Desta forma, em SPC 50 kg ha<sup>-1</sup> de N houve a liberação de 13%, 9%, 33% e 50% a mais de N, P, Mg e S, respectivamente, enquanto, em SSD com 50 kg ha<sup>-1</sup> de N houve maior liberação de K e Ca em 17% e 46%, respectivamente.

#### **4.2 Desenvolvimento radicular das plantas de sorgo biomassa**

Na profundidade de 0,00 – 0,10 m, nos dois anos de cultivo do sorgo, as variáveis de fitomassa seca de raiz, diâmetro médio, densidade de comprimento e volume radicular apresentaram interação significativa entre o manejo do solo e as doses de N (Tabela 5).

Em SPC a ausência da adubação nitrogenada resultou em maior fitomassa seca de raiz, maior diâmetro e volume radicular, em comparação com as doses de 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N (Tabela 5). No entanto, para densidade do comprimento radicular a ausência de aplicação de N e a dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> não se diferiram entre si, apresentando diferença apenas com a dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, na qual apresentou densidade superior em 34%, em relação a maior dose.

O tratamento sem adubação nitrogenada em SPC, considerando a média das duas safras, produziu aproximadamente 72% e 89% a mais de fitomassa seca do que a dose de 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, respectivamente (Tabela 5). Em relação ao diâmetro radicular, a ausência de aplicação de N, nas duas safras, apresentou raízes mais grossas em comparação as doses de 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup>, correspondendo em 41% e 54%, respectivamente. O volume radicular no tratamento sem N foi 64% maior em relação a dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> e 88% comparado a dose de 100 kg ha<sup>-1</sup>.

**Tabela 5 - Fitomassa seca de raiz, diâmetro médio radicular, densidade de comprimento radicular e volume radicular de plantas de sorgo cultivadas sob diferentes doses de nitrogênio em preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD) nas safras de 2019/20 e 2021/22, na profundidade de 0,00 – 0,10 m**

Manejo do solo	Safrá 2019/20			Safrá 2021/22		
	Doses de N (kg ha <sup>-1</sup> )			Doses de N (kg ha <sup>-1</sup> )		
	0	50	100	0	50	100
	Fitomassa seca de raiz (kg ha <sup>-1</sup> )					
SPC	3795aA	1056aB	434bC	3300aA	918aB	378bC
SSD	953bB	967aB	2438aA	829bB	841aB	2120aA
	Diâmetro médio (mm)					
SPC	0,56aA	0,33aB	0,26bC	0,72aA	0,42aB	0,33bC
SSD	0,26bB	0,29bB	0,55aA	0,33bB	0,37bB	0,71aA
	Densidade do comprimento radicular (cm cm <sup>-3</sup> )					
SPC	1,57bA	1,68bA	1,08bB	1,13bA	1,21bA	0,78bB
SSD	2,60aB	3,57aA	1,90aC	1,87aB	2,57aA	1,36aC
	Volume radicular (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )					
SPC	7,49aA	2,66aB	0,89bC	6,40aA	2,27aB	0,76bC
SSD	1,89bC	3,05aB	6,36aA	1,61bC	2,60aB	5,44aA

Média seguida de letras iguais, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo test t de Student ( $p < 0,05$ ).

Em SPC o maior desenvolvimento radicular do sorgo ocorreu na ausência de adubação nitrogenada, e em SSD a maior produção de Fitomassa seca de raiz, diâmetro médio e volume radicular ocorreu na dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, e a densidade de comprimento radicular foi maior com a dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> (Tabela 5).

Considerando as duas safras, na profundidade de 0,00 – 0,10 m, a aplicação de 100 kg ha<sup>-1</sup> de N em SSD resultou em aproximadamente 60% a mais da produção de fitomassa seca, raízes com maior diâmetro em 50% e volume radicular superior em 26%, em relação à ausência ou 50 kg ha<sup>-1</sup> de N (Tabela 5). E a densidade de comprimento radicular foi maior em 27% e 47% na dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N, quando comparado à ausência e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, respectivamente, considerando a média das duas safras.

Na profundidade de 0,10 – 0,20 m, nas safras 2019/20 e 2021/22 houve interação significativa para as variáveis de fitomassa seca de raiz, densidade de comprimento e volume radicular (Tabela 6), enquanto a variável de diâmetro médio se diferiu apenas entre as doses de N (Tabela 7).

Na profundidade de 0,10 – 0,20 m a dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> de N resultou em maior produção de fitomassa e volume radicular em ambos os sistemas de manejo do solo, nas duas safras avaliadas. Em média, o sorgo cultivado em SPC e adubado com 100

kg ha<sup>-1</sup> de N produziu 53% e 32% a mais de fitomassa seca, quando comparado com a ausência da aplicação de N e com 50 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente; e apresentou volume radicular superior em 53% e 40% em relação à ausência da adubação nitrogenada e com 50 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Já a densidade de comprimento radicular não se diferiu entre as doses avaliadas neste sistema de manejo do solo (Tabela 6).

**Tabela 6 - Fitomassa seca de raiz, densidade de comprimento radicular e volume radicular de plantas de sorgo cultivadas sob diferentes doses de nitrogênio e sob preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD) nas safras de 2019/20 e 2021/22, na profundidade de 0,10 – 0,20 m**

Manejo do solo	Safrá 2019/20			Safrá 2021/22		
	Doses de N (kg ha <sup>-1</sup> )			Doses de N (kg ha <sup>-1</sup> )		
	0	50	100	0	50	100
	Fitomassa seca de raiz (kg ha <sup>-1</sup> )					
SPC	386aC	555aB	815aA	336aC	483aB	709aA
SSD	219bC	361bB	390bA	191bC	314bB	338bA
	Densidade do comprimento radicular (cm cm <sup>-3</sup> )					
SPC	0,84bA	0,82bA	0,99aA	0,60bA	0,59bA	0,72aA
SSD	1,44aA	1,16aB	0,95aB	1,04aA	0,83aB	0,69aB
	Volume radicular (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )					
SPC	0,68aB	0,88aB	1,46aA	0,58aB	0,75aB	1,24aA
SSD	0,82aB	0,78aB	1,08bA	0,70aB	0,67aB	0,92bA

Média seguida de letras iguais, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo test t de Student ( $p < 0,05$ ).

Já o sorgo manejado em SSD com a dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> de N produziu 44% e 7% a mais de fitomassa seca de raiz, quando comparado com a ausência da aplicação de N e com 50 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente; e apresentou volume radicular superior em 24% e 28% em relação à ausência da adubação nitrogenada e com 50 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. A maior densidade de comprimento radicular em SSD foi verificada na ausência da aplicação de N, apresentando valores superiores em 19% e 34%, quando comparada as doses de 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, respectivamente (Tabela 6).

Em relação ao diâmetro médio das raízes de sorgo, nas duas safras avaliadas, a dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> de N apresentou maior valor, se diferenciando dos demais tratamentos, apresentando raízes 24% mais grossas (Tabela 7).

**Tabela 7 - Diâmetro médio de raiz de plantas de sorgo cultivadas sob diferentes doses de nitrogênio e sob preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD) nas safras de 2019/20 e 2021/22, na profundidade de 0,10 – 0,20 m**

Sistema de manejo	Safra 2019/20	Safra 2021/22
	Diâmetro médio (mm)	
SPC	0,31a	0,40a
SSD	0,26a	0,33a
Doses de N (kg ha <sup>-1</sup> )		
0	0,24b	0,31b
50	0,28b	0,35b
100	0,34a	0,44a

Média seguida de letras minúsculas iguais não diferem entre si pelo test t de Student ( $p < 0,05$ ).

Na profundidade de 0,20 – 0,40 m não houve interação entre os sistemas de manejo e doses de N, apresentando apenas significância entre os fatores isolados (Tabela 8).

Entre os sistemas de manejo do solo, na safra 2019/20, a fitomassa seca de raiz foi maior em 20% no SSD, comparado ao SPC, porém na safra 2021/22 não houve diferença significativa. As variáveis de diâmetro médio e volume radicular não diferiram entre os sistemas de manejo nas duas safras avaliadas. E a densidade de comprimento radicular foi maior em 35% em SSD, considerando a média das duas safras (Tabela 8).

**Tabela 8 - Fitomassa seca de raiz (FSR), diâmetro médio radicular (DMR), densidade de comprimento radicular (DCR) e volume radicular (VR) de plantas de sorgo cultivadas sob diferentes doses de nitrogênio em preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD) nas safras de 2019/20 e 2021/22, na profundidade de 0,20 – 0,40 m**

Sistema de manejo	Safra 2019/20				Safra 2021/22			
	FSR kg ha <sup>-1</sup>	DM mm	DCR cm cm <sup>-3</sup>	VR m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	FSR kg ha <sup>-1</sup>	DM mm	DCR cm cm <sup>-3</sup>	VR m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>
SPC	61b	0,23a	0,18b	0,21a	53a	0,29a	0,13b	0,18a
SSD	76a	0,20a	0,28a	0,28a	66a	0,26a	0,20a	0,24a
Doses de N (kg ha <sup>-1</sup> )								
0	111a	0,23a	0,30a	0,36a	96a	0,30a	0,21a	0,31a
50	55b	0,21a	0,23ab	0,22b	48b	0,26a	0,18ab	0,19b
100	41c	0,21a	0,16b	0,16b	36c	0,27a	0,12b	0,14b

Média seguida de letras minúsculas iguais não diferem entre si pelo test t de Student ( $p < 0,05$ ).

Entre as doses de N, a maior fitomassa seca de raiz foi verificada no tratamento sem adubação nitrogenada, representando 50% e 63% a mais da produção de raiz

verificada na dose de 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, considerando a média das duas safras (Tabela 5). O diâmetro médio radicular não se diferiu entre as doses de N, nas safras avaliadas (Tabela 8). Já a densidade de comprimento radicular na ausência de adubação nitrogenada foi maior em 47% (safra 2019/20) e 43% (safra 2021/22), em relação a dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, porém não se diferiu da dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> (Tabela 8). E o volume radicular na ausência de N, nas duas safras, foi superior em 47% em relação a aplicação de N (50 e 100 kg ha<sup>-1</sup>).

Na profundidade de 0,40 – 0,60 m, nos dois anos de cultivo do sorgo, as variáveis de fitomassa seca de raiz, diâmetro médio, densidade de comprimento e volume radicular apresentaram interação significativa entre o manejo do solo e as doses de N (Tabela 9).

Em SPC a dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N resultou em maior fitomassa seca de raiz e diâmetro radicular. A dose 50 kg ha<sup>-1</sup> produziu em média 48% e 14% a mais de fitomassa seca, em comparação à ausência de N e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N; e apresentou diâmetro maior em 36% e 42%, comparado à ausência de N e 100 kg ha<sup>-1</sup> (Tabela 9).

**Tabela 9 - Fitomassa seca de raiz, diâmetro médio radicular, densidade de comprimento radicular e volume radicular de plantas de sorgo cultivadas sob diferentes doses de nitrogênio em preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD) nas safras de 2019/20 e 2021/22, na profundidade de 0,40 – 0,60 m**

Manejo do solo	Safr 2019/20			Safr 2021/22		
	Doses de N (kg ha <sup>-1</sup> )			Doses de N (kg ha <sup>-1</sup> )		
	0	50	100	0	50	100
	Fitomassa seca de raiz (kg ha <sup>-1</sup> )					
SPC	43bC	83aA	71aB	37bC	72aA	62aB
SSD	91aA	50bB	36bC	79aA	44bB	31bC
	Diâmetro médio (mm)					
SPC	0,23aB	0,36aA	0,21aB	0,29aB	0,46aA	0,27aB
SSD	0,22aA	0,21bA	0,24aA	0,29aA	0,27bA	0,31aA
	Densidade do comprimento radicular (cm cm <sup>-3</sup> )					
SPC	0,20bA	0,10bB	0,21aA	0,14bA	0,07bB	0,15aA
SSD	0,39aA	0,23aB	0,12bC	0,28aA	0,16aB	0,09bC
	Volume radicular (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )					
SPC	0,21bA	0,25aA	0,19aA	0,18bA	0,22aA	0,17aA
SSD	0,48aA	0,21aB	0,13aC	0,41aA	0,18aB	0,11bC

Média seguida de letras iguais, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo test t de Student ( $p < 0,05$ ).

Apesar da maior produção de fitomassa seca e diâmetro radicular verificados em SPC na dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N, este mesmo tratamento foi o que apresentou

menor densidade de comprimento radicular (Tabela 9). E para variável volume radicular, em SPC não houve diferença entre as doses de N.

Já em SSD, nas duas safras avaliadas, a ausência de aplicação de N resultou em maior produtividade de fitomassa seca, densidade de comprimento radicular e volume radicular (Tabela 9). Em relação a fitomassa seca, nas duas safras, a ausência de N resultou em 45% e 60% a mais de raiz, comparado a dose de 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. A densidade de comprimento radicular em SSD sem N foi maior em 41% e 69%, em comparação a dose de 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, respectivamente. E o volume radicular na ausência de N em SSD foi superior em 56% e 73% em relação a dose de 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, respectivamente. Já a variável diâmetro médio radicular, em SSD se diferiu entre as doses de N.

De modo geral, o efeito das doses de N e dos sistemas de manejo do solo interferiram no desenvolvimento radicular do sorgo, contudo os efeitos foram distintos em cada profundidade do solo (Tabela 5, 6, 7, 8 e 9).

#### **4.3 Nitrogênio total no solo e fracionamento físico da matéria orgânica do solo**

Os teores de carbono orgânico total (COT) e de carbono orgânico associado aos minerais (COM), na profundidade de 0,00 – 0,10 m, apresentaram interação significativa. Em todos os níveis do fator adubação nitrogenada o SSD apresentou maiores teores de COT (Tabela 10). Em SPC não houve diferença entre as doses de N, no entanto, em SSD houve maior teor de COT nas doses de 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N (Tabela 10). A adubação nitrogenada em SSD promoveu aumento de 18% nos teores de COT, em relação a ausência de aplicação de N.

**Tabela 10 - Carbono orgânico total e carbono orgânico associado aos minerais, na profundidade de 0,00 – 0,10 m, em sistema de preparo convencional (SPC) e semeadura direta (SSD), com adubação nitrogenada em sistema de produção**

Sistema de manejo	Dose de N (kg ha <sup>-1</sup> )		
	0	50	100
	Carbono orgânico total (g kg <sup>-1</sup> )		
SPC	18,10bA	19,25bA	17,65bA
SSD	24,13aB	28,54aA	28,27aA
	Carbono orgânico associado aos minerais (g kg <sup>-1</sup> )		
SPC	15,02aA	15,37bA	14,45bA
SSD	15,39aB	20,45aA	18,97aA

Média seguida de letras iguais, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo test t de Student ( $p < 0,05$ ).

Os teores de COM, na profundidade de 0,00 – 0,10 m, não se diferiram entre os sistemas de manejo do solo na ausência de N, porém, nas doses de 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> os teores forem maiores em SSD (Tabela 10). Em SPC, o teor de COM não se diferiu entre os níveis de N, mas em SSD a adubação nitrogenada aumentou em média 28% o teor de COM, em relação a ausência de N.

Já os teores de nitrogênio total no solo (NT) e de carbono orgânico particulado (COP) se diferiram apenas em função do sistema de manejo do solo, sendo que o SSD apresentou 51% e 61% a mais de NT e COT, respectivamente, em comparação ao SPC (Tabela 11).

**Tabela 11 - Nitrogênio total (NT) e carbono orgânico particulado (COP), na profundidade de 0,00 – 0,10 m, em sistema de preparo convencional (SPC) e semeadura direta (SSD), com adubação nitrogenada em sistema de produção**

Manejo do solo	NT	COP
	g kg <sup>-1</sup>	
SPC	1,04b	3,38b
SSD	2,13a	8,71a
	Doses de N (kg ha <sup>-1</sup> )	
0	1,59a	5,91a
50	1,51a	5,98a
100	1,65a	6,25a

Média seguida de letras minúsculas iguais não diferem entre si pelo test t de Student ( $p < 0,05$ ).

Na profundidade de 0,10 – 0,20 m, houve interação significativa para as variáveis de NT, COT, COP e COM (Tabela 12). Em SPC a dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> de N

apresentou maior teor de NT, diferindo da ausência de aplicação e da dose de 50 kg ha<sup>-1</sup>. Em SSD, o maior teor de NT foi observado com a dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N, sendo superior em 27% e 39% em relação a ausência de aplicação de N e a dose de 100 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

**Tabela 12 - Nitrogênio total, carbono orgânico total, carbono orgânico particulado e carbono orgânico associado aos minerais, na profundidade de 0,10 – 0,20 m, em sistema de preparo convencional (SPC) e semeadura direta (SSD), com adubação nitrogenada em sistema de produção**

Sistema de manejo	Dose de N (kg ha <sup>-1</sup> )		
	0	50	100
	Nitrogênio total (g kg <sup>-1</sup> )		
SPC	0,83aB	0,93bB	1,08aA
SSD	0,90aB	1,23aA	0,75bC
	Carbono orgânico total (g kg <sup>-1</sup> )		
SPC	17,55aA	18,17bA	17,52aA
SSD	15,52bC	19,60aA	17,30aB
	Carbono orgânico particulado (g kg <sup>-1</sup> )		
SPC	2,63aA	3,03bA	3,28aA
SSD	1,89bB	3,72aA	2,40aB
	Carbono orgânico associado aos minerais (g kg <sup>-1</sup> )		
SPC	10,61aA	9,95aA	9,70aA
SSD	8,22bC	10,35aA	9,40aB

Média seguida de letras iguais, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo test t de Student ( $p < 0,05$ ).

Os teores de COT, COP e COM, na profundidade de 0,10 – 0,20 m, apresentaram comportamento semelhantes. Na ausência de adubação nitrogenada, o SPC apresentou teores de COT, COP e COM superiores ao SSD; na dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> houve maior teor de COT e COM em SSD, porém sem diferença estatística nos teores de COM entre os sistemas de manejo; já na dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> não houve diferença estatística entre os sistemas de manejo, para as variáveis de COT, COP e COM (Tabela 12).

Na profundidade de 0,10 – 0,20 m, em SPC as doses de N não influenciaram nos teores de COT, COP e COM, mas em SSD a dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> resultou em maior teor destas variáveis (Tabela 12).

Na profundidade de 0,20 – 0,40 m, não houve interação para as variáveis NT, COT, COP e COM, apresentando significância apenas para os fatores isolados (manejo e Adubação nitrogenada). Os sistemas de manejo do solo não interferiram no

teor de NT, no entanto, entre os níveis de N, a dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> apresentou 22% a mais de NT, em relação à ausência de adubação nitrogenada, se diferindo estatisticamente, porém sem diferença com a dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> (Tabela 13).

**Tabela 13 - Nitrogênio total (NT), carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COP) e carbono orgânico associado aos minerais (COM), na profundidade de 0,20 – 0,40 m, em sistema de preparo convencional (SPC) e semeadura direta (SSD), com adubação nitrogenada em sistema de produção**

Manejo do solo	NT	COT	COP	COM
	g kg <sup>-1</sup>			
SPC	0,70a	15,10a	2,25a	12,85a
SSD	0,43a	12,11b	1,07b	11,04b
Doses de N (kg ha <sup>-1</sup> )				
0	0,50b	11,93b	1,55a	10,38b
50	0,56ab	14,45a	1,58a	12,87a
100	0,64a	14,44a	1,85a	12,59a

Média seguida de letras minúsculas iguais não diferem entre si pelo test t de Student ( $p < 0,05$ ).

O SPC, na profundidade de 0,20 – 0,40 m, apresentou maiores teores de COT, COP e COM, em relação ao SSD (Tabela 13). Em relação aos níveis de N, a adubação nitrogenada (50 e 10 kg ha<sup>-1</sup>) proporcionou aumento nos teores de COT e COM, em relação a ausência de aplicação de N, todavia, não houve diferença para o COP (Tabela 13).

Na profundidade de 0,40 – 0,60 m, o teor de NT e COP não se diferiu em função do sistema de manejo e dos níveis de N (Tabela 14).

**Tabela 14 - Nitrogênio total (NT) e carbono orgânico particulado (COP), na profundidade de 0,40 – 0,60 m, em sistema de preparo convencional (SPC) e semeadura direta (SSD), com adubação nitrogenada em sistema de produção**

Manejo do solo	NT	COP
	g kg <sup>-1</sup>	
SPC	0,41a	0,84a
SSD	0,34a	0,64a
Doses de N (kg ha <sup>-1</sup> )		
0	0,45a	0,83a
50	0,35a	0,69a
100	0,33a	0,70a

Média seguida de letras minúsculas iguais não diferem entre si pelo test t de Student ( $p < 0,05$ ).

Já os teores de COT e COM, na profundidade de 0,40 – 0,60 m, apresentaram interação significativa. Os teores de COT e COM entre os sistemas de manejo do solo se diferiram apenas na ausência de aplicação de N, com maiores teores em SPC (Tabela 15). Em SPC os níveis de N não influenciaram nos teores de COT e COM, porém, em SSD a dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> resultou em maior teor dessas variáveis (Tabela 15).

**Tabela 15 - Carbono orgânico total e carbono orgânico associado aos minerais, na profundidade de 0,40 – 0,60 m, em sistema de preparo convencional (SPC) e semeadura direta (SSD), com adubação nitrogenada em sistema de produção**

Sistema de manejo	Dose de N (kg ha <sup>-1</sup> )		
	0	50	100
	Carbono orgânico total (g kg <sup>-1</sup> )		
SPC	10,61aA	9,95aA	9,70aA
SSD	8,22bC	10,35aA	9,40aB
	Carbono orgânico associado aos minerais (g kg <sup>-1</sup> )		
SPC	9,60aA	9,21aA	8,92aA
SSD	7,57bC	9,70aA	8,78aB

Média seguida de letras iguais, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo test t de Student (p<0,05).

De modo geral, considerando todo o perfil de solo avaliado (0,00 - 0,60 m), em SPC os níveis de N não interferiram nos teores de COT e COM; em SSD a dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N favoreceu o aumento nos teores de COT, COP e COM; e o teor de NT foi maior com adubação nitrogenada e em SSD (Tabela 10, 11, 12, 13, 14 e 15).

#### 4.4 Estabilidade de agregados em água

Na profundidade de 0,00 -0,10 m, as variáveis de agregados maiores que 2 mm (Ag>2 mm), diâmetro médio geométrico (DMG), diâmetro médio ponderado (DMP) e índice de estabilidade de agregados (IEA) não apresentaram interação significativa, sendo a diferenças observadas apenas em função do sistema de manejo (Tabela 16).

**Tabela 16 - Agregados maiores que 2 mm (Ag>2 mm), diâmetro médio geométrico (DMG), diâmetro médio ponderado (DMP) e índice de estabilidade de agregados (IEA), na profundidade de 0,00 – 0,10 m, em sistema de preparo convencional (SPC) e semeadura direta (SSD), com adubação nitrogenada em sistema de produção**

Manejo do solo	Ag>2 mm	DMG	DMP	IEA
	%	-----mm-----		%
SPC	48,73b	1,65b	2,81b	89,06b
SSD	84,46a	3,61a	4,34a	96,68a
Doses de N (kg ha <sup>-1</sup> )				
0	65,25a	2,55a	3,51a	92,39a
50	71,24a	2,82a	3,79a	94,23a
100	63,30a	2,53a	3,43a	92,00a

Média seguida de letras minúsculas iguais não diferem entre si pelo test t de Student ( $p < 0,05$ ).

Na profundidade de 0,00 - 0,10 m, o SSD teve resultados superiores ao SPC para todas as variáveis, apresentou 42% a mais de Ag>2 mm, agregados com DMG maior em 54%, DMP superior em 35% e IEA maior em 8% (Tabela 16).

Na profundidade de 0,10 -0,20 m, o Ag>2 mm, DMG e DMP se diferiram apenas em função do sistema de manejo do solo. O SSD apresentou médias de Ag>2 mm, DMG e DMP superiores ao SPC. Este sistema de manejo do solo proporcionou maior formação de Ag>2 mm em 41%, DMG superior em 51% e DMP de 30% a mais, isso em comparação ao SPC (Tabela 17).

**Tabela 17 - Agregados maiores que 2 mm (Ag>2 mm), diâmetro médio geométrico (DMG) e diâmetro médio ponderado (DMP), na profundidade de 0,10 – 0,20 m, em sistema de preparo convencional (SPC) e semeadura direta (SSD), com adubação nitrogenada em sistema de produção**

Manejo do solo	Ag>2 mm	DMG	DMP
	%	-----mm-----	
SPC	39,15b	1,27b	2,48b
SSD	66,45a	2,58a	3,56a
Doses de N (kg ha <sup>-1</sup> )			
0	48,66a	1,88a	2,94a
50	59,63a	2,12a	3,26a
100	50,00a	1,77a	2,87a

Média seguida de letras minúsculas iguais não diferem entre si pelo test t de Student ( $p < 0,05$ ).

O IEA, na profundidade de 0,10 – 0,20 m, apresentou interação significativa ( $p < 0,05$ ). Sendo que, em todos os níveis de N o SSD teve maior IEA. Em SPC, a dose

de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N apresentou agregados mais estáveis em água, porém em SSD as doses de N não interferiram no IEA (Tabela 18).

**Tabela 18 - Índice de estabilidade de agregados, na profundidade de 0,10 – 0,20 m, em sistema de preparo convencional (SPC) e semeadura direta (SSD), com adubação nitrogenada em sistema de produção**

Sistema de manejo	Dose de N (kg ha <sup>-1</sup> )		
	0	50	100
	Índice de estabilidade de agregados (%)		
SPC	84,56bB	87,21bA	80,55bC
SSD	94,53aA	96,70aA	95,55aA

Média seguida de letras iguais, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo test t de Student (p<0,05).

Já na profundidade de 0,20 – 0,40 m, os níveis de N testados influenciaram a variável de Ag>2 mm, no entanto não interferiram no DMP. A dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> apresentou maior porcentagem de agregados maiores que 2 mm, se diferindo da ausência de aplicação de N e da dose de 50 kg ha<sup>-1</sup>. Os sistemas de manejo do solo não interferiram no Ag>2 mm e DMP (Tabela 19).

**Tabela 19 - Agregados maiores que 2 mm (Ag>2 mm) e diâmetro médio ponderado (DMP), na profundidade de 0,20 – 0,40 m, em sistema de preparo convencional (SPC) e semeadura direta (SSD), com adubação nitrogenada em sistema de produção**

Manejo do solo	Ag>2 mm	DMP
	%	mm
SPC	38,69a	2,42a
SSD	42,17a	2,56a
Doses de N (kg ha <sup>-1</sup> )		
0	36,62b	2,37a
50	40,23b	2,45a
100	44,45a	2,64a

Média seguida de letras minúsculas iguais não diferem entre si pelo test t de Student (p<0,05).

Em relação ao DMG e ao IEA, na profundidade de 0,20 – 0,40 m, sem aplicação de N não houve diferença entre os sistemas de manejo, no entanto, nas doses de 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup>, estes parâmetros foram superiores em SSD. Em SPC, o DMG e o IEA não diferiram entre os níveis de N, porém, em SSD a aplicação de N, independente da dose, apresentou maior valor de DMG e IEA, em relação à ausência de N (Tabela 20).

**Tabela 20 - Diâmetro médio geométrico e índice de estabilidade de agregados, na profundidade de 0,20 – 0,40 m, em sistema de preparo convencional (SPC) e semeadura direta (SSD), com adubação nitrogenada em sistema de produção**

Sistema de manejo	Dose de N (kg ha <sup>-1</sup> )		
	0	50	100
	Diâmetro médio geométrico (mm)		
SPC	1,25aA	1,18bA	1,20bA
SSD	1,18aB	1,44aA	1,67aA
	Índice de estabilidade de agregados (%)		
SPC	86,92aA	83,88bA	83,18bA
SSD	85,90aB	89,12aAB	92,82aA

Média seguida de letras iguais, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo test t de Student ( $p < 0,05$ ).

Na profundidade de 0,40 – 0,60 m, o  $Ag > 2$  mm, DMG, DMP e IEA, não apresentaram interação significativa. Dentre essas variáveis, o sistema de manejo do solo influenciou apenas o DMG, sendo que o SPC apresentou média superior em 19%, comparado ao SSD (Tabela 21). Já os níveis de N afetaram apenas a formação de agregados maiores que 2 mm, com diferença significativa entre a dose de 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup>, sendo que, a aplicação da maior dose de N resultou em 27% a mais de  $Ag > 2$  mm, em relação a dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> (Tabela 21). Já as variáveis DMP e IEA não apresentaram diferença em função do sistema de manejo do solo e níveis de N (Tabela 21).

**Tabela 21 - Agregados maiores que 2 mm ( $Ag > 2$  mm), diâmetro médio geométrico (DMG), diâmetro médio ponderado (DMP) e índice de estabilidade de agregados (IEA), na profundidade de 0,40 – 0,60 m, em sistema de preparo convencional (SPC) e semeadura direta (SSD), com adubação nitrogenada em sistema de produção**

Manejo do solo	Ag>2 mm	DMG	DMP	IEA
	%			
SPC	30,66a	1,09a	1,91a	84,52a
SSD	24,35a	0,88b	1,61a	80,68a
	Doses de N (kg ha <sup>-1</sup> )			
0	25,21ab	0,96a	1,62a	82,54a
50	24,15b	0,97a	1,75a	82,75a
100	33,15a	1,02a	1,92a	82,51a

Média seguida de letras minúsculas iguais não diferem entre si pelo test t de Student ( $p < 0,05$ ).

Em síntese, o SSD favoreceu a formação de agregados mais estáveis ao longo do perfil de solo avaliado (0,00 - 0,60 m), apresentando maiores valores de  $Ag > 2$  mm,

DMG, DMP e IEA; e a aplicação de N em sistema de produção com soja e milho também favoreceu a agregação do solo (Tabela 16, 17, 18, 19, 20 e 21).

#### 4.5 Propriedades físicas do solo, armazenamento e disponibilidade de água no solo

Na profundidade de 0,00 – 0,10 m houve interação significativa entre os sistemas de manejo do solo e aplicação de N para as variáveis de macroporosidade, microporosidade e densidade do solo (Ds) (Tabela 22). A porosidade total do solo (Pt), capacidade de água disponível (CAD) e resistência do solo à penetração das raízes (RP) apresentaram diferença apenas entre os fatores isolados (Tabela 23).

No SPC sem adubação nitrogenada, na camada de 0,00 – 0,10 m, a macroporosidade foi em média 32% maior, quando comparada com as doses de 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N. A microporosidade no SPC não se diferiu entre as doses de N, porém na ausência de N o SPC apresentou menor microporosidade, comparado ao SSD. Já a Ds em SPC sem aplicação de N foi 9% e 15% menor que na dose de 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente (Tabela 22).

**Tabela 22 - Macroporosidade, microporosidade e densidade do solo, na profundidade de 0,00 – 0,10 m, em sistema de preparo convencional (SPC) e semeadura direta (SSD), com adubação nitrogenada em sistema de produção**

Sistema de manejo	Dose de N (kg ha <sup>-1</sup> )		
	0	50	100
Macroporosidade (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )			
SPC	0,19aA	0,14bB	0,12aB
SSD	0,09bB	0,19aA	0,12aB
Microporosidade (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )			
SPC	0,33bA	0,36aA	0,36aA
SSD	0,40aA	0,33aB	0,35aB
Densidade do solo (g cm <sup>-3</sup> )			
SPC	1,05bC	1,15aB	1,24aA
SSD	1,25aA	1,04bC	1,12bB

Média seguida de letras iguais, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo test t de Student (p<0,05).

Em SSD com 50 kg ha<sup>-1</sup> de N, na camada de 0,00 – 0,10 m, a macroporosidade foi 45% maior que na ausência de N ou com 100 kg ha<sup>-1</sup>. Em SSD a microporosidade foi menor na presença de N, apresentando média inferior em 15%, comparada com a

ausência de adubação nitrogenada no sorgo. E a Ds em SSD também foi menor com aplicação de N, no entanto, houve diferença entre as doses aplicadas, sendo que o menor valor foi verificado em SSD com 50 kg ha<sup>-1</sup>, sendo 17% inferior à ausência de aplicação de N, e 7% à dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> (Tabela 22).

A PT, na camada de 0,00 – 0,10 m, não se diferiu em função dos sistemas de manejo do solo, no entanto, a dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> de N apresentou menor Pt em relação as demais doses (Tabela 23). A CAD em SSD foi 20% maior que em SPC, se diferindo estatisticamente. O maior valor de RP também foi observado em SSD. Sendo que a CAD e a RP não se diferiram em função da aplicação ou não de N (Tabela 23).

**Tabela 23 - Porosidade total do solo (PT), capacidade de água disponível (CAD) e resistência do solo à penetração das raízes (RP), na profundidade de 0,00 – 0,10 m, em sistema de preparo convencional (SPC) e semeadura direta (SSD), com adubação nitrogenada em sistema de produção**

Manejo do solo	PT	CAD	RP
	cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	MPa
SPC	0,50a	0,05b	1,09b
SSD	0,49a	0,06a	2,51a
Doses de N (kg ha <sup>-1</sup> )			
0	0,50a	0,06a	1,76a
50	0,51a	0,06a	1,75a
100	0,47b	0,06a	1,89a

Média seguida de letras minúsculas iguais não diferem entre si pelo test t de Student ( $p < 0,05$ ).

Na profundidade de 0,10 – 0,20 m, houve interação significativa para as variáveis de porosidade do solo (macro, micro e Pt) e Ds. Sendo a que a CAD e a RP se diferiram apenas entre os sistemas de manejo do solo (Tabela 24 e 25).

O SPC com 100 kg ha<sup>-1</sup> de N apresentou maior macroporosidade, microporosidade e Pt e menor Ds, comparado à ausência de N e 100 kg ha<sup>-1</sup>. Já em SSD a maior macroporosidade e menor Ds foram observadas sem adubação nitrogenada, enquanto que a microporosidade e a porosidade total não se diferiram em função das doses de N em SSD (Tabela 24).

**Tabela 24 - Macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo, na profundidade de 0,10 – 0,20 m, em sistema de preparo convencional (SPC) e semeadura direta (SSD), com adubação nitrogenada em sistema de produção**

Sistema de manejo	Dose de N (kg ha <sup>-1</sup> )		
	0	50	100
Macroporosidade (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )			
SPC	0,07bB	0,08aB	0,18aA
SSD	0,14aA	0,08aB	0,07bB
Microporosidade (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )			
SPC	0,40aA	0,40aA	0,33bB
SSD	0,37aA	0,40aA	0,41aA
Porosidade total (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )			
SPC	0,46bB	0,49aB	0,52aA
SSD	0,51aA	0,48aA	0,48bA
Densidade do solo (g cm <sup>-3</sup> )			
SPC	1,26aA	1,18aA	1,05bB
SSD	1,08bB	1,25aA	1,22aA

Média seguida de letras iguais, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo test t de Student ( $p < 0,05$ ).

A CAD e RP foram menores em 20% e 62% em SPC, respectivamente, em relação ao SSD, na camada de 0,10 - 0,20 m. Porém, não houve diferença nestas variáveis para o fator adubação nitrogenada (Tabela 25).

**Tabela 25 - Capacidade de água disponível (CAD) e resistência do solo à penetração das raízes (RP), na profundidade de 0,10 – 0,20 m, em sistema de preparo convencional (SPC) e semeadura direta (SSD), com adubação nitrogenada em sistema de produção**

Manejo do solo	CAD	RP
	cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	MPa
SPC	0,05b	1,91b
SSD	0,06a	4,99a
Doses de N (kg ha <sup>-1</sup> )		
0	0,05a	3,25a
50	0,05a	3,36a
100	0,05a	3,75a

Média seguida de letras minúsculas iguais não diferem entre si pelo test t de Student ( $p < 0,05$ ).

Na camada de 0,20 – 0,40 m, as variáveis de física do solo não apresentaram interação significativa entre os fatores testados, no entanto responderam ao manejo e a adubação nitrogenada (Tabela 26).

Na profundidade de 0,20 – 0,40 m, o sistema de manejo do solo não afetou a macro, micro e porosidade total do solo. No entanto, o SPC apresentou maior Ds e RP e menor CAD (Tabela 26).

**Tabela 26 - Macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro), porosidade total (PT), densidade do solo (DS), capacidade de água disponível (CAD) e resistência do solo à penetração das raízes (RP), na profundidade de 0,20 – 0,40 m, em sistema de preparo convencional (SPC) e semeadura direta (SSD), com adubação nitrogenada em sistema de produção**

Manejo do solo	Macro	Micro	PT	DS	CAD	RP
	-----cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> -----					MPa
SPC	0,08a	0,41a	0,49a	1,23a	0,05b	4,60a
SSD	0,10a	0,39a	0,49a	1,15b	0,06a	3,87b
Doses de N (kg ha <sup>-1</sup> )						
0	0,10a	0,39a	0,50a	1,14a	0,05a	4,25ab
50	0,10a	0,39a	0,48a	1,19a	0,05a	4,11b
100	0,07b	0,41a	0,48a	1,24a	0,05a	4,35a

Média seguida de letras minúsculas iguais não diferem entre si pelo test t de Student ( $p < 0,05$ ).

Em relação ao efeito da adubação nitrogenada, nesta profundidade do solo, a dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> resultou em menor macroporosidade. As variáveis de microporosidade, Pt, Ds e CAD não diferiram ( $p < 0,05$ ). Contudo, a RP na dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> foi maior que na dose de 50 kg ha<sup>-1</sup>, porém, sem diferença com a ausência de adubação nitrogenada (Tabela 26).

Na profundidade de 0,40 – 0,60 m, houve interação significativa apenas para macro e microporosidade do solo (Tabela 27). Na ausência de adubação nitrogenada e com 50 kg ha<sup>-1</sup>, o sistema convencional apresentou maior macro e microporosidade, já na dose de 100 kg ha<sup>-1</sup>, a maior macro e microporosidade foi observada em SSD.

Em SPC a dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> resultou em 227% a mais de macroporos e 33% a menos de microporos, em relação à ausência de aplicação de N e 100 kg ha<sup>-1</sup>. Já em SSD a macroporosidade se diferiu apenas entre a ausência de adubação de nitrogenada e a dose de 100 kg ha<sup>-1</sup>, sendo que a ausência de N apresentou em média 67% a mais de macroporos que a dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> (Tabela 27).

**Tabela 27 - Macroporosidade e microporosidade, na profundidade de 0,40 – 0,60 m, em sistema de preparo convencional (SPC) e semeadura direta (SSD), com adubação nitrogenada em sistema de produção**

Sistema de manejo	Dose de N (kg ha <sup>-1</sup> )		
	0	50	100
	Macroporosidade (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )		
SPC	0,06bB	0,05bB	0,18aA
SSD	0,10aA	0,08aAB	0,06bB
	Microporosidade (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )		
SPC	0,43aA	0,45aA	0,32bB
SSD	0,38bB	0,42bA	0,43aB

Média seguida de letras iguais, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo test t de Student ( $p < 0,05$ ).

A PT, CAD e RP não se diferiram em função dos fatores avaliados ( $p < 0,05$ ) (Tabela 28). A Ds só se diferiu para o fator adubação nitrogenada, sendo que a dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> apresentou média inferior aos demais tratamentos (Tabela 28).

**Tabela 28 - Porosidade total (PT), densidade do solo (DS), capacidade de água disponível (CAD) e resistência do solo à penetração das raízes (RP), na profundidade de 0,40 – 0,60 m, em sistema de preparo convencional (SPC) e semeadura direta (SSD), com adubação nitrogenada em sistema de produção**

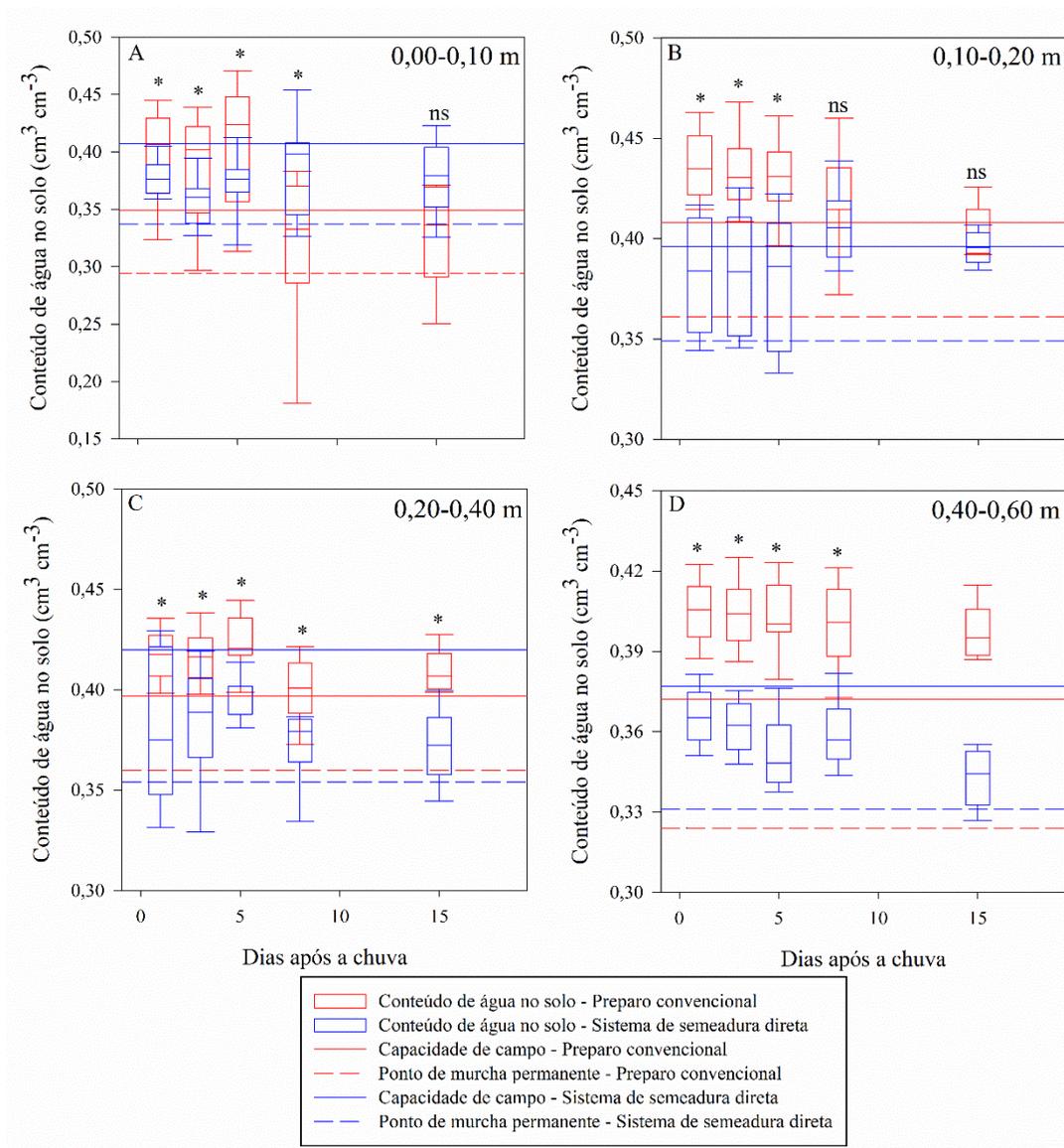
Manejo do solo	PT	DS	CAD	RP
	-----cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> -----			MPa
SPC	0,50a	1,13a	0,05a	3,78a
SSD	0,49a	1,21a	0,05a	3,42a
Doses de N (kg ha <sup>-1</sup> )				
0	0,49a	1,20a	0,05a	3,51a
50	0,50a	1,21a	0,05a	3,68a
100	0,50a	1,09b	0,05a	3,60a

Média seguida de letras minúsculas iguais não diferem entre si pelo test t de Student ( $p < 0,05$ ).

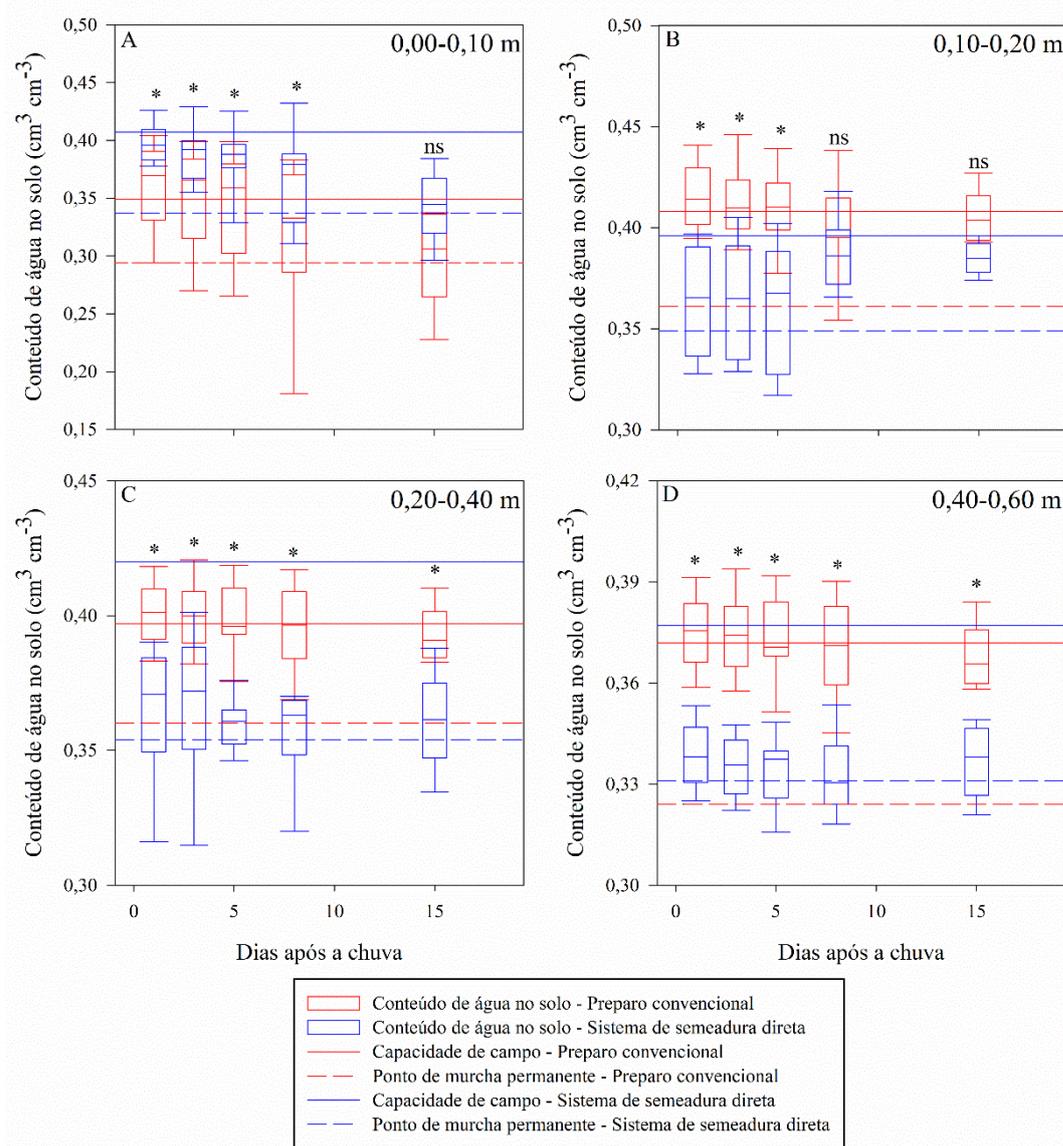
Como a capacidade de água disponível, ao longo do perfil do solo avaliado (0,00 – 0,60 m), só se diferiu em função dos sistemas de manejo do solo (Tabela 23, 25, 26 e 28), o armazenamento e disponibilidade de água no solo às plantas só foi avaliado em função do sistema de manejo do solo (Figura 2 e 3).

Nas duas safras avaliadas, ao longo do perfil do solo (0,00 – 0,60 m), o SPC apresentou maior conteúdo de água armazenada, aos 1, 3, 5, 8 e 15 dias após a chuva (DAC), exceto aos 15 DAC na profundidade de 0,00 – 0,10 m e aos oito e 15 DAC na profundidade de 0,10 – 0,120 m (Figura 2 e 3).

**Figura 2 - Armazenamento e disponibilidade de água no solo, nas profundidades de 0,00 – 0,10 m (A), 0,10 – 0,20 m (B), 0,20 – 0,40 m (C) e 0,40 – 0,60 m (D), em sistema de preparo convencional do solo e de semeadura direta (SSD), na safra 2019/20. \*: os sistemas de manejo do solo se diferem entre si na mesma leitura do dia após a chuva, pelo teste de Mann-Whitney ( $p < 0,05$ ); ns: os sistemas de manejo do solo não se diferem entre si na mesma leitura do dia após a chuva, pelo teste de Mann-Whitney ( $p < 0,05$ )**



**Figura 3 - Armazenamento e disponibilidade de água no solo, nas profundidades de 0,00 – 0,10 m (A), 0,10 – 0,20 m (B), 0,20 – 0,40 m (C) e 0,40 – 0,60 m (D), em sistema de preparo convencional do solo e de semeadura direta (SSD), na safra 2021/22. \*: os sistemas de manejo do solo se diferem entre si na mesma leitura do dia após a chuva, pelo teste de Mann-Whitney ( $p < 0,05$ ); ns: os sistemas de manejo do solo não se diferem entre si na mesma leitura do dia após a chuva, pelo teste de Mann-Whitney ( $p < 0,05$ )**



Apesar do SPC apresentar maior conteúdo de água armazenada, a maior disponibilidade de água no solo foi verificada em SSD, uma vez que em todas as profundidades e DAC, este sistema foi o que apresentou maior conteúdo de água entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente (faixa de água no solo

disponível para absorção pelas plantas), assim, em SSD o conteúdo de água no solo se manteve por mais vezes dentro da água disponível (Figura 2 e 3).

De maneira geral, ao longo do perfil do solo (0,00 - 0,60 m), houve diferença no comportamento das propriedades físicas do solo, contudo, o SSD apresentou maior CAD e RP e armazenou maior conteúdo de água no solo dentro da faixa de disponibilidade para as plantas (Tabela 22, 23, 24, 25, 26, 27 e 28 e Figura 2 e 3).

#### 4.6 Desenvolvimento radicular das plantas de soja

Na profundidade de 0,00 – 0,10 m, nas duas safras avaliadas, os sistemas de manejo do solo e os níveis de adubação nitrogenada aplicada apresentaram interação significativa para as variáveis de fitomassa seca de raiz, diâmetro médio e densidade de comprimento radicular (Tabela 29).

**Tabela 29 - Fitomassa seca de raiz, diâmetro médio e densidade de comprimento radicular de plantas de soja cultivadas sob preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD) e com adubação nitrogenada no sistema de produção, nas safras de 2019/20 e 2021/22, na profundidade de 0,00 – 0,10 m**

Manejo do solo	Safrá 2019/20			Safrá 2021/22		
	Doses de N (kg ha <sup>-1</sup> )			Doses de N (kg ha <sup>-1</sup> )		
	0	50	100	0	50	100
	Fitomassa seca de raiz (kg ha <sup>-1</sup> )					
SPC	599aB	643bB	1019aA	520aB	559bB	886aA
SSD	759aB	1537aA	592bC	661aB	1336aA	514aC
	Diâmetro médio (mm)					
SPC	0,30aA	0,31bA	0,32aA	0,26aA	0,27bA	0,28aA
SSD	0,31aB	0,37aA	0,33aB	0,27aB	0,32aA	0,29aB
	Densidade do comprimento radicular (cm cm <sup>-3</sup> )					
SPC	3,32aB	3,60aA	2,99aC	2,89aB	3,13aA	2,60aC
SSD	3,48aA	3,12bB	2,11bC	3,03aA	2,71bB	1,83bC

Média seguida de letras iguais, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo test t de Student ( $p < 0,05$ ).

Na profundidade de 0,00 - 0,10 m, os sistemas de manejo não afetaram a produção de fitomassa seca, diâmetro médio e densidade de comprimento radicular da soja na ausência de adubação nitrogenada no sorgo (Tabela 29). No entanto, a dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N em SSD apresentou 58% a mais de fitomassa seca, raízes

com diâmetro 16% maior e densidade de comprimento radicular inferior em 13%, em comparação ao SPC (Tabela 29). Já na dose 100 kg ha<sup>-1</sup> de N em SPC houve melhor desenvolvimento radicular, apresentando fitomassa seca de raiz superior em 42%, densidade de comprimento radicular 29% maior e o diâmetro médio não se diferiu, em comparação ao SSD (Tabela 29).

Nas duas safras avaliadas, na profundidade de 0,00 – 0,10 m, em SPC a dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> de N apresentou maior fitomassa seca de raiz, e a dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> maior desenvolvimento radicular, já o diâmetro médio das raízes não se diferiram entre os níveis de N (Tabela 29). Em SSD a dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N apresentou maior produção de fitomassa seca (51% a mais que na ausência de N e 61% a mais que na dose 100 kg ha<sup>-1</sup>) e maior diâmetro médio (13% a mais que os demais níveis de N), já a maior densidade do comprimento radicular foi observada na ausência de aplicação de N (51% a mais que na dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> e 39% a mais que na dose 100 kg ha<sup>-1</sup>) (Tabela 29).

Já o volume radicular, na profundidade de 0,00 – 0,10 m, nas safras 2019/20 e 2021/22, não apresentou interação significativa entre os fatores, porém se diferiram em função dos sistemas de manejo do solo e dos níveis de N. O SSD apresentou 19% a mais de volume de raiz, se diferenciando do SPC (Tabela 30). E a dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N se diferiu da ausência de adubação nitrogenada e da dose de 100 kg ha<sup>-1</sup>, apresentando volume radicular superior em aproximadamente 16% (Tabela 30).

**Tabela 30 - Volume radicular de plantas de soja cultivadas sob preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD) e com adubação nitrogenada no sistema de produção, nas safras de 2019/20 e 2021/22, na profundidade de 0,00 – 0,10 m**

Sistema de manejo	Safra 2019/20	Safra 2021/22
	Volume radicular (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	
SPC	1,86b	1,62b
SSD	2,29a	1,99a
Doses de N (kg ha <sup>-1</sup> )		
0	1,99b	1,73b
50	2,32a	2,02a
100	1,91b	1,66b

Média seguida de letras minúsculas iguais não diferem entre si pelo test t de Student (p<0,05).

Nas duas safras, na profundidade de 0,10 - 0,20 m, as variáveis de fitomassa seca de raiz, densidade de comprimento e volume radicular apresentaram interação

significativa. Na ausência de adubação nitrogenada, o SSD apresentou maior fitomassa seca de raiz, densidade de comprimento e volume radicular, apresentando 29%, 23% e 29%, respectivamente, em comparação ao SPC (Tabela 31). A dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N não se diferiu entre os sistemas de manejo do solo para densidade de comprimento e volume radicular, no entanto, houve diferença para fitomassa seca, sendo que o SPC foi superior ao SSD em 35% (Tabela 31). Já na dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> os sistemas de manejo do solo se diferiram quanto à fitomassa seca de raiz, densidade de comprimento e volume radicular, sendo que o SPC foi superior ao SSD, apresentando 57% a mais de fitomassa seca, 53% a mais de densidade de comprimento radicular e 55% a mais de volume radicular (Tabela 31).

**Tabela 31 - Fitomassa seca de raiz, densidade de comprimento e volume radicular de plantas de soja cultivadas sob preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD) e com adubação nitrogenada no sistema de produção, nas safras de 2019/20 e 2021/22, na profundidade de 0,10 – 0,20 m**

Manejo do solo	Safrá 2019/20			Safrá 2021/22		
	Doses de N (kg ha <sup>-1</sup> )			Doses de N (kg ha <sup>-1</sup> )		
	0	50	100	0	50	100
	Fitomassa seca de raiz (kg ha <sup>-1</sup> )					
SPC	121bB	123aB	250aA	106bB	107aB	217aA
SSD	170aA	80bB	108bC	147aA	70bC	94bB
	Densidade do comprimento radicular (cm cm <sup>-3</sup> )					
SPC	0,73bC	0,84aB	1,74aA	0,63bC	0,73aB	1,51aA
SSD	0,95aA	0,76aB	0,81bB	0,83aA	0,66aB	0,70bB
	Volume radicular (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )					
SPC	0,45bB	0,52aB	1,02aA	0,39bC	0,45aB	0,89aA
SSD	0,63aA	0,55aB	0,46bC	0,55aA	0,48aB	0,40bC

Média seguida de letras iguais, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo test t de Student ( $p < 0,05$ ).

Ao verificar o efeito dos níveis de N dentro de cada sistema de manejo, nota-se que, em SPC na profundidade de 0,10 – 0,20m, nas duas safras, a dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> de N resultou em maior desenvolvimento radicular, em comparação à ausência de aplicação de N e com 50 kg ha<sup>-1</sup>, apresentando em média 51% a mais de fitomassa seca, 55% a mais de densidade de comprimento e 52% e 53% a mais de volume radicular (Tabela 31). Em SSD, a ausência de adubação nitrogenada resultou em 41%, 17% e 20% a mais de fitomassa seca de raiz, densidade de comprimento e volume radicular, em comparação com a média das doses de 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N (Tabela 31).

Na profundidade de 0,10 – 0,20 m, nas safras 2019/20 e 2021/22, os sistemas de manejo e os níveis de N não influenciaram no diâmetro médio das raízes de soja (Tabela 32).

**Tabela 32 - Diâmetro médio radicular de plantas de soja cultivadas sob preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD) e com adubação nitrogenada no sistema de produção, nas safras de 2019/20 e 2021/22, na profundidade de 0,10 – 0,20 m**

Sistema de manejo	Safra 2019/20	Safra 2021/22
	Diâmetro médio (mm)	
SPC	0,32a	0,28a
SSD	0,33a	0,28a
Doses de N (kg ha <sup>-1</sup> )		
0	0,33a	0,29a
50	0,32a	0,28a
100	0,31a	0,27a

Média seguida de letras minúsculas iguais não diferem entre si pelo test t de Student ( $p < 0,05$ ).

Na profundidade de 0,20 – 0,40 m, nas duas safras avaliadas, a fitomassa seca de raiz, diâmetro médio, densidade de comprimento e volume radicular apresentaram interação significativa entre os fatores. Na ausência de aplicação de N, a fitomassa seca de raiz não diferiu entre os sistemas de manejo do solo, no entanto, o diâmetro médio, densidade de comprimento e volume radicular foi maior em SPC, diferindo significativamente do SSD (Tabela 33). Na dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N o SSD proporcionou maior produção de fitomassa seca, diâmetro médio e volume radicular, em comparação ao SPC, porém a densidade do comprimento radicular não diferiu entre os sistemas de manejo do solo. Já a dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> não influenciou a fitomassa seca de raiz e o volume radicular entre os sistemas de manejo do solo, entretanto, o SPC apresentou raízes com diâmetros maiores em 16% e densidade comprimento radicular inferior em 28%, em relação ao SSD.

Em SPC, na profundidade de 0,20 – 0,40 m, nas duas safras, o desenvolvimento das raízes de soja foi superior na ausência de adubação nitrogenada e na dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, diferindo da dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> para as variáveis de diâmetro médio, densidade de comprimento e volume radicular. No entanto, para fitomassa seca de raiz a dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> foi superior a ausência de aplicação de N e 50 kg ha<sup>-1</sup> (Tabela 33). Em SSD, apesar das doses de 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N apresentarem diferença para as variáveis de fitomassa seca de raiz, diâmetro médio,

densidade de comprimento e volume radicular, ambas as doses tiveram resultados superiores à ausência de aplicação de N para todas as variáveis (Tabela 33).

**Tabela 33 - Fitomassa seca de raiz, diâmetro médio, densidade de comprimento e volume radicular de plantas de soja cultivadas sob preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD) e com adubação nitrogenada no sistema de produção, nas safras de 2019/20 e 2021/22, na profundidade de 0,20 – 0,40 m**

Manejo do solo	Safr 2019/20			Safr 2021/22		
	Doses de N (kg ha <sup>-1</sup> )			Doses de N (kg ha <sup>-1</sup> )		
	0	50	100	0	50	100
Fitomassa seca de raiz (kg ha <sup>-1</sup> )						
SPC	47aB	48bB	109aA	41aB	42bB	95aA
SSD	37aC	115aA	100aB	33aC	100aA	87aB
Diâmetro médio (mm)						
SPC	0,35aA	0,27bB	0,38aA	0,30aA	0,24bB	0,33aA
SSD	0,27bC	0,44aA	0,32bB	0,24bC	0,38aA	0,28bB
Densidade do comprimento radicular (cm cm <sup>-3</sup> )						
SPC	0,29aA	0,25aB	0,28bA	0,26aA	0,18aB	0,25bA
SSD	0,18bC	0,21aB	0,39aA	0,16bC	0,21aB	0,34aA
Volume radicular (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )						
SPC	0,48aA	0,20bB	0,46aA	0,42aA	0,18bB	0,40aA
SSD	0,18bC	0,52aA	0,44aB	0,16bC	0,46aA	0,38aB

Média seguida de letras iguais, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo test t de Student ( $p < 0,05$ ).

Na profundidade de 0,40 – 0,60 m, nas safras 2019/20 e 2021/22, houve interação significativa para as variáveis de fitomassa seca de raiz, diâmetro médio, densidade de comprimento e volume radicular. Na ausência de adubação nitrogenada e na dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> de N houve maior fitomassa seca, densidade de comprimento e volume radicular em SPC, em comparação ao SSD (Tabela 34). Na dose de 50 kg ha<sup>-1</sup>, os sistemas de manejo de solo não se diferiram quanto à produção de fitomassa seca de raiz, porém, houve diferença significativa para densidade de comprimento e volume radicular, sendo que o SSD teve 36% e 15% a mais de densidade de comprimento e volume radicular, respectivamente, comparado ao SPC (Tabela 34).

Em SPC a dose de 100 kg ha<sup>-1</sup>, na profundidade de 0,40 - 0,60 m, nas duas safras, apresentou maior fitomassa seca de raiz (36% e 65% superior a dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> e a ausência de aplicação de N, respectivamente), densidade de comprimento (35% a mais que a ausência de aplicação de N, mas sem diferença estatística da dose de 50 kg ha<sup>-1</sup>) e volume radicular (61% a mais que a média da ausência de N e da dose de 50 kg ha<sup>-1</sup>) (Tabela 34).

**Tabela 34 - Fitomassa seca de raiz, diâmetro médio, densidade de comprimento e volume radicular de plantas de soja cultivadas sob preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD) e com adubação nitrogenada no sistema de produção, nas safras de 2019/20 e 2021/22, na profundidade de 0,40 – 0,60 m**

Manejo do solo	Safrá 2019/20			Safrá 2021/22		
	Doses de N (kg ha <sup>-1</sup> )			Doses de N (kg ha <sup>-1</sup> )		
	0	50	100	0	50	100
Fitomassa seca de raiz (kg ha <sup>-1</sup> )						
SPC	31bC	57aB	89bA	26bC	50aB	78bA
SSD	79aB	66aB	126aA	68aB	58aB	109aA
Densidade do comprimento radicular (cm cm <sup>-3</sup> )						
SPC	0,15bB	0,19bAB	0,23bA	0,13bB	0,16bB	0,20bA
SSD	0,24aC	0,49aA	0,36aB	0,21aC	0,43aA	0,31aB
Volume radicular (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )						
SPC	0,21bB	0,19bB	0,51bA	0,18bB	0,17bB	0,44bA
SSD	0,28aC	0,45aB	0,60aA	0,25aC	0,39aB	0,52aA

Média seguida de letras iguais, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo test t de Student ( $p < 0,05$ ).

Em SSD a adubação nitrogenada favoreceu o desenvolvimento radicular das plantas de soja, em comparação à ausência de aplicação de N no sistema de produção, na profundidade de 0,40 - 0,60 m, nas duas safras conduzidas (Tabela 34). Em SSD, apesar da variável de fitomassa seca de raiz não se diferir entre a ausência de aplicação de N e a dose de 50 kg ha<sup>-1</sup>, a dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> foi superior em 42% para esta variável, em relação aos outros níveis de N, com diferença estatística significativa ( $p < 0,05$ ) (Tabela 34). Em SSD, a densidade de comprimento e volume radicular na presença de adubação nitrogenada (50 e 100 kg ha<sup>-1</sup>) foi superior em 44% e 47%, respectivamente, em comparação a ausência de aplicação de N (Tabela 34).

Já o diâmetro médio das raízes de soja, na profundidade de 0,40 – 0,60 m, nas duas safras avaliadas, diferiu apenas em função dos níveis de N, sendo que a dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> resultou em raízes com diâmetro maior em 18% (Tabela 35).

**Tabela 35 - Diâmetro médio radicular de plantas de soja cultivadas sob preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD) e com adubação nitrogenada no sistema de produção, nas safras de 2019/20 e 2021/22, na profundidade de 0,40 – 0,60 m**

Sistema de manejo	Safra 2019/20	Safra 2021/22
	Diâmetro médio (mm)	
SPC	0,35a	0,31a
SSD	0,37a	0,32a
Doses de N (kg ha <sup>-1</sup> )		
0	0,33b	0,29b
50	0,34b	0,30b
100	0,41a	0,36a

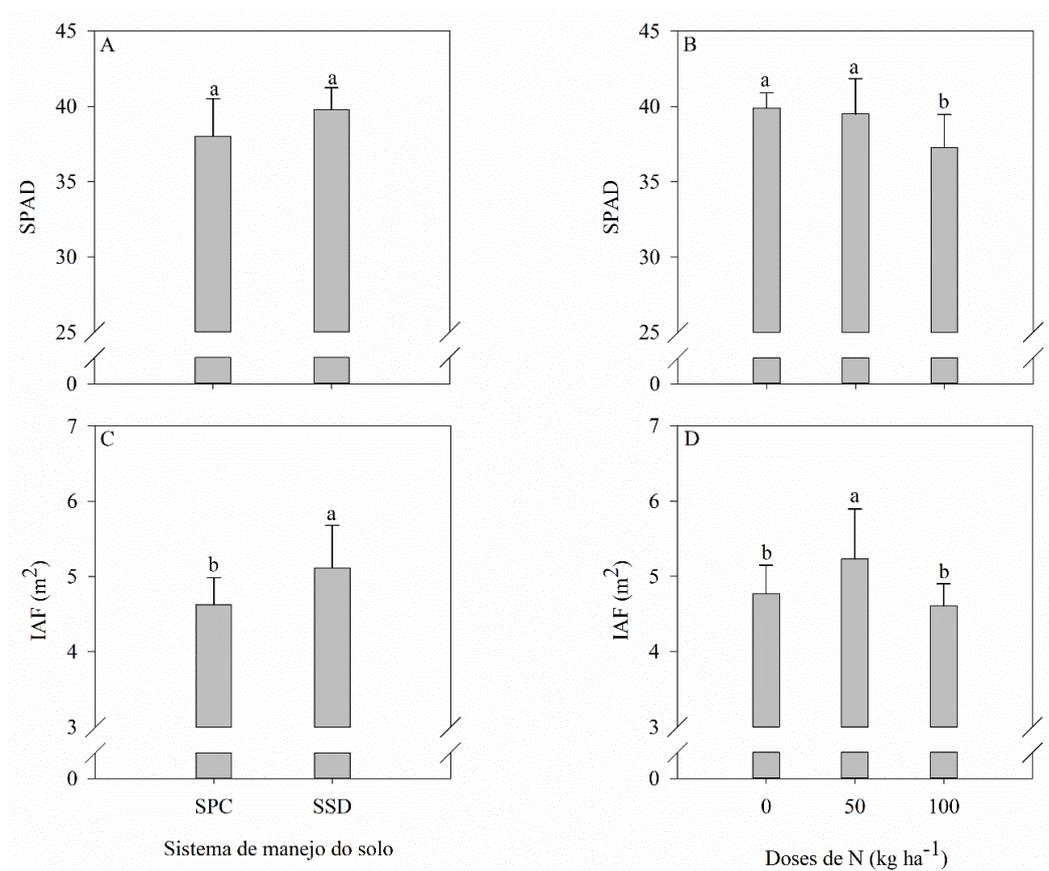
Média seguida de letras minúsculas iguais não diferem entre si pelo test t de Student ( $p < 0,05$ ).

Considerando as variáveis de fitomassa seca de raiz, diâmetro médio, densidade de comprimento e volume radicular avaliadas ao longo do perfil do solo (0,00 – 0,60 m), nas duas safras, em síntese, a adubação nitrogenada no cultivo do sorgo favoreceu o desenvolvimento radicular da soja; em SPC a dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N resultou em menor desenvolvimento das raízes e em SSD a adubação nitrogenada promoveu maior desenvolvimento radicular da soja (Tabela 29, 30, 31, 32, 33, 34 e 35).

#### **4.7 Parâmetros fisiológicos das plantas de soja**

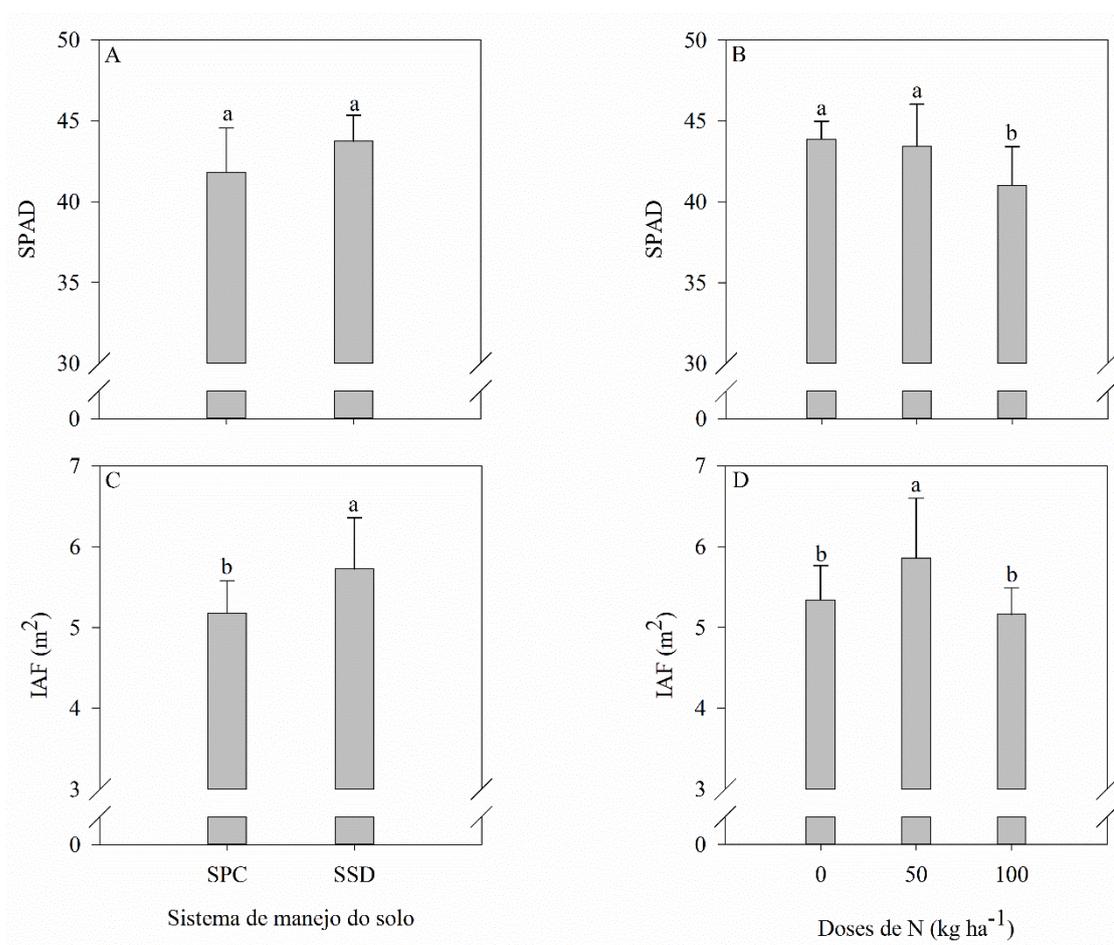
Nas duas safras avaliadas, os sistemas de manejo do solo não afetaram a resposta das plantas de soja quanto ao índice SPAD (Figura 4A e 5A). No entanto, a dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> de N apresentou menor valor, em relação à ausência de aplicação de N e 50 kg ha<sup>-1</sup> (Figura 4B e 5B).

**Figura 4 - Índice SPAD (SPAD – A e B) e de área foliar (IAF – C e D) de plantas de soja em sistema de preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD), cultivada em sistema de produção com sorgo sem adubação nitrogenada (dose 0) e com 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, na safra 2019/20. Médias com letras iguais não diferem entre os sistemas de manejo do solo (A e C) e doses de N (B e D), pelo test t de Student (p<0,05)**



Os sistemas de manejo do solo e a adubação nitrogenada influenciaram no índice de área foliar (IAF) das plantas de soja, sendo que o SSD e a dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N promoveram aumento em, aproximadamente, 10%, em relação aos demais tratamentos, dentro de cada fator de variação, em ambas as safras avaliadas (Figura 4C, 4D, 5C e 5D).

**Figura 5 - Índice SPAD (SPAD – A e B) e de área foliar (IAF – C e D) de plantas de soja em sistema de preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD), cultivada em sistema de produção com sorgo sem adubação nitrogenada (dose 0) e com 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, na safra 2021/22. Médias com letras iguais não diferem entre os sistemas de manejo do solo (A e C) e doses de N (B e D), pelo test t de Student (p<0,05)**

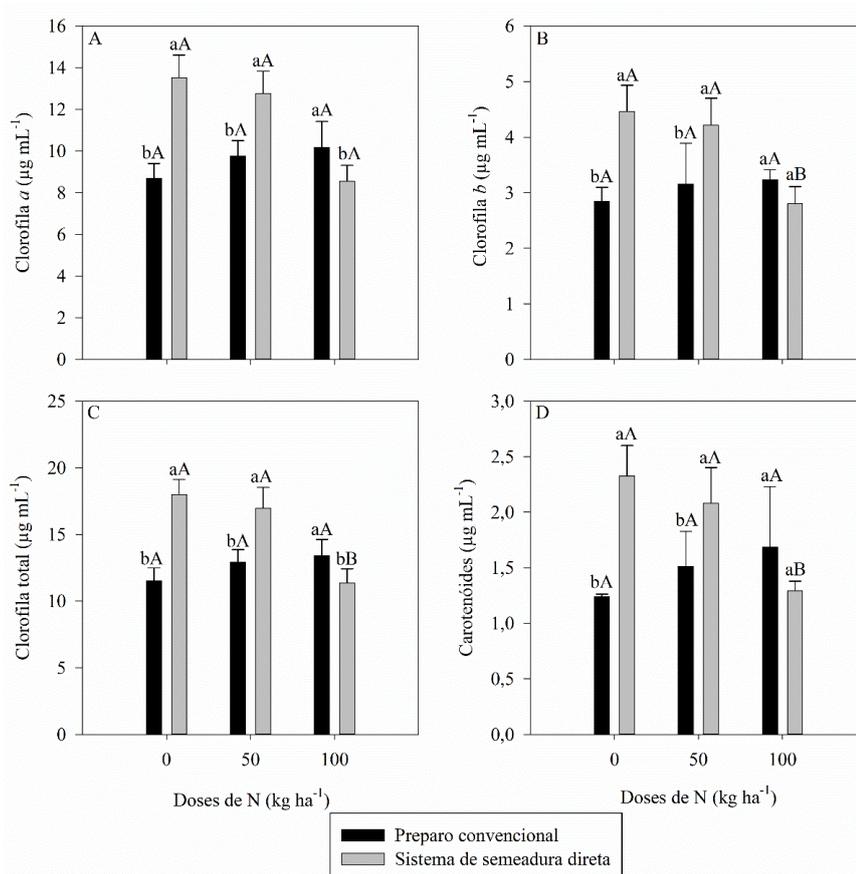


Apesar dos sistemas de manejo do solo não terem influenciado no índice SPAD, os teores de clorofila *a*, *b*, total e de carotenóides apresentaram interação significativa entre os fatores avaliados, nas duas safras (Figura 6 e 7), exceto para carotenóides que na safra 2021/22 diferiu apenas em função da adubação nitrogenada (Figura 8).

Os maiores teores de clorofila *a*, *b* e total, considerando as duas safras, foram verificados em SSD com 0 e 50 kg ha<sup>-1</sup> de N, diferindo do SPC nas mesmas doses. A dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N em SSD, aumentou os teores de clorofila *a*, *b* e total em média

24% na safra 2019/20 e 49% em 2021/22, comparado ao SPC com 50 kg ha<sup>-1</sup> (Figura 6A, 6B, 6C e 7).

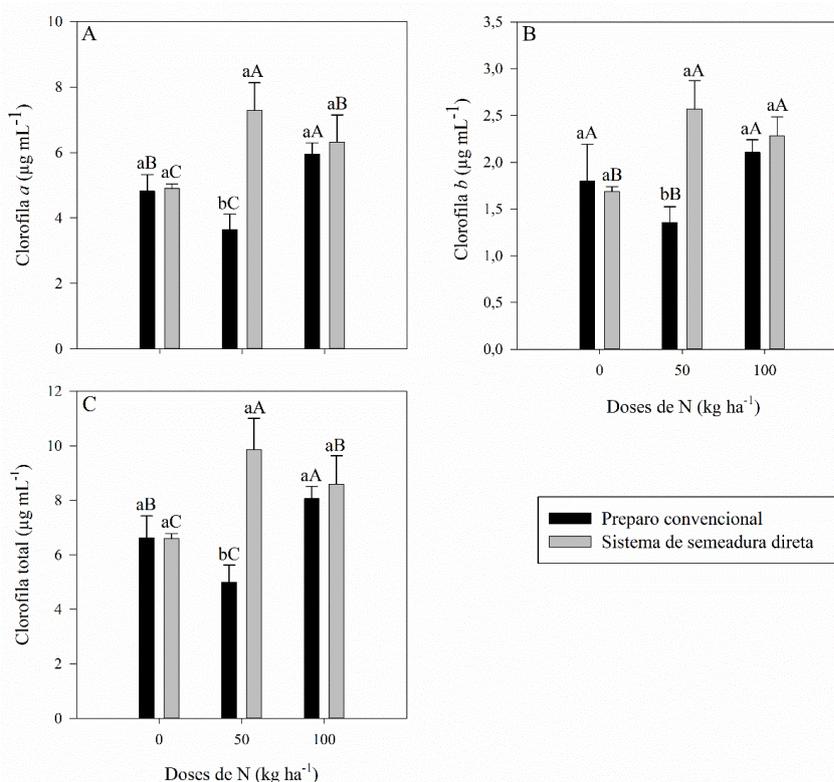
**Figura 6 - Teores de clorofila *a* (A), clorofila *b* (B), clorofila total (C) e carotenóides (D) em plantas de soja em sistema de preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD), cultivada em sistema de produção com sorgo sem adubação nitrogenada (dose 0) e com 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, na safra de 2019/20. Médias com letras iguais minúsculas não diferem entre si na comparação entre os sistemas de manejo do solo dentro de cada dose de N, e médias com letras iguais maiúsculas não diferem entre si na comparação entre as doses de N dentro de cada sistema de manejo, pelo test t de Student ( $p < 0,05$ )**



Em SPC, na safra 2019/20, os teores de clorofila *a* e clorofila total foram superiores aos teores obtidos em SSD, na dose de 100 kg ha<sup>-1</sup>, porém, sem diferença no teor de clorofila *b* nessa dose de N. Em SPC as doses de N não se diferiram quanto aos teores de clorofila *a*, *b* e total (Figura 6A, 6B e 6C).

Nas duas safras, os maiores teores de clorofila *a*, *b* e total em SPC foram obtidos com a dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, porém, só se diferiram do SSD na mesma dose quanto à clorofila *a* e total na safra 2019/20 (Figura 6A, 6B, 6C e 7). Na safra 2021/22 os teores de clorofilas em SPC na dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> de N não diferiram do SSD na mesma dose, no entanto, os maiores teores de clorofilas (*a*, *b* e total) em SPC foram verificados na dose máxima de N (Figura 7).

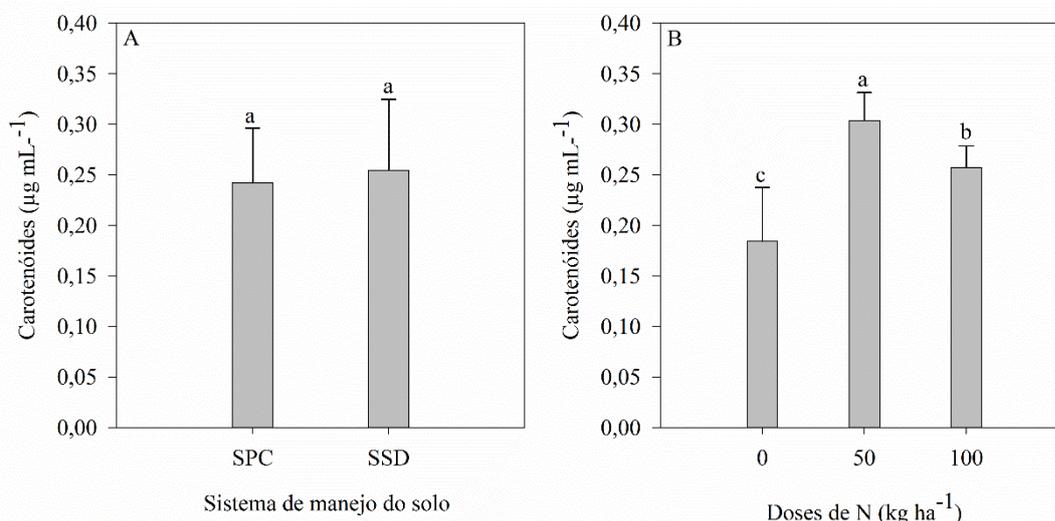
**Figura 7 - Teores de clorofila *a* (A), clorofila *b* (B) e clorofila total (C) em plantas de soja em sistema de preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD), cultivada em sistema de produção com sorgo sem adubação nitrogenada (dose 0) e com 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, na safra de 2021/22. Médias com letras iguais minúsculas não diferem entre si na comparação entre os sistemas de manejo do solo dentro de cada dose de N, e médias com letras iguais maiúsculas não diferem entre si na comparação entre as doses de N dentro de cada sistema de manejo, pelo test t de Student (p<0,05)**



Quanto ao teor de carotenóides, na safra 2019/20, o comportamento foi semelhante aos da clorofilas, já que em SSD os maiores valores foram verificados na ausência de adubação nitrogenada e com 50 kg ha<sup>-1</sup>, diferindo do SPC. E na dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> o SPC apresentou teor superior ao SSD. Cabe ressaltar que em SPC as

doses não influenciaram no teor de carotenóides (Figura 6D). No entanto, na safra 2021/22, os teores de carotenóides se diferiram apenas em função dos níveis de N, em que a dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> foi superior em 40% e 10% em relação à ausência de adubação nitrogenada e 100 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 8).

**Figura 8 - Teor de carotenóides em plantas de soja em sistema de preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD), cultivada em sistema de produção com sorgo sem adubação nitrogenada (dose 0) e com 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, na safra de 2021/22. Médias com letras iguais não diferem entre os sistemas de manejo do solo (A) e doses de N (B), pelo test t de Student ( $p < 0,05$ )**



Desta forma, nota-se que a adubação nitrogenada em sistema de produção aumentou os teores dos pigmentos fotossintéticos nas plantas de soja em ambos sistemas de manejo do solo, sendo que em SSD a dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> apresentou os maiores valores, enquanto que em SPC foi verificado na dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> (Figura 6 e 7).

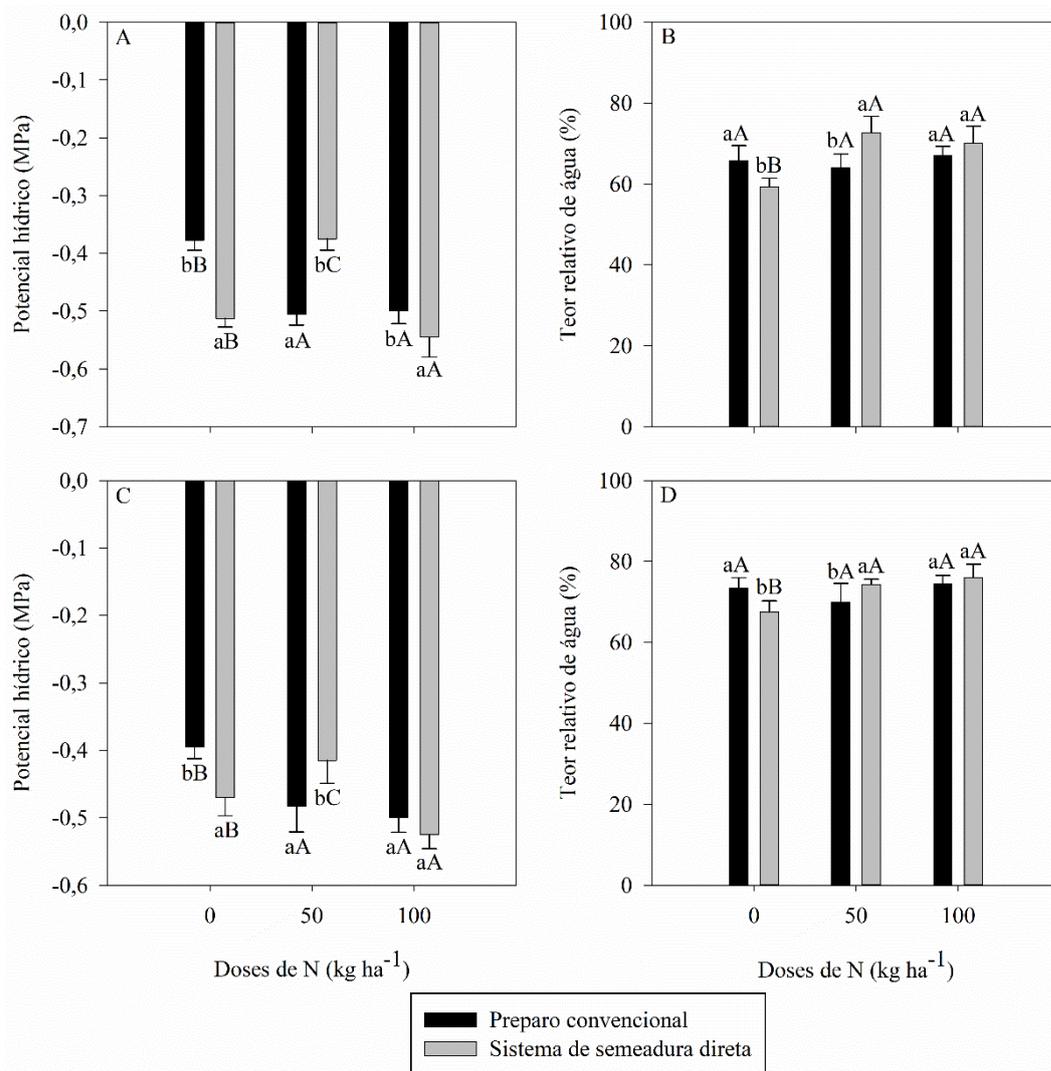
Em relação ao potencial hídrico foliar ( $\Psi_f$ ) e teor relativo de água na folha (TRA), houve interação significativa entre os fatores testados, nas duas safras. Os níveis de N interferiram de forma diferente entre os sistemas de manejo do solo, no entanto, observou-se que em SSD, a dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N apresentou plantas em melhor estado hídrico (maior  $\Psi_f$  e maior TRA), em relação à ausência de aplicação de N e 100 kg ha<sup>-1</sup>, diferindo também de SPC com 50 kg ha<sup>-1</sup> (Figura 9). As plantas cultivadas em SSD com 50 kg ha<sup>-1</sup>, na safra 2019/20, apresentaram  $\Psi_f$  27% e 31% superior às

plantas cultivadas neste mesmo sistema de manejo do solo na ausência de adubação nitrogenada e em  $100 \text{ kg ha}^{-1}$ , respectivamente, enquanto na safra 2021/22 esta diferença foi de 12% e 21%, respectivamente (Figura 9A e 9C).

Já o TRA em SSD com  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  de N foi 23% (safra 2019/20) e 10% (safra 2021/22) superior ao SSD sem adubação nitrogenada, porém sem diferir da dose  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  (Figura 9B e 9D).

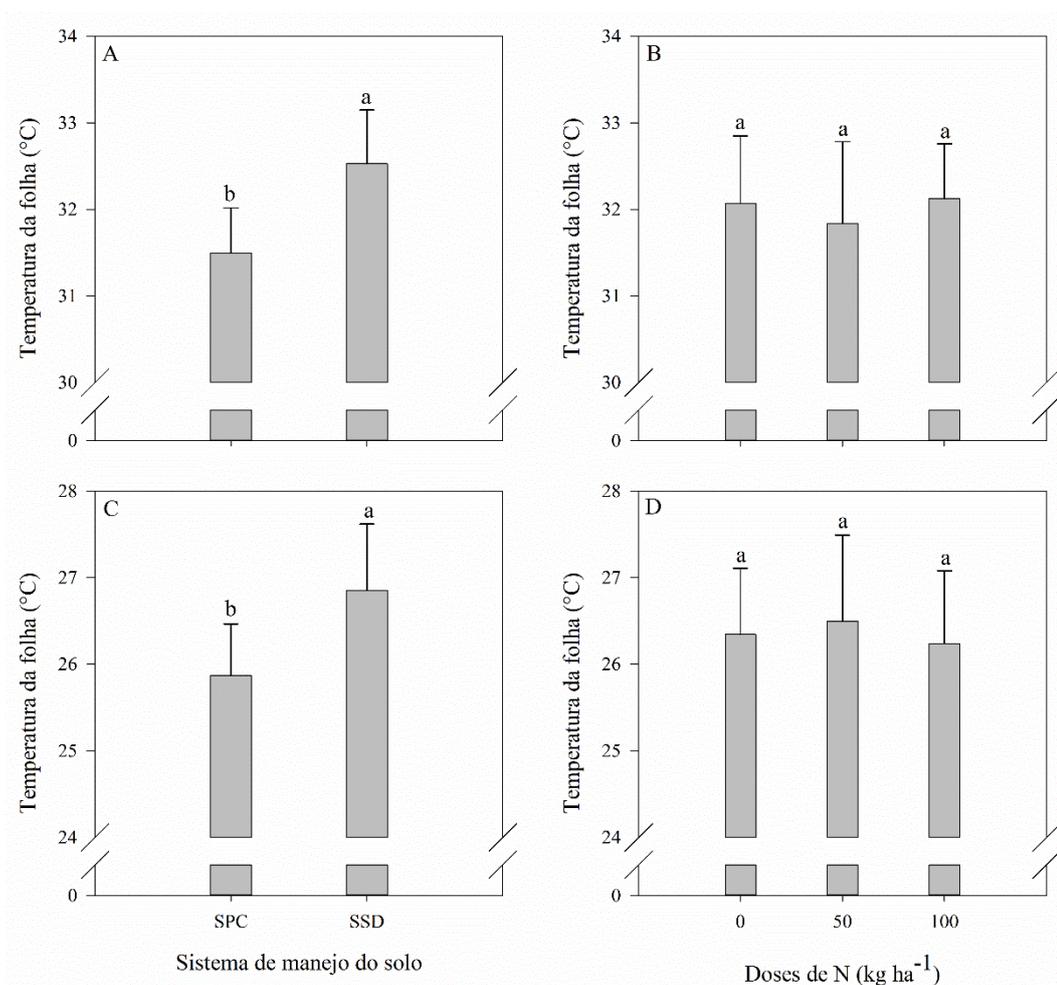
Em SPC, o melhor estado hídrico das plantas foi verificado na ausência de adubação nitrogenada, apresentando  $\Psi_f$  25% maior na média das duas safras, em relação à dose de  $50$  e  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  (Figura 9A e 9C). O TRA em SPC não diferiu entre os níveis de N, apresentando valor médio de 66% e 73% nas safras 2019/20 e 2021/22, respectivamente (Figura 9B e 9C).

**Figura 9 - Potencial hídrico (A e C) e teor relativo de água na folha (B e D) de plantas de soja em sistema de preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD), cultivada em sistema de produção com sorgo sem adubação nitrogenada (dose 0) e com 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, nas safras de 2019/20 (A e B) e 2021/22 (C e D). Médias com letras iguais minúsculas não diferem entre si na comparação entre os sistemas de manejo do solo dentro de cada dose de N, e médias com letras iguais maiúsculas não diferem entre si na comparação entre as doses de N dentro de cada sistema de manejo, pelo test t de Student (p<0,05)**



Nas duas safras conduzidas, a temperatura da folha não se diferiu em função dos níveis de N. No entanto, entre os sistemas de manejo houve diferença, sendo que o SSD apresentou temperatura superior em 1 °C nas duas safras (Figura 10).

**Figura 10 - Temperatura da folha de plantas de soja em sistema de preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD cultivada em sistema de produção com sorgo sem adubação nitrogenada (dose 0) e com 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, nas safras de 2019/20 (A e B) e 2021/22 (C e D). Médias com letras iguais minúsculas não diferem entre si na comparação entre os sistemas de manejo do solo dentro de cada dose de N, e médias com letras iguais maiúsculas não diferem entre si na comparação entre as doses de N dentro de cada sistema de manejo, pelo test t de Student (p<0,05)**



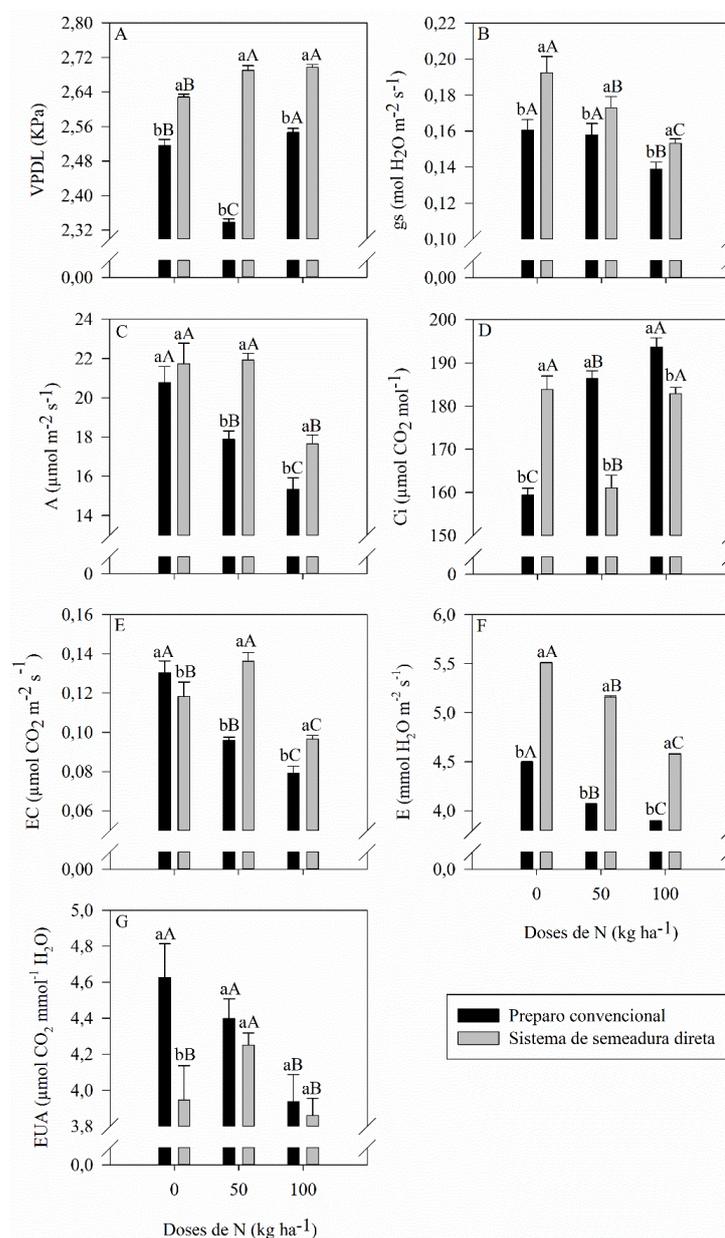
De modo geral, a dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N favoreceu as trocas gasosas nas plantas de soja em ambos os sistemas de manejo do solo, nas duas safras (Figuras 11 e 12). O SSD com 50 kg ha<sup>-1</sup> de N, apesar de ter apresentado maior déficit de pressão de vapor (VPDL), teve também maior condutância estomática (*gs*), maior taxa de assimilação líquida de CO<sub>2</sub> (*A*), menor concentração interna de CO<sub>2</sub> na folha (*C<sub>i</sub>*), maior eficiência de carboxilação (*EC*), menor taxa de transpiração (*E*) e maior

eficiência no uso da água (EUA) (Figura 11 e 12). No entanto, na safra 2021/22 este tratamento apresentou menor  $gs$ , em relação a ausência de adubação nitrogenada e  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  (Figura 12B).

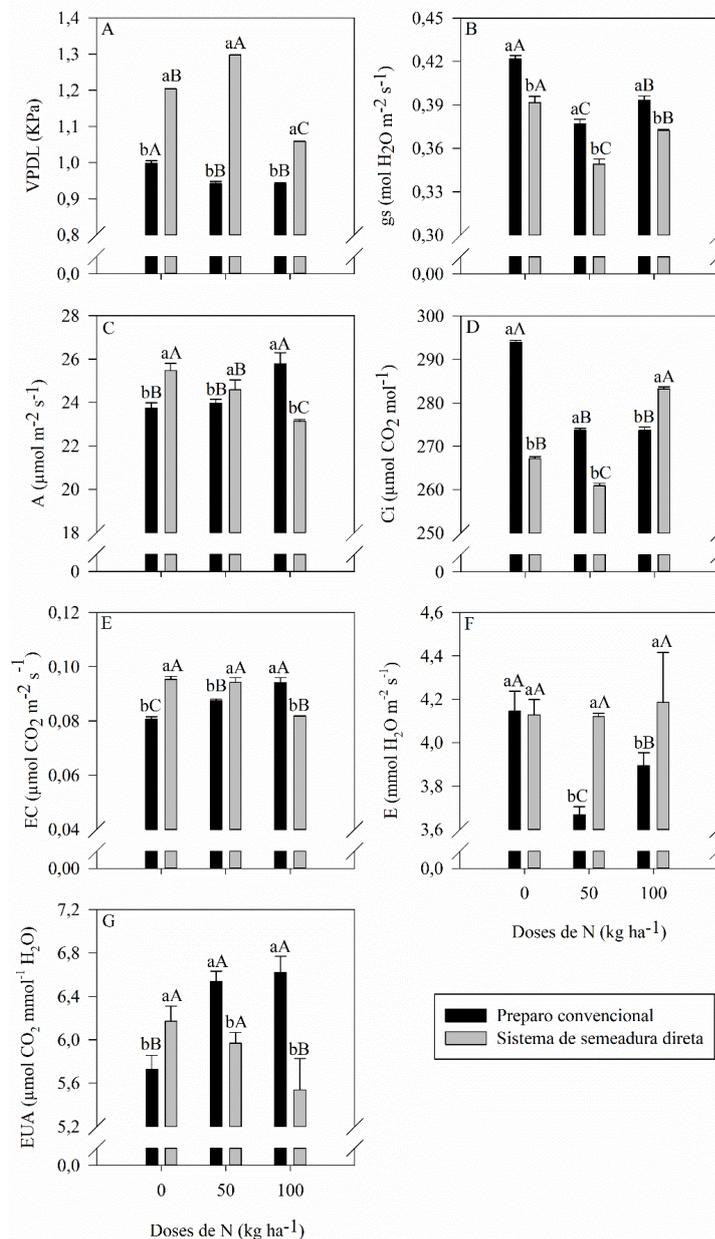
O SPC na dose de  $50 \text{ kg ha}^{-1}$ , na safra 2019/20, apresentou menor VPDL, maior  $gs$ , maior  $A$ , menor  $Ci$ , maior  $EC$ , menor  $E$  e maior EUA (Figura 11 e 12). Na safra 2021/22, este tratamento apresentou resultados semelhantes, no entanto, houve menor  $gs$  e  $A$  (Figura 12). Cabe ressaltar que neste sistema de manejo a ausência de adubação nitrogenada resultou em comportamento semelhante ao reportado com a dose de  $50 \text{ kg ha}^{-1}$ , em ambas as safras (Figura 11 e 12).

Vale destacar que, ao comparar o SSD com o SPC na dose de  $50 \text{ kg ha}^{-1}$ , na safra 2019/20, o SSD apresentou maior VPDL,  $gs$ ,  $A$ ,  $EC$ ,  $E$ , menor  $Ci$  e sem diferença para EUA (Figura 11), enquanto que, na safra 2021/22, o resultado foi semelhante, porém apresentou menor  $gs$  e EUA (Figura 12).

**Figura 11 - Déficit de pressão de vapor (VPDL - A), condutância estomática ( $g_s$  - B), taxa de assimilação líquida de  $CO_2$  (A - C), concentração interna de  $CO_2$  na folha ( $C_i$  - D), eficiência de carboxilação (EC - E), taxa de transpiração (E - F) e eficiência do uso da água (EUA - G) de plantas de soja em sistema de preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD), cultivada em sistema de produção com sorgo sem adubação nitrogenada (dose 0) e com 50 e 100  $kg\ ha^{-1}$  de N, na safra de 2019/20. Médias com letras iguais minúsculas não diferem entre si na comparação entre os sistemas de manejo do solo dentro de cada dose de N, e médias com letras iguais maiúsculas não diferem entre si na comparação entre as doses de N dentro de cada sistema de manejo, pelo test t de Student ( $p < 0,05$ )**



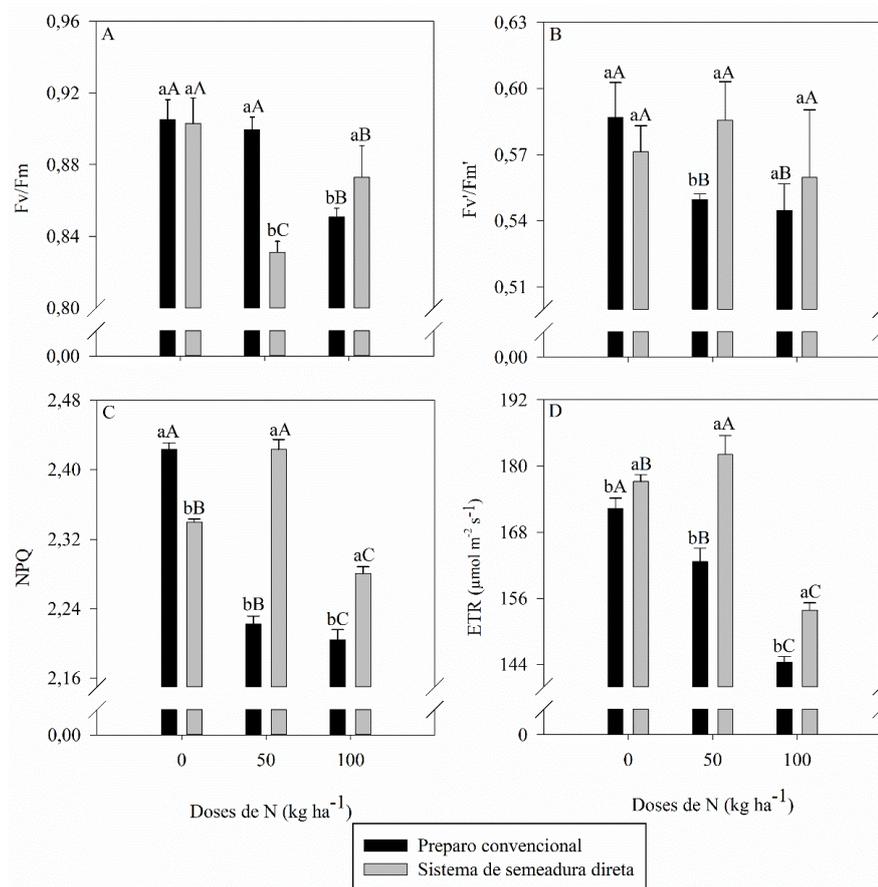
**Figura 12 - Déficit de pressão de vapor (VPDL - A), condutância estomática ( $g_s$  - B), taxa de assimilação líquida de  $CO_2$  (A - C), concentração interna de  $CO_2$  na folha ( $C_i$  - D), eficiência de carboxilação (EC - E), taxa de transpiração (E - F) e eficiência do uso da água (EUA - G) de plantas de soja em sistema de preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD), cultivada em sistema de produção com sorgo sem adubação nitrogenada (dose 0) e com 50 e 100  $kg\ ha^{-1}$  de N, na safra de 2021/22. Médias com letras iguais minúsculas não diferem entre si na comparação entre os sistemas de manejo do solo dentro de cada dose de N, e médias com letras iguais maiúsculas não diferem entre si na comparação entre as doses de N dentro de cada sistema de manejo, pelo test t de Student ( $p < 0,05$ )**



Apesar de em SSD com 50 kg ha<sup>-1</sup> de N as plantas de soja se destacarem quanto as variáveis de trocas gasosas (Figura 11 e 12), em relação aos parâmetros de fluorescência da clorofila *a*, na safra 2019/20, este tratamento apresentou menor eficiência fotoquímica máxima do fotossistemas II (Fv/Fm) em relação aos demais níveis de N e comparado ao SPC na dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> (Figura 13A). No entanto, o rendimento quântico potencial do fotossistemas II (Fv'/Fm') foi superior ao SPC nesta mesma dose e sem diferença estatística entre os outros níveis de N em SSD (Figura 12A e 12B).

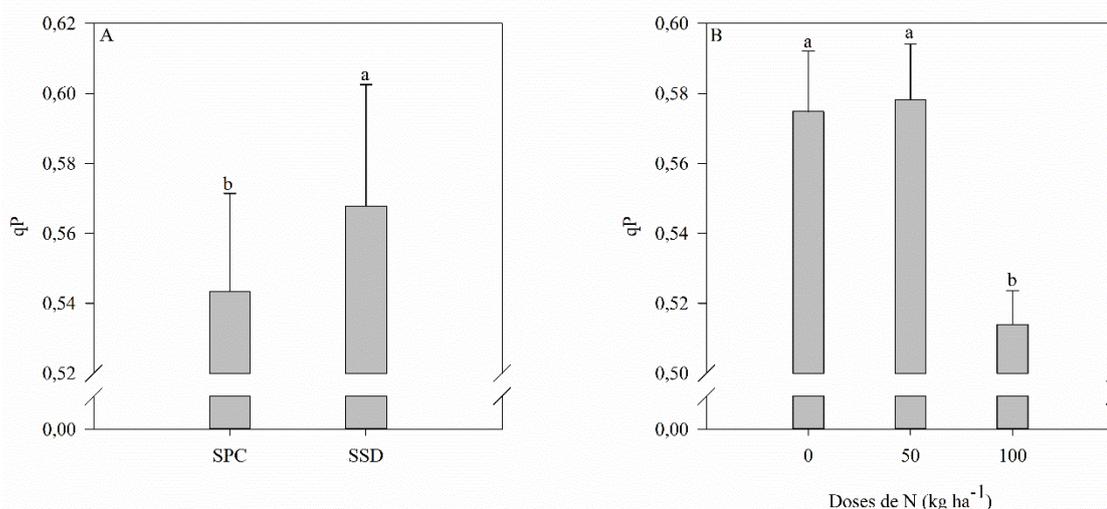
Este mesmo tratamento (SSD com 50 kg ha<sup>-1</sup>) também apresentou maior coeficiente de extinção não fotoquímico (NPQ), porém, teve aumento de 10% na taxa de transporte de elétrons (ETR), diferindo, quanto a estas variáveis, dos demais níveis de N em SSD e do SPC na mesma dose (Figura 12C e 12D).

**Figura 13 - Eficiência fotoquímica máxima do fotossistemas II (Fv/Fm - A), rendimento quântico potencial do fotossistemas II (Fv'/Fm' - B), coeficiente de extinção não fotoquímico (NPQ - C) e taxa aparente de transporte de elétrons (ETR - D) de plantas de soja em sistema de preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD), cultivada em sistema de produção com sorgo sem adubação nitrogenada (dose 0) e com 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, na safra de 2019/20. Médias com letras iguais minúsculas não diferem entre si na comparação entre os sistemas de manejo do solo dentro de cada dose de N, e médias com letras iguais maiúsculas não diferem entre si na comparação entre as doses de N dentro de cada sistema de manejo, pelo test t de Student ( $p < 0,05$ )**



O qP na safra 2019/20 não apresentou interação significativa, contudo, se diferiu em função do sistema de manejo e dos níveis de N, sendo as maiores médias obtidas em SSD, na ausência de adubação nitrogenada e com 50 kg ha<sup>-1</sup> de N (Figura 14).

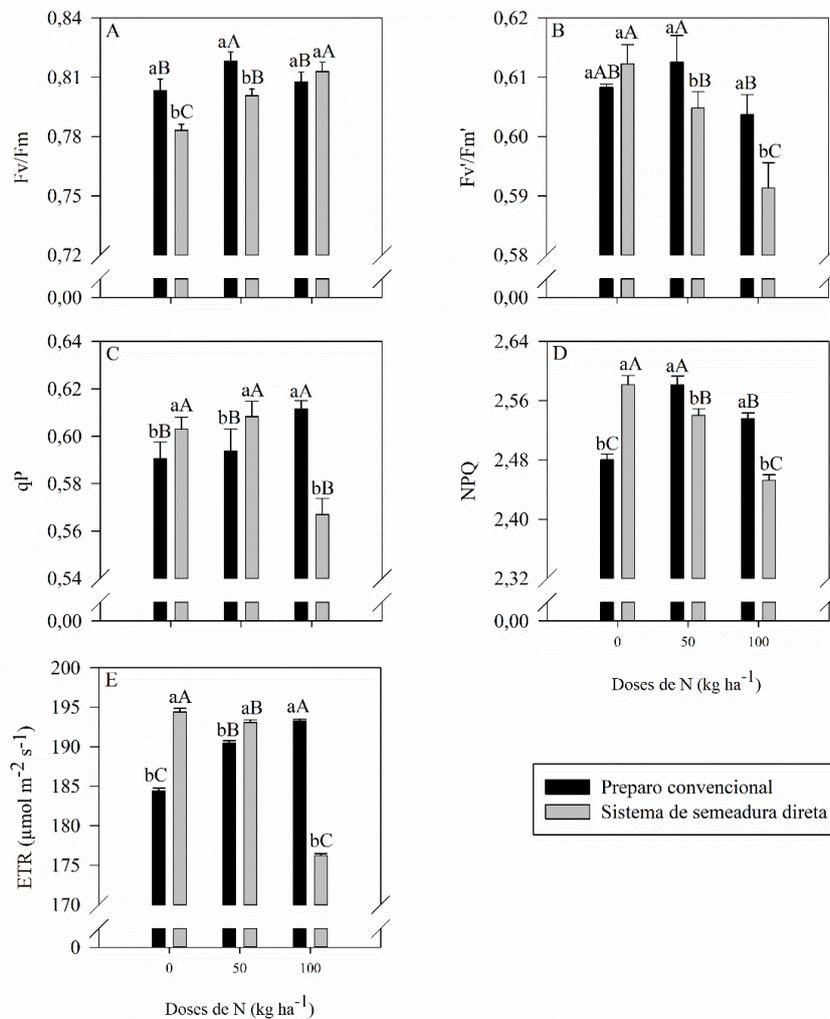
**Figura 14 - Coeficiente de extinção fotoquímico (qP) de plantas de soja em sistema de preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD), cultivada em sistema de produção com sorgo sem adubação nitrogenada (dose 0) e com 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, na safra de 2019/20. Médias com letras iguais não diferem entre os sistemas de manejo do solo (A) e doses de N (B), pelo test t de Student (p<0,05)**



Na safra 2021/22, o SSD com 50 kg ha<sup>-1</sup> de N também apresentou menor Fv/Fm, comparado ao SPC na mesma dose e SSD com 100 kg ha<sup>-1</sup>, contudo, o Fv'/Fm' foi superior a dose de 100 kg ha<sup>-1</sup>, apresentou também maior coeficiente de extinção fotoquímico (qP) e ETR, apesar de ter mostrado valor de NPQ superior a dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> neste sistema de manejo do solo, porém inferior a ausência de adubação nitrogenada (Figura 15).

Em relação ao SPC, considerando as duas safras, a dose de 50 kg ha<sup>-1</sup>, proporcionou melhor resposta dos parâmetros de fluorescência da clorofila a (Figura 13 e 14). Pois, apesar de na safra 2019/20 as plantas ter apresentado maior Fv/Fm, mas com menor Fv'/Fm' (em relação a ausência de aplicação de N), houve menor NPQ e maior ETR (comparado a dose de 100 kg ha<sup>-1</sup>). Já na safra 2021/22, o SPC com 50 kg ha<sup>-1</sup> apresentou médias superiores de Fv/Fm, Fv'/Fm', qP (comparado ao SPC com 100 kg ha<sup>-1</sup> de N), NPQ e ETR (comparado ao SPC sem adubação nitrogenada) (Figura 15).

**Figura 15 - Eficiência fotoquímica máxima do fotossistemas II ( $F_v/F_m$  - A), rendimento quântico potencial do fotossistemas II ( $F_v'/F_m'$  - B), coeficiente de extinção fotoquímico ( $q_p$  - C), coeficiente de extinção não fotoquímico (NPQ - D) e taxa aparente de transporte de elétrons (ETR - E) de plantas de soja em sistema de preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD), cultivada em sistema de produção com sorgo sem adubação nitrogenada (dose 0) e com 50 e 100  $\text{kg ha}^{-1}$  de N, na safra de 2021/22. Médias com letras iguais minúsculas não diferem entre si na comparação entre os sistemas de manejo do solo dentro de cada dose de N, e médias com letras iguais maiúsculas não diferem entre si na comparação entre as doses de N dentro de cada sistema de manejo, pelo test t de Student ( $p < 0,05$ )**

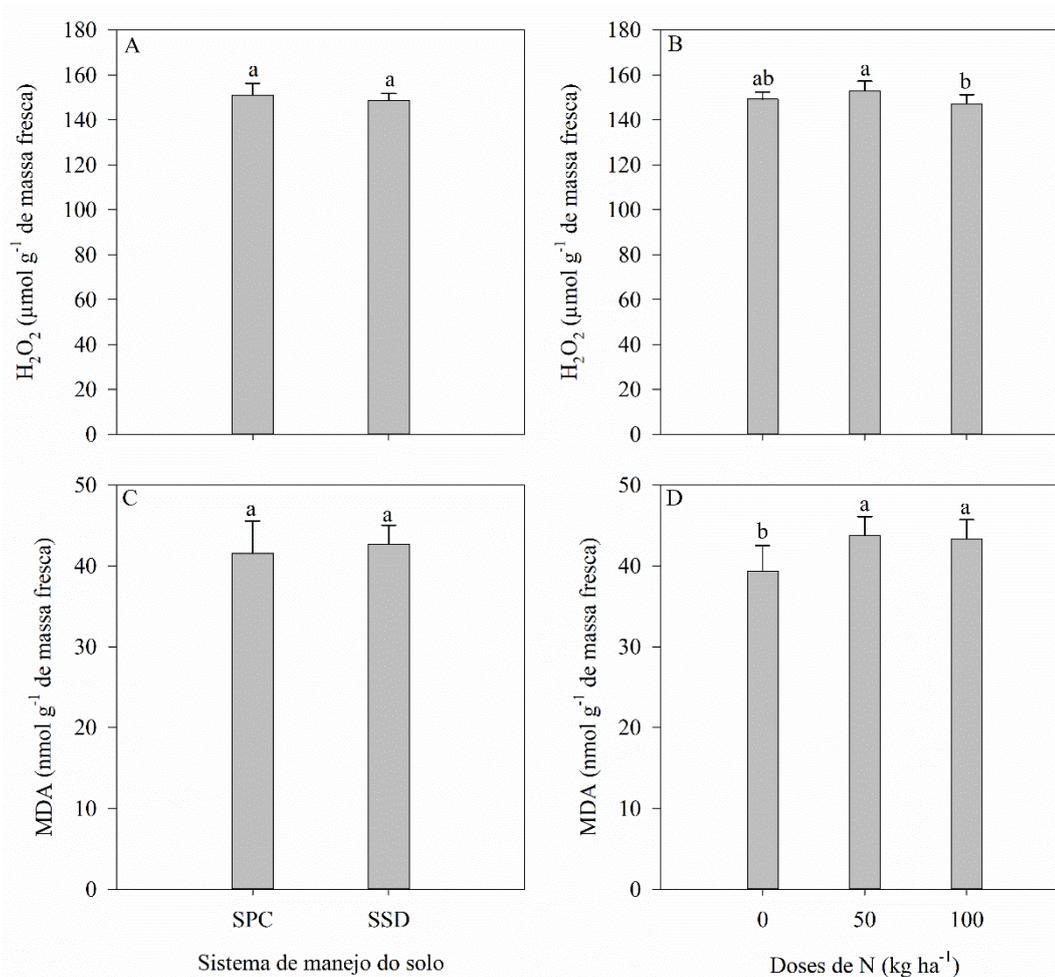


#### 4.8 Metabolismo oxidativo e atividade enzimática antioxidante das plantas de soja

A resposta do metabolismo oxidativo das plantas de soja, na safra 2019/20, não foi afetada pelos sistemas de manejo do solo, no entanto, os níveis de adubação nitrogenada influenciaram nos teores de peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ) e de malondialdeído (MDA) (Figura 16).

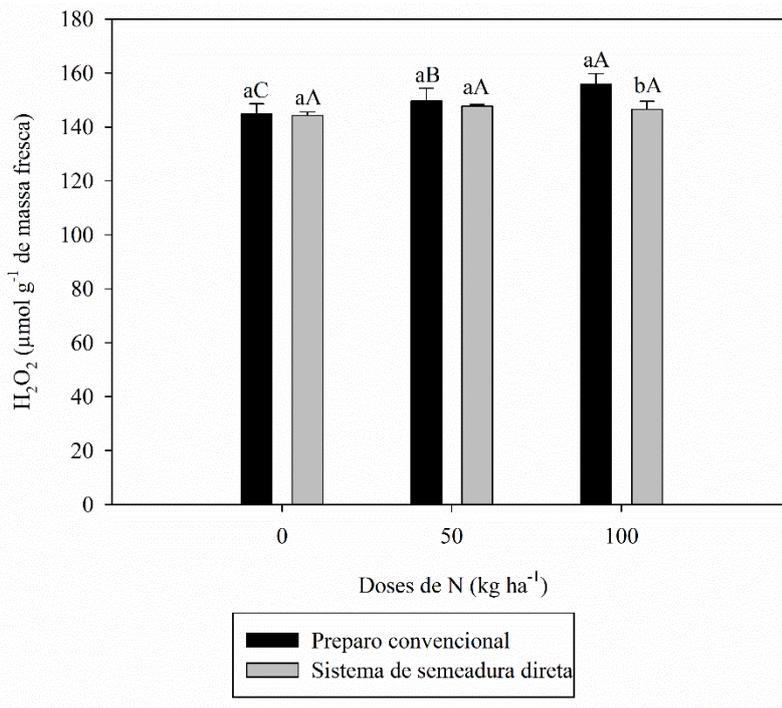
Na safra 2019/20, o teor de  $H_2O_2$  foi maior na dose de  $50\text{ kg ha}^{-1}$  de N, porém sem se diferir da ausência de adubação nitrogenada (Figura 16B). Já o teor de MDA foi maior quando houve aplicação de N (Figura 16C).

**Figura 16 - Teores de peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$  - A e B) e malondialdeído (MDA – C e D) em plantas de soja em sistema de preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD), cultivada em sistema de produção com sorgo sem adubação nitrogenada (dose 0) e com 50 e  $100\text{ kg ha}^{-1}$  de N, na safra de 2019/20. Médias com letras iguais não diferem entre os sistemas de manejo do solo (A e C) e doses de N (B e D), pelo test t de Student ( $p < 0,05$ )**



Na safra 2021/22, houve interação entre os fatores avaliados para  $H_2O_2$ . Dentro de cada nível de N, os sistemas de manejo não se diferiram. Em SSD, as doses não influenciaram no teor de  $H_2O_2$ , no entanto, em SPC a dose de  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  de N apresentou maior teor (Figura 17).

**Figura 17. Teor de peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ) em plantas de soja em sistema de preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD), cultivada em sistema de produção com sorgo sem adubação nitrogenada (dose 0) e com 50 e  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  de N, na safra de 2021/22. Médias com letras iguais minúsculas não diferem entre si na comparação entre os sistemas de manejo do solo dentro de cada dose de N, e médias com letras iguais maiúsculas não diferem entre si na comparação entre as doses de N dentro de cada sistema de manejo, pelo test t de Student ( $p < 0,05$ )**

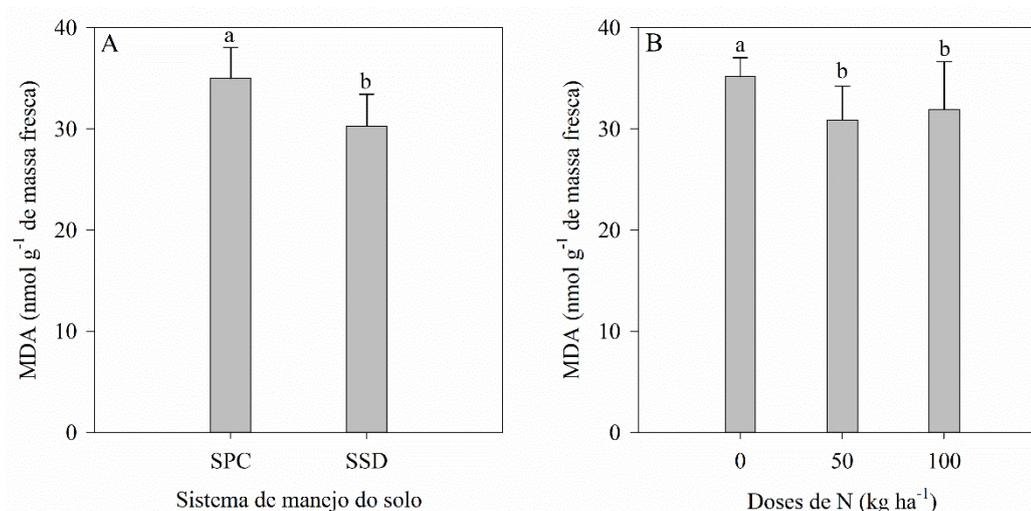


Em relação ao teor de MDA na safra 2021/22, houve maiores valores no SPC e na ausência de adubação nitrogenada (Figura 18).

De modo geral, considerando os resultados das duas safras observou-se que a adubação nitrogenada aumentou o teor de  $H_2O_2$ , já que na safra 2019/20 houve maior teor na dose de  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  e na safra 2021/22 o SPC com  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  apresentou maiores valores (Figura 16B e 17). Porém, quanto ao MDA, o comportamento foi

diferente entre as safras, pois, em 2019/20 a ausência de adubação nitrogenada reduziu os teores de MDA, e em 2021/22 aumentou (Figura 16D e 18).

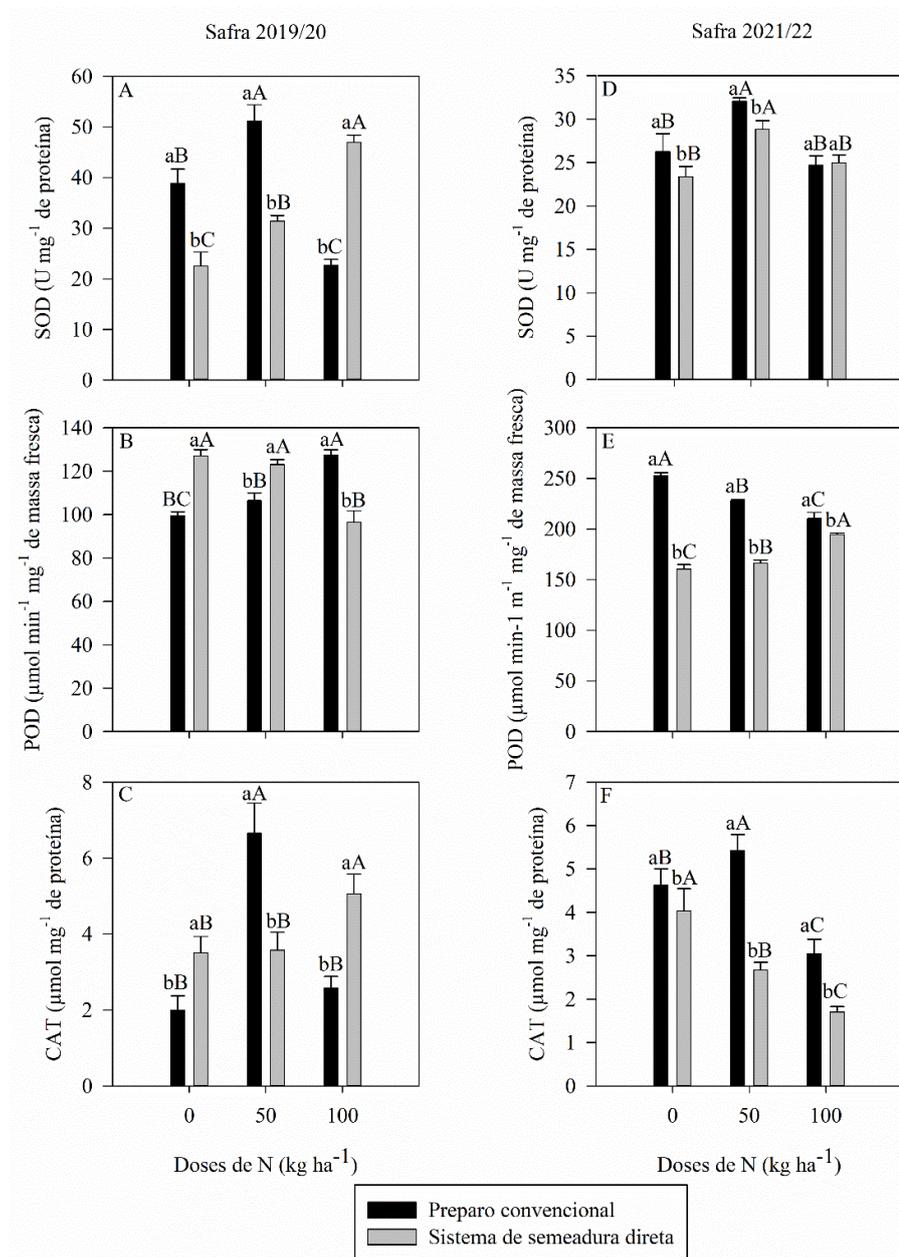
**Figura 18 - Teor malondialdeído (MDA) em plantas de soja em sistema de preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD), cultivada em sistema de produção com sorgo sem adubação nitrogenada (dose 0) e com 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, na safra de 2021/22. Médias com letras iguais não diferem entre os sistemas de manejo do solo (A) e doses de N (B), pelo test t de Student ( $p < 0,05$ )**



O comportamento do metabolismo enzimático das plantas de soja apresentaram algumas diferenças entre as duas safras, no entanto, notou-se que, quase sempre, a dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> em SPC e em SSD apresentou maior atividade da superóxido dismutase (SOD), peroxidase (POD) e catalase (CAT) (Figura 19).

Observou-se também que, de modo geral, o SPC nas duas safras teve maior atividade da SOD, POD e CAT, principalmente na dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> e na ausência de adubação nitrogenada (Figura 19). Cabe ressaltar que na safra 2021/22, este sistema de manejo do solo apresentou maior atividade destas enzimas em todas as doses (Figura 19D, 19E e 19F).

**Figura 19 - Atividade das enzimas superóxido dismutase (SOD – A e D), peroxidase (POD – B e E) e catalase (CAT – C e F) em plantas de soja em sistema de preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD), cultivada em sistema de produção com sorgo sem adubação nitrogenada (dose 0) e com 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, nas safras de 2019/20 (A, B e C) e 2021/22 (D, E e F). Médias com letras iguais minúsculas não diferem entre si na comparação entre os sistemas de manejo do solo dentro de cada dose de N, e médias com letras iguais maiúsculas não diferem entre si na comparação entre as doses de N dentro de cada sistema de manejo, pelo test t de Student ( $p < 0,05$ )**

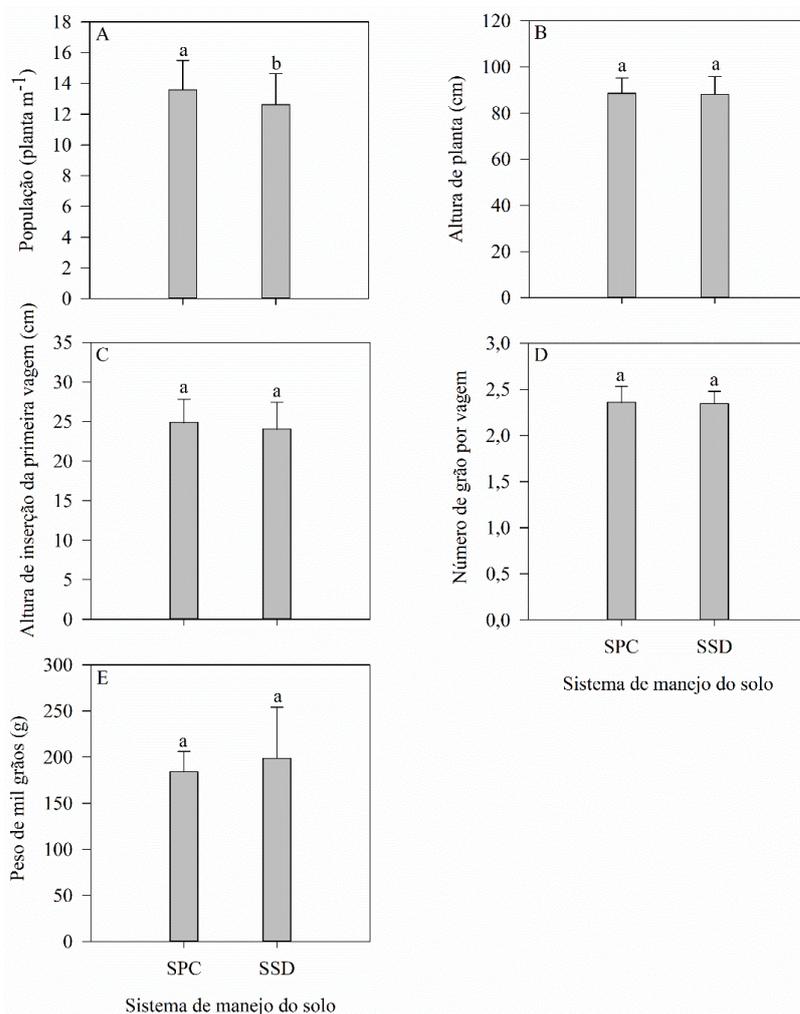


#### 4.9 Componentes de produção e produtividade de grãos das plantas de soja

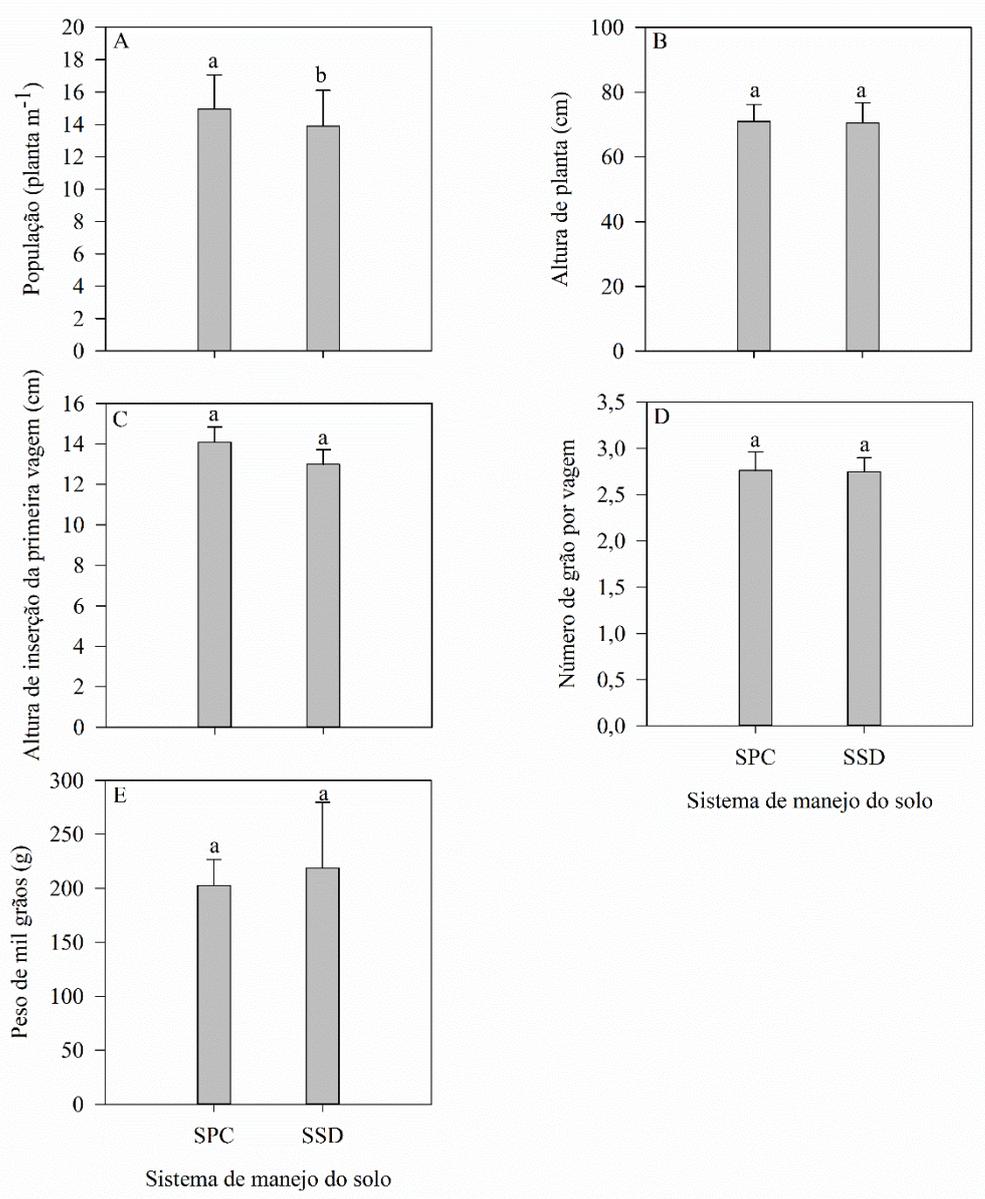
Dentre os componentes de produção avaliados (população, altura de planta, altura de inserção da primeira vagem, número de vagens por planta, número de grãos por vagem e peso de mil grãos), nas duas safras, houve diferença apenas para população de plantas e número de vagens por planta (Figuras 20, 21, 22, 23 e 24).

O SPC, nas duas safras, resultou em população final de plantas de soja superior em 7%, comparado ao SSD (Figura 20A e 21A), no entanto, os níveis de N aplicados na cultura antecessora não influenciaram nesta variável (Figura 22A e 23A).

**Figura 20 - População de planta (A), altura de planta (B), altura de inserção da primeira vagem (C), número de grãos por vagem (D) e peso de mil grãos (E) de plantas de soja cultivadas em sistema de preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD), na safra de 2019/20. Médias com letras iguais não diferem entre os sistemas de manejo do solo, pelo test t de Student ( $p < 0,05$ )**

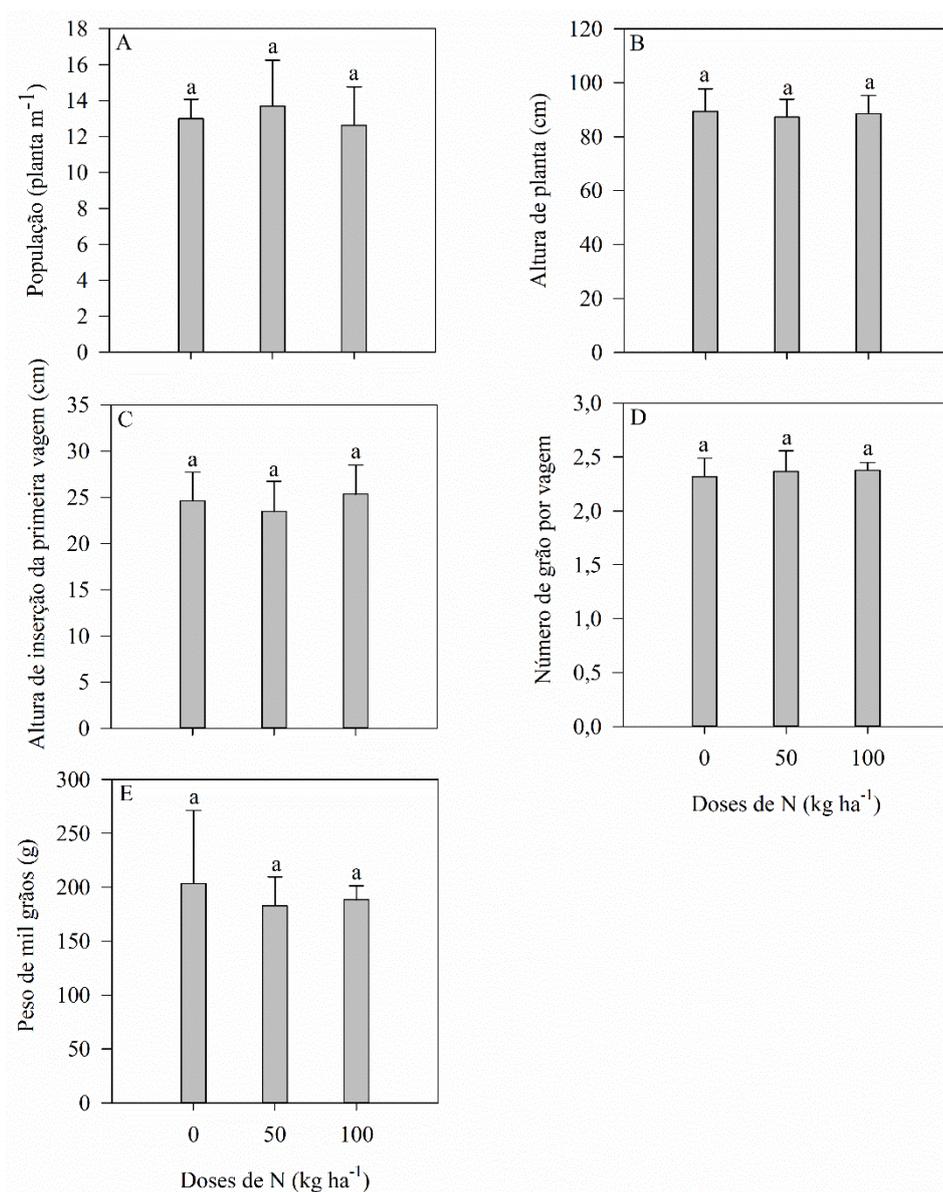


**Figura 21 - População de planta (A), altura de planta (B), altura de inserção da primeira vagem (C), número de grãos por vagem (D) e peso de mil grãos (E) de plantas de soja cultivadas em sistema de preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD), na safra de 2021/22. Médias com letras iguais não diferem entre os sistemas de manejo do solo, pelo test t de Student ( $p < 0,05$ )**

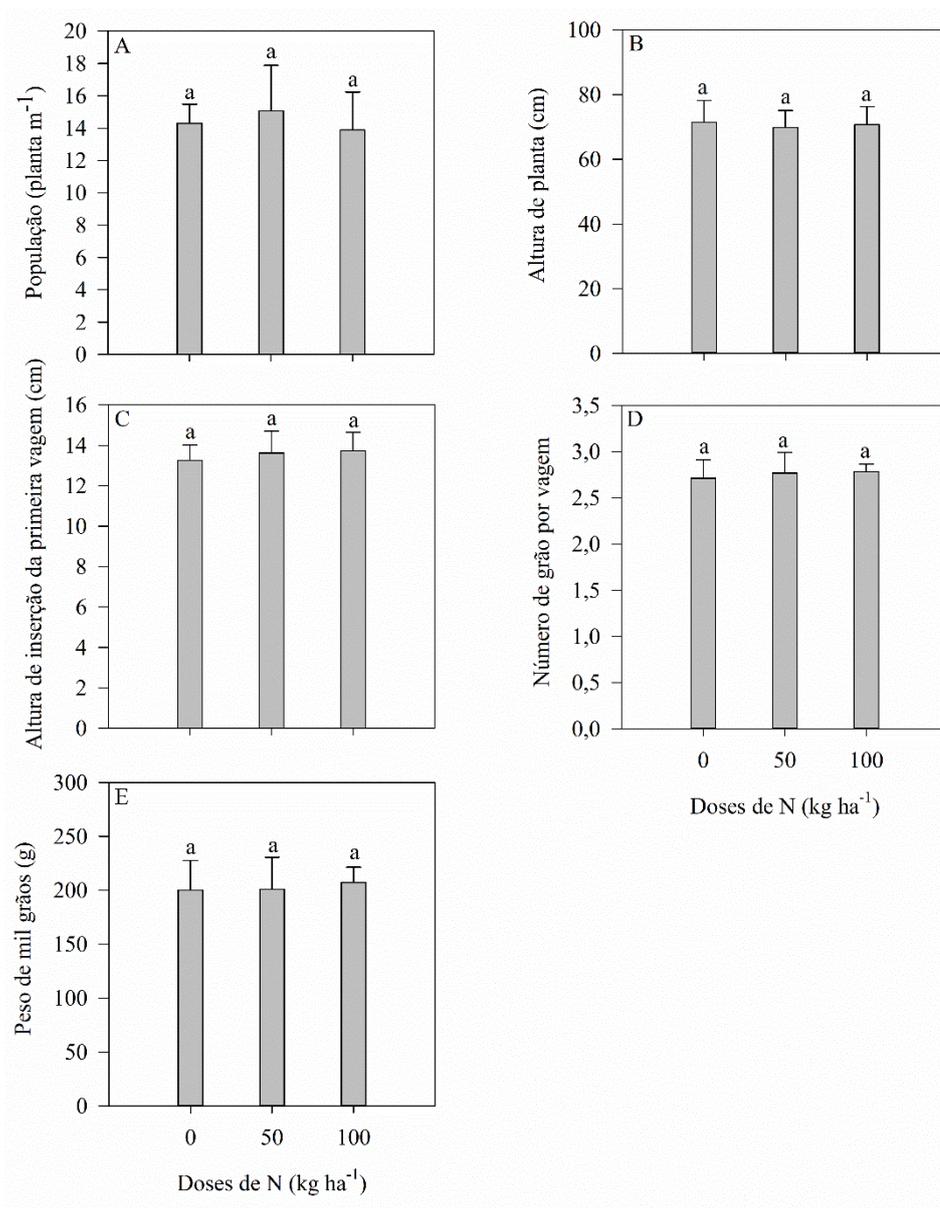


Além de não afetar a população de plantas de soja, a adubação nitrogenada em sistema de produção com sorgo e soja também não influenciou na altura de planta, altura de inserção da primeira vagem, número de grãos por vagem e peso de mil grãos (Figura 22 e 23).

**Figura 22 - População de planta (A), altura de planta (B), altura de inserção da primeira vagem (C), número de grãos por vagem (D) e peso de mil grãos (E) de plantas de soja cultivadas em sistema de produção com sorgo sem adubação nitrogenada (dose 0) e com 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, na safra de 2019/20. Médias com letras iguais não diferem entre os sistemas de manejo do solo, pelo test t de Student (p<0,05)**



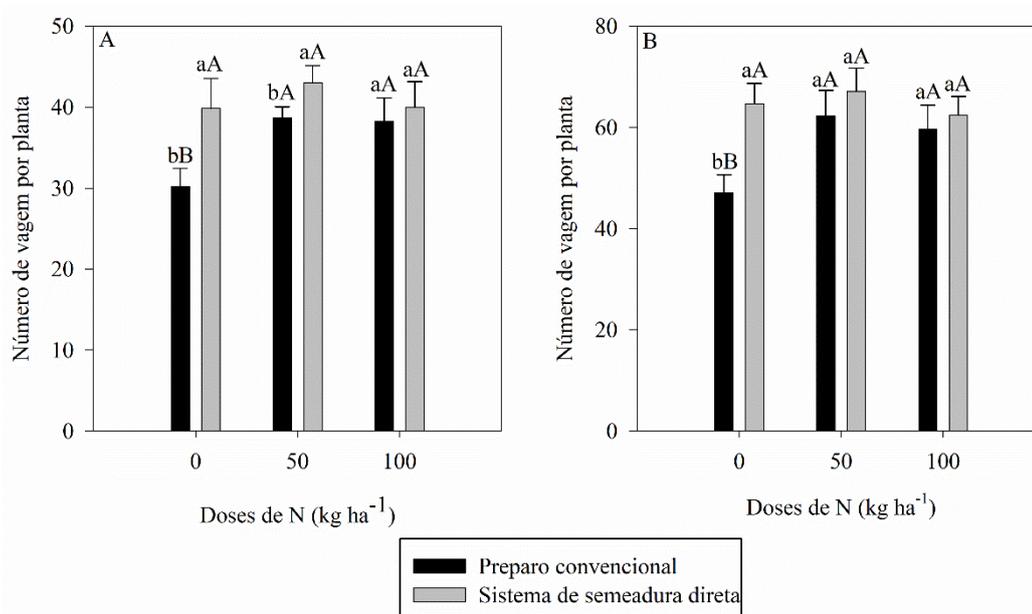
**Figura 23 - População de planta (A), altura de planta (B), altura de inserção da primeira vagem (C), número de grãos por vagem (D) e peso de mil grãos (E) de plantas de soja cultivadas em sistema de produção com sorgo sem adubação nitrogenada (dose 0) e com 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, na safra de 2021/22. Médias com letras iguais não diferem entre os sistemas de manejo do solo, pelo test t de Student (p<0,05)**



O número de vagens por planta apresentou interação significativa dos fatores. A maior diferença no número de vagens, considerando o resultado das duas safras, foi verificada na ausência de adubação nitrogenada, sendo que o SSD resultou em média 26% a mais de vagens que o SPC (Figura 24). Cabe ressaltar que o fator

adubação dentro de SSD não interferiu nesta variável, no entanto em SPC houve menor produção na ausência de aplicação de N (Figura 24).

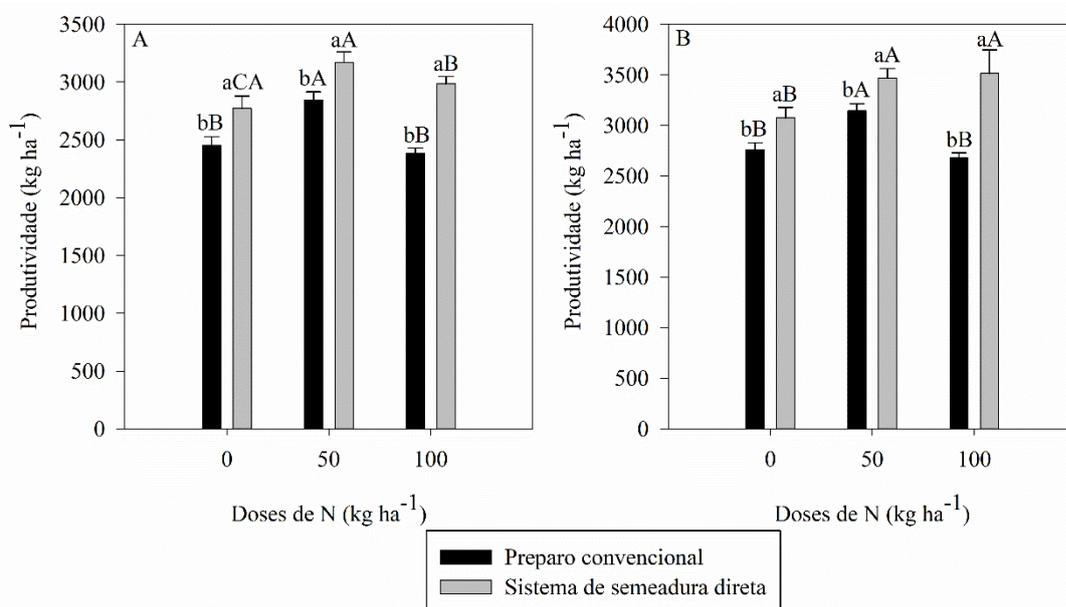
**Figura 24 - Número de vagem em plantas de soja em sistema de preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD), cultivada em sistema de produção com sorgo sem adubação nitrogenada (dose 0) e com 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, nas safras de 2019/20 (A) e 2021/22 (B). Médias com letras iguais minúsculas não diferem entre si na comparação entre os sistemas de manejo do solo dentro de cada dose de N, e médias com letras iguais maiúsculas não diferem entre si na comparação entre as doses de N dentro de cada sistema de manejo, pelo test t de Student (p<0,05)**



Em relação a produtividade de grãos de soja, o SSD resultou em maior produtividade em todas as doses de N, comparado ao SPC. Além disso, notou-se que a dose de 50 kg ha<sup>-1</sup>, em SSD e SPC, proporcionou maior estabilidade na produtividade nas duas safras, sendo esta superior às obtidas nos demais níveis de N, apesar de, em 2021/22 o SSD não se diferir na dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> (Figura 25). Na média dos dois anos, em SPC a dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> apresentou produtividade superior em 11,5% e 14,5% comparado a ausência de aplicação de N e 100 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Em SSD com 50 kg ha<sup>-1</sup> na safra 2019/20 este incremento foi de 12% e 6% em relação a 0 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, respectivamente, e em 2021/22 o

acrécimo foi de 6%, mas só em relação a ausência de adubação nitrogenada (Figura 25).

**Figura 25 - Produtividade de grãos de soja em sistema de preparo convencional do solo (SPC) e semeadura direta (SSD), cultivada em sistema de produção com sorgo sem adubação nitrogenada (dose 0) e com 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, nas safras de 2019/20 (A) e 2021/22 (B). Médias com letras iguais minúsculas não diferem entre si na comparação entre os sistemas de manejo do solo dentro de cada dose de N, e médias com letras iguais maiúsculas não diferem entre si na comparação entre as doses de N dentro de cada sistema de manejo, pelo test t de Student (p<0,05)**



#### 4.10 Produtividade da soja: análise multivariada dos dados

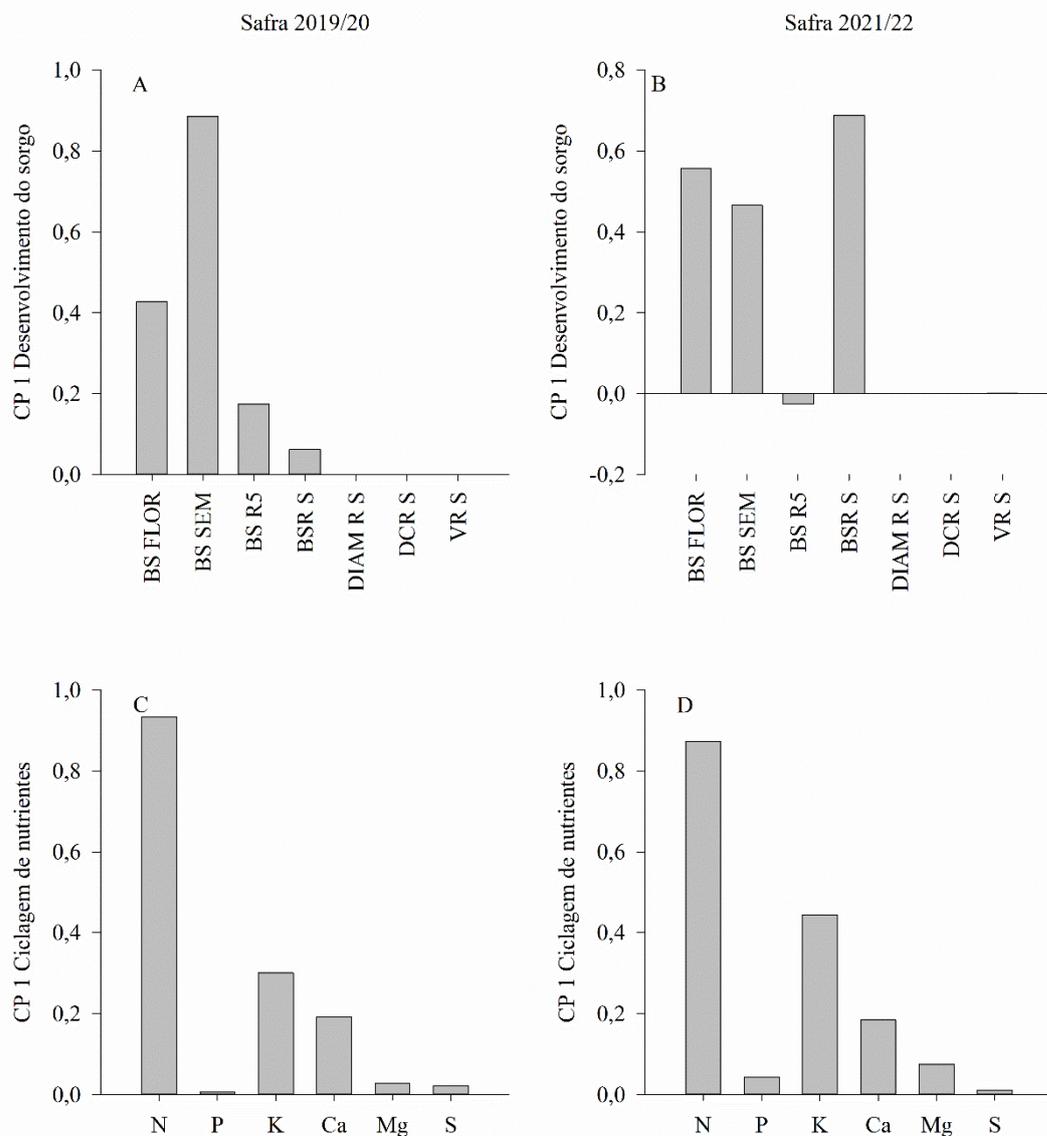
Para avaliar a relação das variáveis de desenvolvimento do sorgo, ciclagem de nutrientes, nitrogênio e carbono orgânico, agregados, física do solo, desenvolvimento radicular da soja, parâmetros fisiológicos, parâmetros bioquímicos e de componentes de produção sobre a produtividade da soja, foi utilizado apenas a primeira componente principal de cada grupo, pois representou mais de 70% da variabilidade total (Tabela 36).

**Tabela 36 - Porcentagem de explicação da primeira componente do grupo de variáveis de desenvolvimento do sorgo, ciclagem de nutrientes, nitrogênio e carbono orgânico, física do solo, desenvolvimento radicular, parâmetros fisiológicos, bioquímicos e componentes de produção da soja**

Grupo de variáveis	Porcentagem de explicação (%)	
	2019/20	2021/22
Desenvolvimento do sorgo	75,03	71,46
Ciclagem de nutrientes	88,92	84,48
Nitrogênio e carbono orgânico	91,43	91,43
Agregados do solo	95,80	95,80
Física do solo	99,13	99,13
Desenvolvimento radicular	99,99	99,99
Parâmetros fisiológicos	79,52	72,07
Parâmetros bioquímico	83,59	96,08
Componentes de produção	95,44	86,19

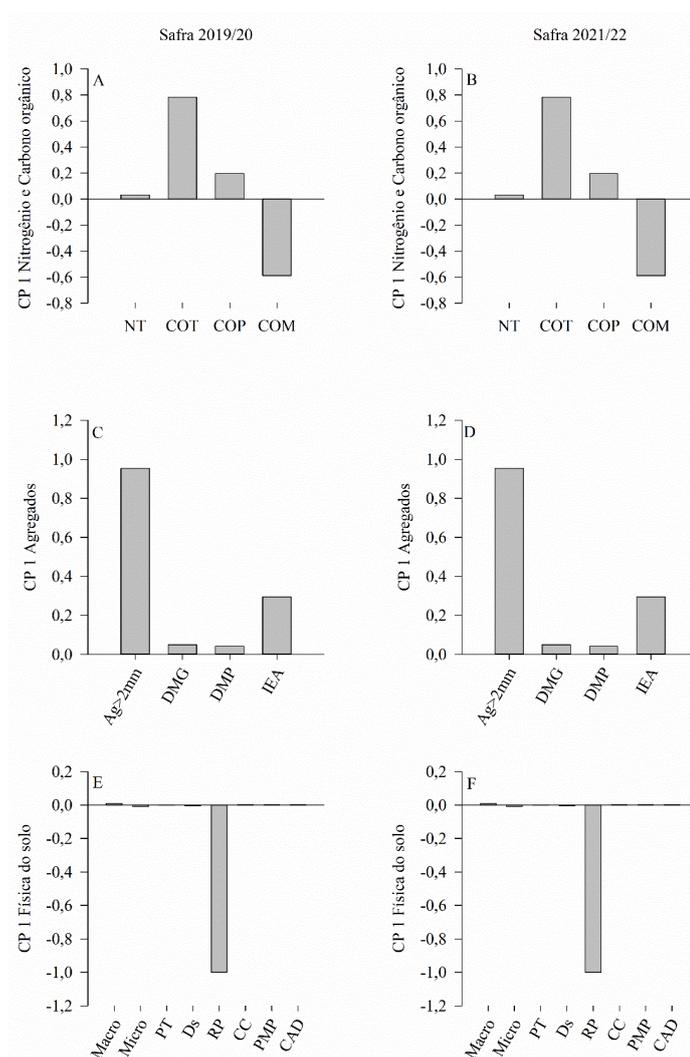
Na primeira componente dos grupos de desenvolvimento do sorgo e ciclagem de nutrientes, nas safras 2019/20 e 2021/22, a quantidade de fitomassa seca de sorgo no momento da semeadura (Figura 26A e 26B), fitomassa seca de raiz de sorgo (Figura 26B), e a ciclagem de N e K (Figura 26C e 26D), foram as características que mais explicaram os respectivos componentes, sendo todas com cargas positivas.

**Figura 26 - Loading da primeira componente principal das variáveis do grupo de desenvolvimento do sorgo (A e B) e ciclagem de nutrientes (C e D), nas safras 2019/20 (A e C) e 2021/22 (B e D). BS FLOR: fitomassa seca no florescimento do sorgo; BS SEM: fitomassa seca do sorgo na semeadura da soja; BS R5: fitomassa seca do sorgo em R5 da soja; BSR S: fitomassa seca radicular do sorgo; DIAM R S: diâmetro médio das raízes do sorgo; DCR S: densidade de comprimento radicular do sorgo; VR S: volume radicular do sorgo; N: nitrogênio; P: fósforo; K: potássio; Ca: cálcio; Mg: magnésio; S: enxofre**



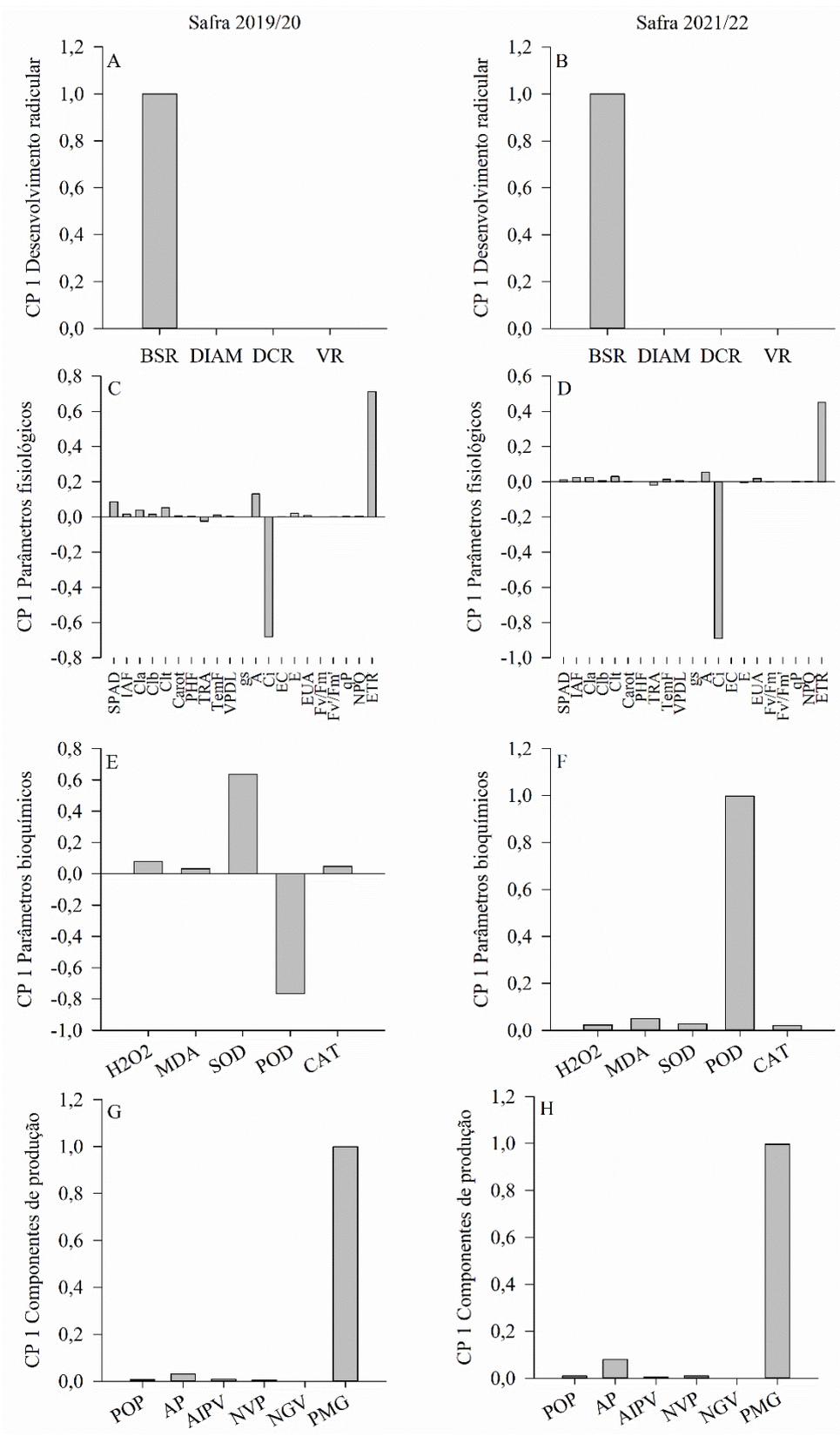
Nas duas safras conduzidas, entre os grupos de nitrogênio e carbono orgânico, agregados e física do solo, as variáveis com maiores expressões foram COT (0,78), COM (-0,58), Ag>2 mm (0,95) e RP (-0,99) (Figura 27).

**Figura 27 - Loading da primeira componente principal das variáveis do grupo de nitrogênio e carbono orgânico (A e B), agregados (C e D) e física do solo (E e F), nas safras 2019/20 (A, C e E) e 2021/22 (B, D e F). NT: nitrogênio total no solo; COT: carbono orgânico total; COP: carbono orgânico particulado; COM: carbono orgânico associado aos minerais; Ag>2mm: agregados maiores que 2 milímetros; DMG: diâmetro médio geométrico; DMP: diâmetro médio ponderado; Macro: macroporosidade; Micro: microporosidade; PT: porosidade total; Ds: densidade do solo; RP: resistência do solo à penetração; CC: capacidade de campo; PMP: ponto de murcha permanente; CAD: capacidade de água disponível**



A fitomassa seca de raiz de soja foi a principal característica do grupo de desenvolvimento radicular que interferiu na produtividade da soja nas duas safras (Figura 28A e 28B). Entre os parâmetros fisiológicos, bioquímicos e de componentes de produção, as variáveis com maiores destaques foram  $C_i$ , ETR, POD e PMG, com cargas de -0,68, 0,71, -0,76 e 0,99, respectivamente (Figura 28).

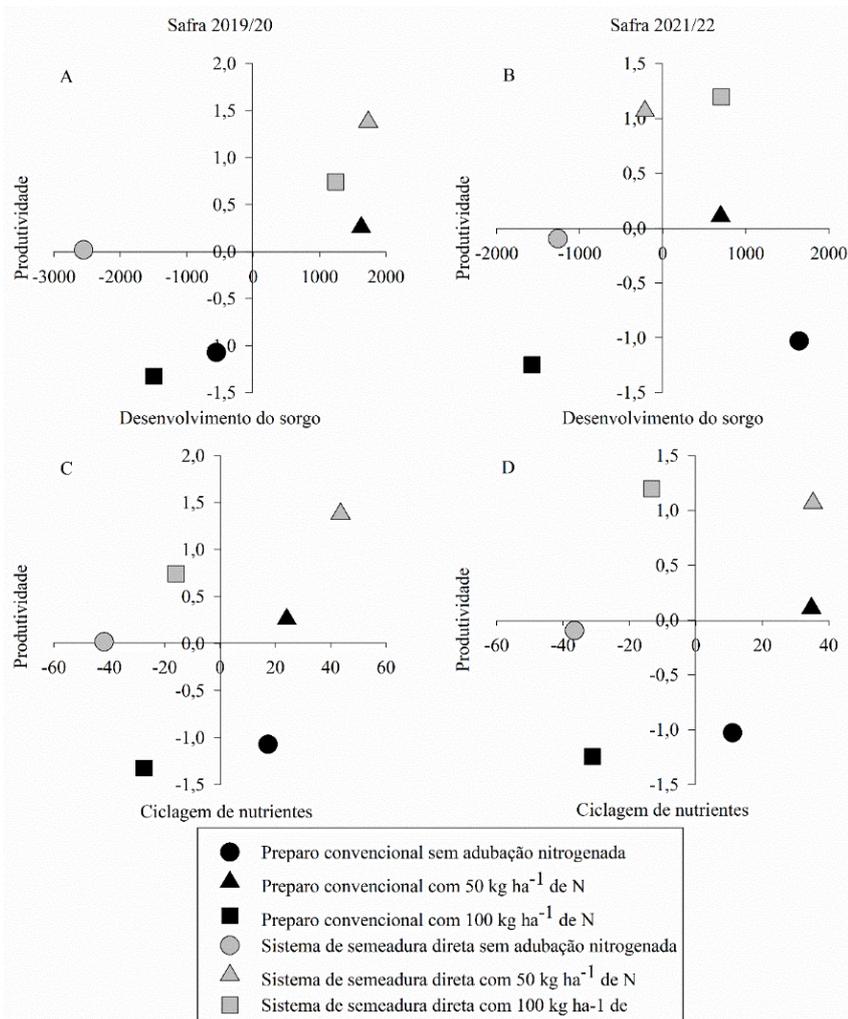
**Figura 28 - *Loading* da primeira componente principal das variáveis do grupo de desenvolvimento radicular da soja (A e B), parâmetros fisiológicos (C e D), parâmetros bioquímicos (E e F) e componentes de produção (G e H), nas safras 2019/20 (A, C, E e G) e 2021/22 (B, D, F e H). BSR: fitomassa seca radicular da soja; DIAM: diâmetro médio das raízes da soja; DCR: densidade de comprimento radicular da soja; VR: volume radicular da soja; SPAD: índice SPAD; IAF: índice de área foliar; Cla: clorofila a; Clb: clorofila b; Clt: clorofila total; Carot: carotenóides; PHF: potencial hídrico na folha; TRA: teor relativo de água na folha; TemF: temperatura da folha; VPDL: déficit de pressão de vapor; gs: condutância estomática; A: taxa de assimilação líquida de  $CO_2$ ;  $C_i$ : concentração interna de  $CO_2$  na folha; EC: eficiência de carboxilação; E: taxa de transpiração; EUA: eficiência do uso da água;  $F_v/F_m$ : Eficiência fotoquímica máxima do fotossistemas II;  $F_v'/F_m'$ : rendimento quântico potencial do fotossistemas II; qP: coeficiente de extinção fotoquímico; NPQ: coeficiente de extinção não fotoquímico; ETR: taxa aparente de transporte de elétrons;  $H_2O_2$ : peróxido de hidrogênio; MDA: malondialdeído; SOD: superóxido dismutase; POD: peroxidase; CAT: catalase; POP: população de plantas; AP: altura de planta; AIPV: altura de inserção da primeira vagem; NVP: número de vagem por planta; NGV: número de grãos por vagem; PMG: peso de mil grãos**



Por meio do gráfico de dispersão da primeira componente de cada grupo de variável, notou-se a influência dos componentes na produtividade da soja (Figura 29, 30 e 31).

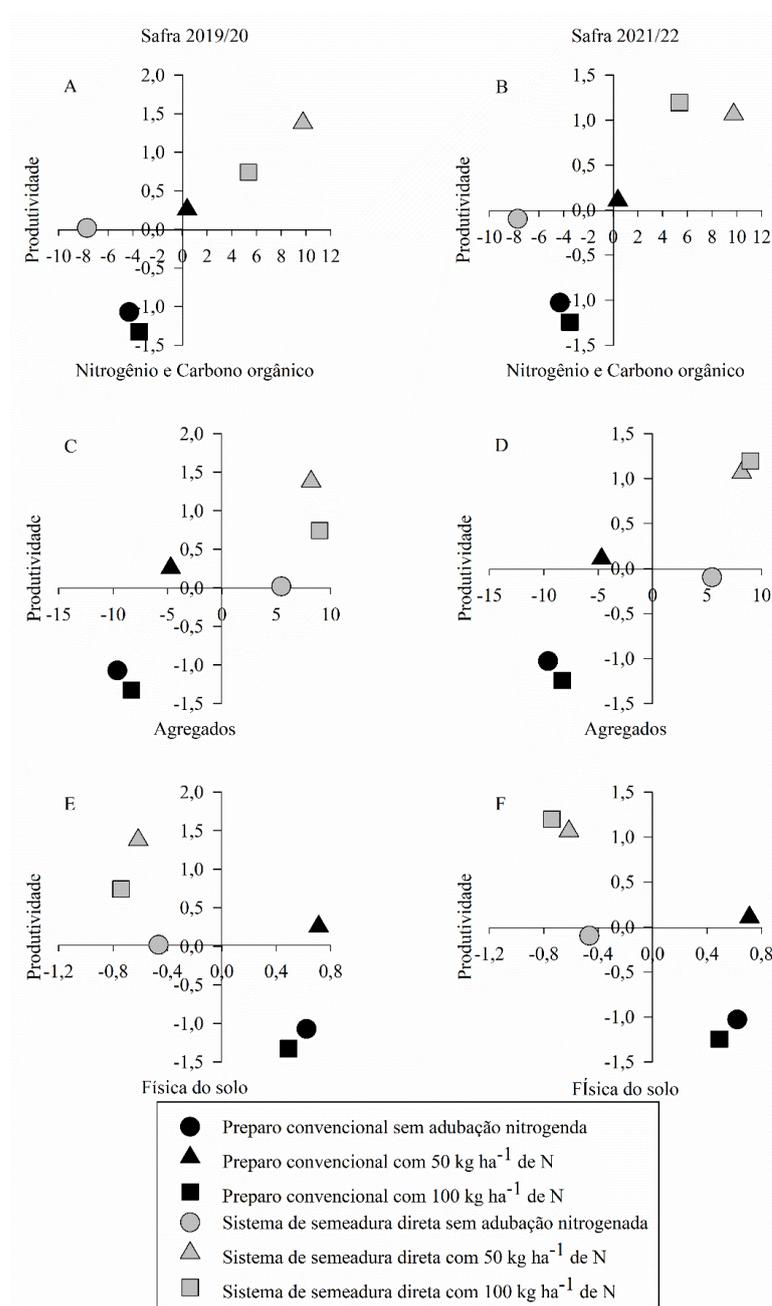
Para os grupos de variáveis de desenvolvimento do sorgo e ciclagem de nutrientes, as maiores produtividades da soja, nas duas safras, foram obtidas em SSD com adubação nitrogenada e em SPC com 50 kg ha<sup>-1</sup>. Na safra 2019/20, a maior produtividade de grãos associou-se com a quantidade de fitomassa seca de sorgo no momento da semeadura da soja e com aporte de N e K no sistema de produção. Em 2021/22 a maior produtividade da soja associou-se, principalmente, com a produção de fitomassa seca radicular do sorgo e aporte de N e K (Figura 26 e 29).

**Figura 29 - Dispersão das observações da primeira componente principal dos grupos de variáveis de desenvolvimento do sorgo (A e B) e ciclagem de nutrientes (C e D) sobre a produtividade da soja, nas safras 2019/20 (A e C) e 2021/22 (B e D)**



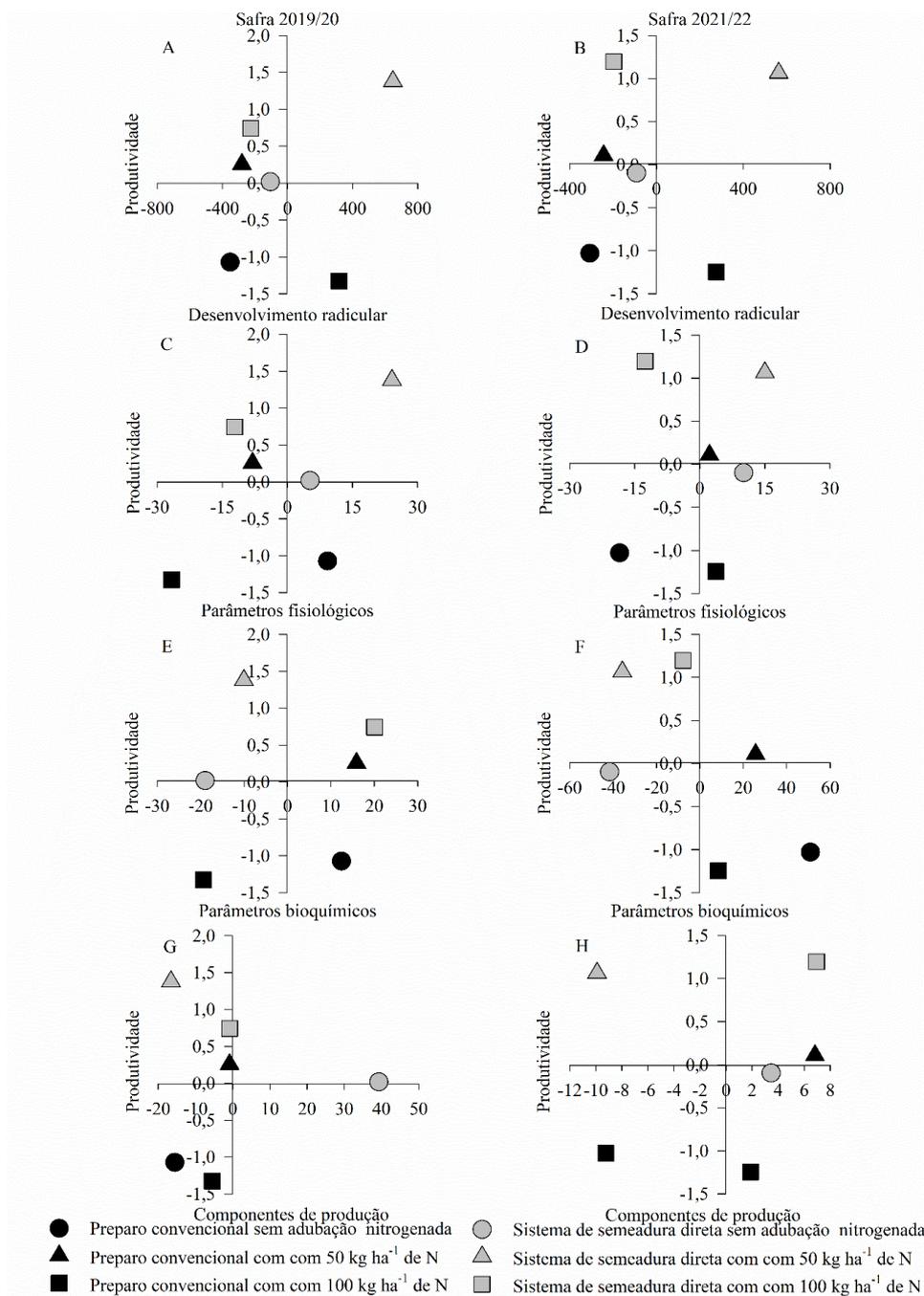
A produtividade da soja em relação aos grupos de variáveis relacionados com as propriedades do solo (nitrogênio e carbono orgânico, agregados e física do solo), também foi maior em SSD com adubação nitrogenada e em SPC com 50 kg ha<sup>-1</sup> de N (Figura 30). E neste caso, esteve relacionada com COT, COM, Ag>2mm e RP (Figura 27 e 30).

**Figura 30 - Dispersão das observações da primeira componente principal dos grupos de variáveis de nitrogênio e carbono orgânico (A e B), agregados (C e D) e física do solo (E e F) sobre a produtividade da soja, nas safras 2019/20 (A, C e E) e 2021/22 (B, D e F)**



A maior produtividade da soja cultivada em SSD com adubação nitrogenada e em SPC com 50 kg ha<sup>-1</sup> de N também associou-se com a produção de fitomassa seca radicular da soja, Ci, ETR, POD e PMG (Figura 28 e 31).

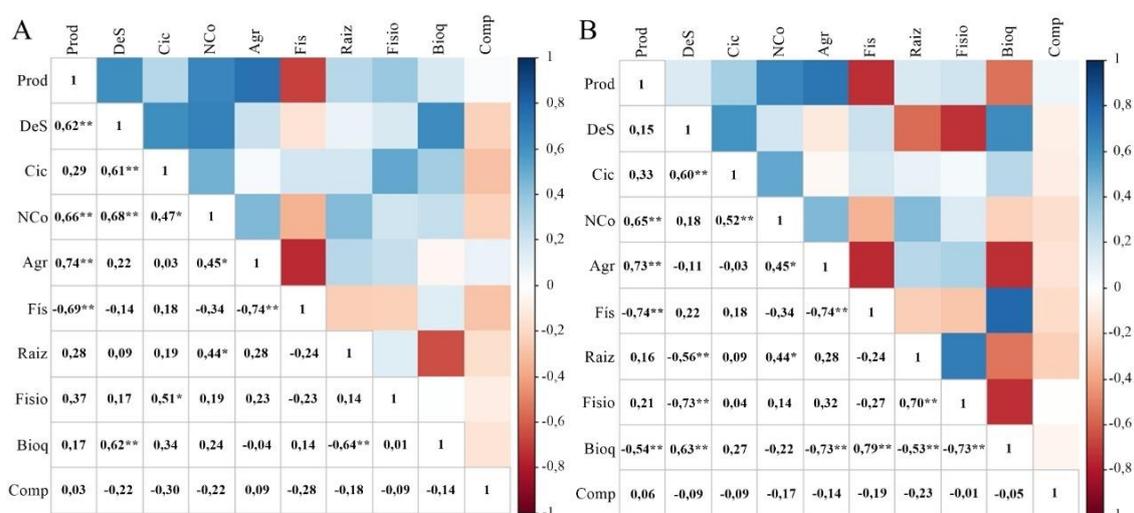
**Figura 31 - Dispersão das observações da primeira componente principal dos grupos de variáveis de desenvolvimento radicular (A e B), parâmetros fisiológicos (C e D), parâmetros bioquímicos (E e F) e componentes de produção (G e H) sobre a produtividade da soja, nas safras 2019/20 (A, C, E e G) e 2021/22 (B, D, F e H)**



Em síntese, a maior produtividade da soja foi observada em SSD com adubação nitrogenada e SPC com 50 kg ha<sup>-1</sup> de N aplicado em cobertura no cultivo do sorgo, sendo este comportamento associado, principalmente, a quantidade de fitomassa seca de sorgo no momento da semeadura da soja, fitomassa seca radicular do sorgo, aporte de N e K no sistema de produção, COT, COM, Ag>2mm, RP, fitomassa seca radicular da soja, Ci, ETR, POD e PMG (Figura 26, 27, 28, 29, 30 e 31).

Por meio da correlação de Pearson entre a primeira componente principal de cada grupo de variável, verificou-se que a produtividade nos dois anos apresentou correlação significativa com nitrogênio e carbono orgânico (0,66 e 0,65), agregados (0,74 e 0,73) e física do solo (-0,69 e -0,74), sendo que apenas na safra 2019/20 correlacionou-se com desenvolvimento do sorgo (0,62) e em 2021/22 com parâmetros bioquímicos (-0,54) (Figura 32).

**Figura 32 - Correlação de Pearson entre a produtividade (PROD) e a primeira componente principal do grupo de desenvolvimento do sorgo (DeS), ciclagem de nutrientes (CiC), nitrogênio e carbono orgânico (NCo), agregados (Agr), física do solo (Fís), desenvolvimento radicular da soja (Raiz), parâmetros fisiológicos (Fisio), parâmetros bioquímicos (Bioq) e componentes de produção (Comp), nas safras 2019/20 (A) e 2021/22 (B). \* e \*\* indica correlação significativa a  $p < 0,05$  e  $p < 0,01$ , respectivamente**



Foi observado também que nas duas safras o desenvolvimento do sorgo se correlacionou com a ciclagem de nutrientes (0,61 e 0,60) e parâmetros bioquímicos

(0,62 e 0,63); a componente de nitrogênio e carbono orgânico apresentou correlação significativa com a ciclagem de nutrientes (0,47 e 0,52), agregados (0,45 e 0,45) e desenvolvimento radicular da soja (0,44 e 0,44); o grupo das variáveis de agregados se correlacionou com o grupo de física do solo (-0,74 e -0,74); e a componente de desenvolvimento radicular da soja teve correlação significativa com parâmetros bioquímico (-0,64 e -0,53) (Figura 32).

Além dessas correlações, em 2019/20 a componente de nitrogênio e carbono orgânico apresentou correlação significativa com o desenvolvimento do sorgo (0,68); e a fisiologia se correlacionou com a ciclagem de nutrientes (0,51) (Figura 32A). E na safra 2021/22 foram observadas correlações significativas entre desenvolvimento radicular da soja e desenvolvimento do sorgo (-0,56), parâmetros fisiológicos e desenvolvimento do sorgo (-0,73), agregados e parâmetros bioquímicos (-0,73), desenvolvimento radicular da soja e parâmetros fisiológicos (0,70) e entre os parâmetros fisiológicos e bioquímicos (-0,73) (Figura 32B).

## 5 DISCUSSÃO

### 5.1 Produção de fitomassa aérea e radicular, persistência de palhada e ciclagem de nutrientes pelo sorgo biomassa durante o cultivo da soja

Na maioria das situações, a produtividade de fitomassa de sorgo foi maior com 50 kg ha<sup>-1</sup> de N em ambas as safras (Tabela 4). Desta forma, a dose com 50 kg ha<sup>-1</sup> de N resultou em maior eficiência agrônômica da adubação nitrogenada, pois possibilitou maiores produtividades de fitomassa de sorgo por kg de N aplicado. Ainda cabe ressaltar que, esses resultados foram obtidos na safra de outono-inverno, sendo que na safra 2019/20 até o florescimento do sorgo houve 152 mm de chuva acumulada entre a semeadura e o momento da avaliação (70 dias após a avaliação), e na safra 2021/22 a precipitação acumulada foi de 79 mm (77 dias). Isso indica o potencial dessa espécie para uso como planta de cobertura, uma vez que, na safra 2019/20, a produção de fitomassa seca foi superior ao mínimo recomendado por Alvarenga et al. (2001), que preconiza produção acima de 6 t ha<sup>-1</sup> de fitomassa seca. E apesar de não alcançar este patamar de produtividade de fitomassa seca na safra 2021/22, os valores ficaram próximos, mesmo que neste ano o volume precipitado até o florescimento do sorgo foi 48% menor, em comparação a safra 2019/20.

A resposta do sorgo à adubação nitrogenada pode variar, entre outros fatores, pelas condições edafoclimáticas, além de fatores genéticos inerentes a cada cultivar (MAW; HOUX; FRITSCHI, 2020). Porém, os resultados deste trabalho evidenciam que o sistema de manejo do solo, também influencia na resposta do sorgo à adubação com N. A diferença na resposta à adubação nitrogenada do sorgo nos dois sistemas está relacionada à dinâmica de N no solo em função do sistema de manejo (DING et al., 2020; SINGH; WILLIARD; SCHOONOVER, 2018). Em SPC, ocorre rápida mineralização do nitrogênio da MOS e resíduos vegetais, suprimindo a necessidade da cultura, principalmente em solo argiloso, com maior disponibilidade de N (LIU et al., 2021). Já em SSD, por ocorrer mobilização mínima do solo, o processo de mineralização da matéria orgânica é lento, não suprimindo a demanda da planta. Além disso, com a adição de C pelos restos vegetais, principalmente com elevada relação C/N, ocorre a imobilização de N pelos microrganismos do solo, aumentando a dependência e resposta da planta à adubação nitrogenada (JHA et al., 2020).

O maior desenvolvimento radicular das plantas de sorgo verificado em SPC sem adubação nitrogenada e em SSD com aplicação de N (Tabela 5 e 6) na profundidade do solo de até 0,20 m, pode conferir melhor absorção de água e nutrientes, e interferir diretamente no desenvolvimento e produtividade das plantas.

Cerca de 80% das raízes das culturas agrícolas situam-se até os primeiros 0,20 m de profundidade do solo, sendo esta camada a de maior fertilidade e umidade, contribuindo para maior absorção de água e nutrientes do solo. Este comportamento pode ser observado no desenvolvimento do sorgo, uma vez que a maior ciclagem de nutrientes foi verificada em SPC sem adubação nitrogenada e em SSD com aplicação de N, sendo que a dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N neste sistema apresentou maior potencial na ciclagem de nutrientes (Tabela 4). Este comportamento também pode ser verificado pela correlação direta entre o desenvolvimento do sorgo e a ciclagem de nutrientes (Figura 32).

A concentração de raízes na camada de 0,00 - 0,20 m de profundidade do solo em SPC sem aplicação de N representou 96% da produção total de fitomassa seca de raiz avaliada até a profundidade de 0,60 m. Em SSD com 50 kg ha<sup>-1</sup> a concentração foi de 92% e em SSD com 100 kg ha<sup>-1</sup> foi de 97% (Tabela 5 e 6), isso considerando os resultados da safra 2019/20 e 2021/22.

No entanto, cabe ressaltar que apesar destes tratamentos terem se destacado nos parâmetros de desenvolvimento radicular e ciclagem de nutrientes, o sorgo cultivado em SPC sem adubação nitrogenada e em SSD com 100 kg ha<sup>-1</sup> de N produziu raízes com maior diâmetro médio na profundidade de 0,00 - 0,20 m do solo (Tabela 5 e 7). Raízes com maior diâmetro pode ser um indicativo de solo compactado, já que ao crescer a raiz exerce uma pressão contra as partículas do solo, afastando-as, para permitir o seu alongamento, porém, quando há presença de camada com estado de compactação superior à capacidade de penetração das raízes, ocorre o aumento do diâmetro radicular, devido ao maior número de células por unidade de comprimento de raízes (BENNIE, 1996; COLOMBI; KELLER, 2019; VANHEES et al., 2021). Desta forma, justifica-se a maior ciclagem de nutrientes em SSD com 50 kg ha<sup>-1</sup> de N em relação à dose de 100 kg ha<sup>-1</sup>, apesar da mesma apresentar produção de fitomassa seca e volume radicular superior à dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> neste sistema de manejo do solo (Tabela 5 e 6).

Apesar da importância do desenvolvimento radicular na camada superior do solo, a presença de raízes em profundidade também é importante, uma vez que pode

conferir maior segurança hídrica e nutricional em períodos de veranicos e estiagem prolongada, além disso contribuem para formação de bioporos no solo, o que assegura melhor desenvolvimento da cultura sucessora (GALDOS et al., 2019; ZHANG; PENG, 2021). Sendo assim, os tratamentos sem aplicação de N em ambos os sistemas de manejo, em situação de seca ou veranicos apresentaram melhores condições para superação do estresse hídrico, tendo em vista que os mesmos tiveram melhor desenvolvimento radicular na camada de solo de 0,40 - 0,60 m (Tabela 9). E como não houve interação entre dose e sistema de manejo do solo na camada de 0,20 - 0,40 m, o SSD promoveu melhores condições para o desenvolvimento radicular nesta camada, e assim, podendo promover às plantas melhores mecanismos contra o estresse hídrico.

## **5.2 Nitrogênio total no solo e fracionamento da matéria orgânica**

O maior teor de NT verificado ao longo do perfil do solo (0,00 – 0,60 m) em SSD e na presença de adubação nitrogenada (Tabela 10, 11, 12, 13, 14 e 15) está relacionado aos princípios conservacionistas deste sistema de manejo do solo, já que há maior aporte de material vegetal em forma de palhada sem incorporação no solo, contribuindo para o maior teor de N no solo, por meio da decomposição do material orgânico, principalmente nas camadas superficiais do solo.

Tendo em vista que, a adubação nitrogenada apresentou maior produção de fitomassa aérea e ciclagem de nutrientes, principalmente em SSD (Tabela 4), houve, portanto, maior acúmulo de palha sobre o solo, o que contribuiu para o maior teor de NT.

A quantidade e qualidade da palhada também interfere no teor de C orgânico do solo, uma vez que, a quantidade é importante pelo aporte de C no solo, e a qualidade pela relação deste C com os demais nutrientes, estando relacionada à relação C/N e grau de recalcitrância do material, que está associado com a lignina, celulose, hemicelulose, compostos fenólicos, entre outros (FONTAINE et al., 2007; SCHMIDT et al., 2011). Desta forma, o maior teor de COT nas camadas de 0,00 – 0,10 m e 0,10 – 0,20 m, verificado em SSD com adubação nitrogenada e em SPC sem aplicação de N (Tabela 10 e 12), está associado ao aporte e persistência da palhada do sorgo sobre o solo, uma vez que, estes tratamentos também se destacaram para estas variáveis (Tabela 4), o que também pode ser verificado pela correlação positiva

entre o grupos de nitrogênio e carbono orgânico com a ciclagem de nutrientes e entre desenvolvimento do sorgo e ciclagem de nutrientes (Figura 32).

Já o maior teor de COT observado em SPC, nas camadas de 0,20 -0,40 m e 0,40 – 0,60 m (Tabela 12 e 15), está associado ao preparo do solo. Em SPC, o solo foi revolvido até a profundidade aproximada de 0,30 m e, no processo de revolvimento ocorre a incorporação de resíduos vegetais nas camadas mais profundas do solo, contribuindo para o aumento de material orgânico nestas camadas e, que posteriormente, é convertido em MOS, e assim, corroborando para o maior teor de COT nestas camadas (FRANZLUEBBERS, 2002). Já o maior teor de COT em SPC na ausência de aplicação de N na camada de 0,40 – 0,60 m, se deve a maior produção de fitomassa aérea de sorgo (Tabela 4); e em SSD com adubação nitrogenada, está associado não apenas a maior produção de fitomassa (Tabela 4), mas também a maior produção de raiz nesta profundidade do solo (Tabela 34), uma vez que a decomposição do sistema radicular também aumenta o teor de C orgânico do solo, este comportamento também foi observado pela correlação direta entre nitrogênio e carbono orgânico com desenvolvimento radicular da soja (Figura 32). Apesar do incremento no teor de C via sistema radicular em camadas mais profundas do solo ser pequena, esta é uma importante alternativa para aumento do C orgânico em profundidade, principalmente em sistemas conservacionistas de longa duração (PRIES et al., 2018).

O C orgânico do solo pode ser avaliado quanto a sua labilidade, sendo que por meio da separação das partículas do solo por tamanho, a MOS associada as frações mais grosseiras (fração areia) apresenta maior labilidade (CAMBARDELLA; ELLIOTT, 1992), enquanto a MOS associada a frações mais finas (fração argila), é de maior estabilidade (BALESDENT; WAGNER; MARIOTTI, 1988; BUYANOVSKY; ASLAM; WAGNER, 1994). Deste modo, nota-se que o maior teor de carbono lábil (COP) na profundidade do solo de 0,00 – 0,10 m em SSD (Tabela 11), está associado à maior presença de palha sobre o solo, quando comparado ao SPC (BLANCO-CANQUI; WORTMANN, 2020; PALM et al., 2014; PEIXOTO et al., 2020).

Já o maior teor de COP verificado em SPC na ausência de adubação nitrogenada (Tabela 12) na camada de 0,10 – 0,20 m, e em SPC na camada de 0,20 – 0,40 m (Tabela 13), se deve ao fato que os compostos lábeis se decompõem em curto período de permanência no solo, dentro de poucas semanas ou meses, sendo que sua principal função é o fornecimento de nutrientes às plantas pela mineralização,

além de energia e C aos microrganismos do solo (YU et al., 2022). Sendo assim, a incorporação de resíduos vegetais no solo promovida pela sua mobilização, na qual é realizada anualmente, faz com que ocorra constante renovação do material vegetal nesta camada. E assim, a decomposição deste material contribuiu para o aumento no teor de COP (Tabela 12 e 13). Sendo que, de forma cíclica, este maior teor de COP, provavelmente, resultou em maior liberação de nutriente, o que contribuiu para o melhor desenvolvimento das plantas de sorgo e ciclagem de nutrientes (Tabela 4).

A mesma dinâmica foi verificada em SSD com adubação nitrogenada, em que teve teor de COP, na camada de 0,10 – 0,20 m, superior à ausência de aplicação de N neste mesmo sistema de manejo do solo e ao SPC na dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N (Tabela 12). Uma vez que, estes tratamentos apresentaram maior produção de fitomassa aérea de sorgo e ciclagem de nutrientes (Tabela 4), e assim, contribuindo para o maior teor de COP, por meio da mineralização dos resíduos vegetais sobre o solo.

Ao contrário do COP, a fração mais recalcitrante da MOS, representada pelo COM, é mais estável e demora mais tempo para se decompor, representando cerca de 67% do C orgânico (YU et al., 2022). Neste trabalho, na camada de 0,00 – 0,20 m, em SSD, principalmente na presença de adubação nitrogenada, houve maior teor de COM (Tabela 10 e 12), o que está relacionado com a maior preservação da estrutura do solo, promovida pela ausência de mobilização e aporte constante de matéria orgânica (PALM et al., 2014). Uma vez que, a ausência de mobilização do solo contribuiu para preservação dos agregados e, a MOS recalcitrante fica protegida no interior dos agregados, principalmente os microagregados (LI et al., 2021), o que dificulta a decomposição microbiana, contribuindo para o aumento do grau de humificação (WIESMEIER et al., 2019).

Apesar do SSD com adubação nitrogenada na camada de 0,00 – 0,20 m apresentar maior teor de COT, na camada de 0,10 – 0,20 m, na ausência de aplicação de N, o SPC foi superior ao SSD. Este resultado pode estar associado ao desenvolvimento radicular do sorgo neste tratamento, uma vez que o mesmo promoveu maior fitomassa seca de raiz (Tabela 6). Pesquisas têm demonstrado importante contribuição das raízes para as frações estáveis da MOS (JOHNSON; BARBOUR; WEYERS, 2007; RASSE; RUMPEL; DIGNAC, 2005), sendo que as raízes apresentam um coeficiente de humificação de carbono cerca de 2,3 vezes maior que os resíduos de parte aérea (KÄTTERER et al., 2011). Este efeito pode estar associado

à estabilização física relacionada ao arranjo das partículas do solo protegendo o acesso de microrganismo, enzimas e oxigênio (SIX et al., 2002, 2004). A maior contribuição das raízes no incremento de C ao solo em relação à fitomassa aérea, também pode ser atribuída à recalcitrância dos compostos que predominam nas raízes, como por exemplo, a presença de lignina, que está associada à formação de substâncias húmicas (RASSE; RUMPEL; DIGNAC, 2005; SCHULTEN; LEINWEBER, 2000).

O maior teor de COM obtido na profundidade de 0,20 – 0,40 m em SPC e nas doses de 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, sem interação entre os fatores (Tabela 13), e em 0,40 – 0,60 m em SPC sem adubação nitrogenada (comparado ao SSD sem adubação nitrogenada) (Tabela 15), pode ser devido a maior produção de fitomassa aérea de sorgo (Tabela 4) e a incorporação de resíduos vegetais, promovidos pelo SPC. O preparo do solo foi realizado até próximo a 0,30 m de profundidade, abaixo disso, não houve mobilização do solo, assim, a mineralização dos resíduos vegetais incorporados em profundidade somado a decomposição das raízes, sem a perturbação do solo, contribuiu para o aumento do COM, uma vez que em SSD ocorre apenas a decomposição do sistema radicular.

Já o maior teor de COM, na camada 0,40 – 0,60 m em SSD com adubação nitrogenada (comparado ao SSD sem aplicação de N), pode ser associado à proteção da MOS pelos microagregados, já que apresentou maior microagregação (Tabela 27), o que também pode ser observado pela correlação positiva entre carbono orgânico e agregação e entre agregação e física do solo, ambas positivas (Figura 32).

No SSD, o C incorporado aos tecidos vegetais, tem sua velocidade de decomposição reduzida, devido à ausência do revolvimento, intensificando o processo de estabilização da MOS (STEWART et al., 2009). Além disso, os agregados do solo não são rompidos, preservando a MOS protegida no seu interior, evitando assim o ataque por microrganismos. A formação de cobertura morta permite, dependendo de condições climáticas, não só a manutenção, mas também o aumento no conteúdo da MOS, principalmente em sistemas de longa duração (COOPER et al., 2021; COSTA et al., 2004).

Sistemas de manejo do solo que fornecem entrada constante de matéria seca aérea e radicular e nos quais o solo permanece sempre coberto por resíduos vegetais, concorrem para manter a qualidade do solo (ASSUNÇÃO et al., 2019; SÁ et al., 2015). Desta forma, a adubação nitrogenada em sistema de produção, pode ser uma

alternativa para melhorar o compartimento de C orgânico no solo, uma vez que, em SSD as doses de 50 e/ou 100 kg ha<sup>-1</sup> de N favoreceram a produção de fitomassa da cultura de outono-inverno e os teores de C no solo (Tabela 4, 10 e 12).

### 5.3 Estabilidade de agregados em água

A estabilidade de agregados, avaliada por Ag>2mm, DMG, DMP e IEA, na camada de 0,00 – 0,40 m, foi maior em SSD e com adubação nitrogenada (Tabela 16, 17, 18, 19 e 20). Estes resultados estão relacionados ao teor de C orgânico no solo e à ausência de revolvimento, como evidenciado também pela correlação entre estes fatores (Tabela 34). Apesar do SPC apresentar maior teor das frações do C em algumas camadas do solo (Tabela 12 e 13), o fato de não haver mobilização do solo em SSD somado ao maior teor de COP e COM (Tabela 10, 11, 12), principalmente nas camadas superficiais do solo, contribuiu para melhor agregação das partículas. O maior teor de COP reflete a ação de mecanismos de proteção física das estruturas orgânicas mais lábeis por mecanismos como a agregação do solo, o qual é normalmente intensificado por sistemas de preparo reduzido ou em SSD (JENSEN et al., 2020).

Pesquisas demonstram que, o maior aporte de MOS e o menor revolvimento, promovidos pelo SSD, têm sido eficientes em aumentar a estabilidade de agregados (COOPER et al., 2021; SILVA et al., 2022c). Pois, o maior aporte de resíduos vegetais no perfil do solo resulta em aumento no teor MOS, o que concorre para a formação de agregados estáveis, em razão da ação cimentante e aglutinadora que a MOS exerce sobre as partículas minerais do solo (RIGON et al., 2021; RIGON; FRANZLUEBBERS; CALONEGO, 2020). E a maior estabilidade dos agregados aumenta a capacidade do solo em suportar cargas sem sofrer compactação adicional, pois aumenta a força de união entre as partículas, aumentando a estabilidade dos agregados (BRAIDA et al., 2011; FRANZLUEBBERS, 2002).

O DMG é uma estimativa do tamanho da classe de agregado mais frequente no solo; o DMP é uma estimativa da quantidade relativa de solo em cada classe de agregados; o Ag>2mm pode refletir a resistência do solo à erosão e o IEA é uma medida da agregação do solo, como total, e varia entre 0 e 100% (CASTRO FILHO et al., 2002). Os resultados desta pesquisa mostram que na camada de 0,00 – 0,40 m, o SSD e a adubação nitrogenada, em média, apresentaram DMG superior a 2mm, o

que contribuiu para maior DMP e porcentagem de  $Ag > 2\text{mm}$ , resultando em maior índice de agregação do solo (Tabela 16, 17, 18, 19 e 20). Isso acontece porque, quanto maior for o agregado, maiores serão o DMP e os espaços porosos entre agregados, aumentando a infiltração e diminuindo a erosão (ANDERSON; BRYE; WOOD, 2019; HARTMANN; SIX, 2022).

No entanto, na camada de 0,40 – 0,60 m, o maior DMG foi observado em SPC, e a maior porcentagem de  $Ag > 2\text{ mm}$  foi verificada na ausência de adubação nitrogenada e na dose de  $100\text{ kg ha}^{-1}$ . Tal comportamento também está associado ao conteúdo de matéria orgânica nesta camada do solo (Tabela 5) e ao não revolvimento do solo nesta profundidade, uma vez que, a ausência de mobilização do solo e a matéria orgânica favorecem a agregação do solo (FERNANDES et al., 2023; GUHRA; STOLZE; TOTSCHKE, 2022; SILVA et al., 2022c).

A maior porcentagem de  $Ag > 2\text{ mm}$  na ausência de adubação nitrogenada pode estar associada a maior incorporação de resíduos vegetais em profundidade, promovidos pelo SPC (Tabela 4) e a maior produção de raiz em SSD (Tabela 9 e 34). E a maior porcentagem de  $Ag > 2\text{mm}$  na dose de  $100\text{ kg ha}^{-1}$  de N pode estar relacionado ao maior desenvolvimento radicular do sorgo e da soja nesta camada (Tabela 9 e 34).

O sistema radicular das plantas tem importante função na agregação do solo, primeiro age na aproximação das partículas e agregados, por meio da força mecânica, posteriormente, durante sua decomposição liberam secreções que ajudam a ligar as partículas do solo e, após mineralizada, já vista como matéria orgânica no solo, exercem ação cimentante entre as partículas e agregados (LI et al., 2020; QIAO et al., 2014). Além disso, o sistema radicular também altera o equilíbrio osmótico do ambiente do solo por meio da deposição na rizosfera e absorção de nutrientes, afetando assim o processo de agregação, o que acaba por aumentar a resistência dos agregados do solo à erosão e melhorar as funções de conservação do solo e da água (CALLESEN et al., 2016; GHIDEY; ALBERTS, 1997; PAUSCH; KUZYAKOV, 2018).

#### **5.4 Propriedades físicas do solo, armazenamento e disponibilidade de água no solo**

O maior índice de compactação do solo na camada de 0,00 – 0,10 m em SSD sem adubação nitrogenada já era esperado, uma vez que neste sistema de manejo

do solo não há revolvimento, e a pressão dos maquinários acaba resultando em uma camada superficial mais compactada, quando comparada com sistemas que há o revolvimento do solo (MORAES et al., 2019a) e, por isso, ocorre menor macroporosidade, maior microporosidade, Ds e RP (Tabela 22 e 23).

No entanto, a aplicação de N no sorgo antes da soja em SSD favoreceu a física do solo nesta profundidade, uma vez que aumentou a macroporosidade e reduziu a DS (Tabela 22). Estes resultados estão associados com a melhor agregação do solo nesta profundidade em SSD (Tabela 16). Outro fator associado é o desenvolvimento radicular do sorgo e da soja, que em SSD foram superiores com adubação nitrogenada (Tabela 5 e 29). O maior desenvolvimento radicular, além de favorecer a agregação do solo (LI et al., 2020; QIAO et al., 2014), possibilita a formação de bioporos e a conectividade entre eles, já que após sua decomposição são deixados canais ao longo do perfil do solo, aumentando a porosidade e reduzindo a densidade e resistência do solo à penetração (SILVA et al., 2022b; ZHANG et al., 2019; ZHANG; PENG, 2021).

Nas camadas de 0,10 - 0,20, 0,20 – 0,40 e 0,40 – 0,60 m, de modo geral, o SSD sem adubação nitrogenada e SPC com 100 kg ha<sup>-1</sup> de N apresentaram maior porosidade e menor compactação do solo (Tabela 24, 26 e 27). Tais resultados também estão relacionados ao aporte de carbono (Tabela 12 e 15), agregação (Tabela 18 e 20) e desenvolvimento radicular do sorgo e da soja (Tabela 6, 9, 31, 33 e 34), já que o maior aporte de carbono orgânico no solo e desenvolvimento radicular favorece a agregação do solo e, por conseguinte, a porosidade (CALLESEN et al., 2016; PAUSCH; KUZYSKOV, 2018; SILVA et al., 2022c).

Considerando a camada de solo de 0,00 – 0,40 m, a RP e a CAD não apresentaram interação entre os fatores, no entanto, o sistema de manejo do solo influenciou no comportamento destas variáveis, sendo que o SSD apresentou maior RP e CAD (Tabela 23, 25 e 26). Pesquisas demonstram que, geralmente, o SSD apresenta maior RP em relação à sistema com revolvimento do solo, pois como não há mobilização do solo, a pressão exercida pelos maquinários e implementos agrícolas promovem maior acomodação das partículas, resultando em maior RP (FERREIRA et al., 2021; GALDOS et al., 2019; PEIXOTO et al., 2020; PÖHLITZ et al., 2018). Porém, estes altos valores não afetam o desenvolvimento radicular e a produtividade das plantas (FERREIRA et al., 2021; SILVA et al., 2022a, 2022b), como pode ser também observado nos resultados de desenvolvimento radicular da soja

nesta pesquisa, que apesar de interferir no diâmetro médio das raízes em algumas profundidades, não prejudicou a fitomassa seca, densidade de comprimento e volume radicular (Tabela 29, 30, 31, 33, 34 e 35).

No entanto, mesmo o SSD apresentando maiores valores de RP, isso não interferiu na CAD, o que está relacionado aos valores de macro e microporosidade do solo, principalmente na ausência de adubação nitrogenada (Tabela 22 e 24). Os macroporos são responsáveis pela aeração, movimentação da água no perfil do solo e também pela penetração das raízes, enquanto os microporos agem na retenção de água no solo (BLANCO-CANQUI; RUIS, 2018a; MÜLLER et al., 2018). Desta forma, a maior macroporosidade contribui para melhor infiltração de água no perfil, enquanto, os microporos retêm mais água no solo (LIMA et al., 2022).

Cabe ressaltar que, valores de macroporosidade inferiores a  $0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  são prejudiciais ao desenvolvimento da maioria das culturas agrícolas. Sendo assim, o SPC a partir da profundidade do solo de 0,10 m apresentou valores críticos de macroporosidade, principalmente na ausência de adubação nitrogenada e na dose de  $50 \text{ kg ha}^{-1}$ ; enquanto o SSD apresentou valores abaixo de  $0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  apenas na camada de 0,10 – 0,20 m na dose de  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  e na camada de 0,40 – 0,60 m na presença de aplicação de N (Tabela 24, 26 e 27).

Além dos altos valores de RP em SSD não afetarem a CAD (Tabela 23, 25 e 26), o mesmo também não afetou o armazenamento e disponibilidade de água no solo para às plantas (Figura 2 e 3). O maior conteúdo de água disponível às plantas em SSD está relacionado principalmente à presença de bioporos e maior continuidade dos poros ao longo do perfil do solo, pois garante melhor eficiência no processo de infiltração de água e favorece a retenção (GALDOS et al., 2019; ZHANG; PENG, 2021).

Cabe ressaltar que esta maior disponibilidade de água no solo às plantas, principalmente em maior profundidade (abaixo de 0,40 m), garante às plantas um ambiente com menor susceptibilidade a veranicos e períodos de seca prolongada, contribuindo para maior produtividade (CHALISE et al., 2019; SILVA et al., 2022a, 2022b). Neste cenário, em SSD a umidade do solo se manteve com mais frequência dentro da condição de água disponível (Figura 2 e 3), o que pode ter contribuído para menor ocorrência de estresse hídrico.

## **5.5 Desenvolvimento radicular das plantas de soja**

O desenvolvimento radicular da soja foi favorecido pela adubação nitrogenada em cobertura no sorgo, em ambos os sistemas de manejo do solo, ao longo do perfil avaliado (0,00 – 0,60 m) (Tabela 29, 30, 31, 33, 34 e 35). No entanto, o maior efeito da adubação nitrogenada em SPC, principalmente com a dose de 100 kg ha<sup>-1</sup>, na camada 0,00 - 0,20 m, (Tabela 29 e 31), pode estar associado a maior macroporosidade e porosidade total verificado neste tratamento (Tabela 24), já que a macroporosidade está relacionada ao desenvolvimento radicular (HUDEK et al., 2022; MÜLLER et al., 2018; ZHANG et al., 2022; ZHOU et al., 2021).

Já em subsuperfície (0,20 – 0,60 m), o SSD na presença de adubação nitrogenada em cobertura no sorgo resultou em melhor desenvolvimento radicular da soja, comparado ao SPC com aplicação de N, verificado pela produção de fitomassa, densidade de comprimento e volume radicular (Tabela 33 e 34). Isso se deve ao fato que, em SSD há maior presença de bioporos e maior conectividade dos poros, conectando as camadas superficiais às mais profundas (GALDOS et al., 2019; ZHANG; PENG, 2021). Sendo a formação e continuidade dos bioporos atribuída, principalmente, a ausência de mobilização do solo e diversificação de sistema radicular ((ZHANG; PENG, 2021). A presença e conectividade dos bioporos favorece o desenvolvimento radicular em profundidade, com menor gasto metabólico das plantas, pois fornecem espaços com baixa resistência mecânica e altas concentrações de oxigênio e conteúdo de nutrição na fase sólida, proporcionado pelo processo de decomposição das raízes da cultura antecessora (COLOMBI et al., 2017; KAUTZ, 2015; PFEIFER; KIRCHGESSNER; WALTER, 2014).

O N é o nutriente mais requerido pelas plantas de soja, com importante função no crescimento radicular, este nutriente é fornecido principalmente via fixação biológica de nitrogênio (FBN) (80%) e matéria orgânica do solo (HUNGRIA; MENDES, 2015; MOREAU et al., 2019). Apesar de não ser necessário adubar a soja com N, nossos resultados mostram que a adubação nitrogenada no sorgo envolvido em sistema de produção com soja favorece o desenvolvimento radicular da soja em profundidade em SSD (Tabela 33 e 34). A presença de raízes em maiores profundidades no solo pode garantir melhor condições hídricas e nutricionais às plantas, uma vez que aumenta a área de exploração do sistema radicular, passando a ter acesso a água e nutrientes armazenados em camadas mais profundas do solo (CHALISE et al., 2019; SILVA et al., 2022a). Cabe aqui ressaltar que, a adubação

nitrogenada em SSD na cultura do sorgo proporcionou a ciclagem de aproximadamente 100 kg ha<sup>-1</sup> de N para o sistema de produção até a fase fenológica R5 da soja (Tabela 4).

## 5.6 Parâmetros fisiológicos das plantas de soja

Os maiores valores de índice SPAD na soja verificados na ausência de aplicação de N no sorgo e na dose de 50 kg ha<sup>-1</sup>, e de IAF em SSD e na dose de 50 kg ha<sup>-1</sup>, nas safras 2019/20 e 2021/22 (Figura 4 e 5), podem estar relacionados com a presença da fitomassa do sorgo sobre o solo durante o cultivo da soja e com o fornecimento de N por esses resíduos (Tabela 4). Na literatura são vários os trabalhos que evidenciam a importância dos cultivos e do manejo da adubação na entressafra, em sistema de produção com soja, influenciando na quantidade e qualidade da fitomassa produzida, e desempenho da soja (BALBINOT JUNIOR et al., 2011; BLANCO-CANQUI et al., 2015; SILVA et al., 2022b), inclusive no índice SPAD e IAF (AKHTAR et al., 2019; BUCZEK; BOBRECKA-JAMRO; JAŃCZAK-PIENIAŻEK, 2022).

A adubação nitrogenada em cobertura no sorgo também influenciou nos teores de clorofila *a*, *b*, total e carotenoides na cultura da soja. Em síntese, em SSD a dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> expressou maiores teores, enquanto que em SPC foi verificado na dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> (Figura 6 e 7). Apesar da adubação nitrogenada na soja nem sempre evidenciar alterações no desenvolvimento da planta (HUNGRIA; MENDES, 2015; HUNGRIA; NOGUEIRA; ARAUJO, 2015), estes resultados mostram que a adubação nitrogenada na cultura antecessora à soja é capaz de influenciar nos teores dos pigmentos fotossintéticos das plantas (Figura 6, 7 e 8). A liberação de N pela palhada do sorgo nestes tratamentos (Tabela 4) pode ter favorecido a absorção deste nutriente pelas plantas, além disso, a maior persistência desta palha sobre o solo pode ter proporcionado ambiente mais favorável para a fixação biológica do N (FBN), uma vez que a palhada conserva melhor a umidade do solo e reduz a amplitude térmica, sendo que a alta temperatura e baixa umidade no solo prejudicam a FBN (HUNGRIA; KASCHUK, 2014; SANTACHIARA; SALVAGIOTTI; ROTUNDO, 2019; WU et al., 2020).

Os maiores teores de carotenoides garantem maior absorção da energia luminosa, atuando também como constituintes do sistema de defesa antioxidante não enzimático das plantas (HABIBI, 2017; MAOKA, 2020). Os maiores teores de

carotenoides podem ser um indicativo de maior eficiência do aparato fotossintético, pois atuam na eliminação do excesso de energia luminosa, evitando a ligação de elétrons livres com moléculas de oxigênio e prevenindo à formação de espécies reativas de oxigênio (ERO) e danos fotooxidativos (LUO et al., 2016; WANG et al., 2018b).

O nitrogênio é um componente chave no conteúdo de clorofila, desempenhando importante função no processo fotossintético, tanto que os parâmetros fisiológicos apresentaram correlação significativa com a ciclagem de nutrientes (Figura 32A), uma vez que o N foi o elemento mais importante na ciclagem de nutrientes (Figura 26C e 26D). O N é constituinte da molécula de clorina no centro da clorofila, além de atuar na síntese de aminoácido e ser precursor das proteínas que fazem parte do processo fotossintético (EVANS, 1983; LIU et al., 2021; PAN et al., 2022; SOUZA et al., 2020). A quantidade de energia solar captada pela folha está diretamente associada com a quantidade de pigmentos fotossintéticos, sendo que baixos teores reduzem a capacidade fotossintética (CROFT et al., 2017; HOUBORG et al., 2015; PENG et al., 2011; RICHARDSON; DUIGAN; BERLYN, 2002).

As moléculas de clorofila facilitam a conversão da irradiação solar absorvida em energia química armazenada, por meio da captação de energia luminosa e fornecimento de elétrons para a cadeia de transporte, o que leva à produção de NADPH para as reações do Ciclo de Calvin-Benson (CHEN, 2014). Desta forma, a maior eficiência nas trocas gasosas com a dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N, em ambos os sistemas de manejo do solo (Figura 11 e 12), podem estar associadas aos maiores teores dos pigmentos fotossintéticos (Figura 6, 7 e 8), que por sua vez, estão relacionados à presença de fitomassa de sorgo sobre o solo durante o cultivo da soja e a ciclagem de N no sistema de produção (Tabela 4).

Além do fornecimento de N, a palhada sorgo foi eficiente na ciclagem de outros macronutrientes (Tabela 4). O fornecimento destes nutrientes às plantas de soja também pode ter contribuído no desempenho do aparato fotossintético, principalmente em SSD com 50 kg ha<sup>-1</sup>, já que se destacou na ciclagem de nutrientes (Tabela 4).

O P foliar é um dos componentes mais importantes de compostos químicos intimamente relacionados à fotossíntese (BLOOMFIELD; FARQUHAR; LLOYD, 2014; CROUS et al., 2017), sendo que sua deficiência pode reduzir a eficiência do uso da luz, as taxas de transporte de elétrons (CONROY et al., 1986), a atividade enzimática

no ciclo de Calvin, a regeneração da ribulose bisfosfato (CAMPBELL; SAGE, 2006). Os íons de Ca fornecem o acceptor terminal e regulam o fluxo de elétrons fotossintéticos (HOCHMAL et al., 2015), enquanto os íons Mg e K agem como contra-íons coletores de luz nos tilacóides e têm efeitos opostos (BATTIE-LACLAU et al., 2014), outra importante função do K é a regulação estomática, que depende do conteúdo de  $K^+$ , interferindo diretamente nas relações hídricas das plantas e na absorção de  $CO_2$  (JIN et al., 2011; TOMEMORI; HAMAMURA; TANABE, 2002; WANG et al., 2013). É provável que o fornecimento de K às plantas de soja tenha contribuído com o processo fotossintético das plantas, uma vez que o K teve destaque entre os nutrientes liberados pela palhada (Figura 26C e 26D) e houve interação significativa entre a fisiologia e a ciclagem de nutrientes (Figura 32A). O S desempenha importante papel como componentes estruturais para moléculas celulares, atuando também agente de sinalização celular (BISWAL et al., 2008). Os metabólitos de S (tiol, cisteína, metionina e glutatona) são essenciais para o desenvolvimento de mecanismos de defesa eficazes para enfrentar diferentes estresses, que impactam a atividade fotossintética (IHSAN et al., 2019).

A maior temperatura da folha em SSD, nas duas safras (Figura 10A e 10C), contribuiu para o maior VPD (diferença de pressão de vapor entre a superfície da folha e o ar) em SSD com  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  de N aplicados em sistema de produção com soja, assim reduzindo a  $g_s$  (redução apenas na safra 2019/20, pois em 2021/22 foi superior) (Figura 11A, 11B, 12A e 12B), indicando que os fatores estomáticos podem ter desempenhado um papel fundamental na redução da taxa fotossintética em resposta ao aumento da temperatura (JUMRANI; BHATIA; PANDEY, 2017). No entanto, mesmo com menor condutância estomática na safra 2019/20, este tratamento, nas duas safras, apresentou maior taxa de assimilação líquida de  $CO_2$  ( $A$ ), menor concentração interna de  $CO_2$  na folha ( $C_i$ ), maior eficiência de carboxilação ( $EC$ ), e mesmo com maior taxa de transpiração ( $E$ ), apresentou maior eficiência no uso da água (Figura 11 e 12).

A maior temperatura da folha e VPD levou à maior demanda de transpiração, como mecanismo para manter a planta resfriada, assim, para atender a demanda de evapotranspiração houve aumento considerável na  $E$  nas folhas das plantas de soja. No entanto, mesmo com a  $g_s$  reduzida, houve aumento da  $E$ , o que pode estar associado com o aumento do VPD (JUMRANI; BHATIA; PANDEY, 2017). E do

mesmo modo, a menor  $g_s$ , não prejudicou a  $A$ , resultando em maior CE e EUA (Figura 11 e 12).

A EUA é uma importante característica relacionada à adaptação das plantas cultivadas sob estresses abióticos, sendo definida pela razão entre a taxa de assimilação de carbono e a taxa de transpiração (RAY; SINCLAIR, 1998). A maior EUA na soja verificada em SSD com 50 kg ha<sup>-1</sup> de N aplicado em cobertura no sorgo, em relação aos outros níveis de adubação nitrogenada, somada ao maior conteúdo de água na planta de soja, verificados pelo menor potencial hídrico ( $\Psi_f$ ) e maior teor relativo de água na folha (TRA), estão associados com o conteúdo de água no solo, já que o SSD proporcionou maior disponibilidade de água às plantas (Figura 2 e 3). Este tratamento teve também maior desenvolvimento radicular em profundidade (Tabela 33 e 34), aumentando assim a área de solo explorada para absorção de água. Além disso, apresentou, principalmente na camada superficial do solo, maior índice de agregação (Tabela 16), macro e microporosidade (Tabela 22 e 24) e, na camada de 0,00 – 0,40 m, maior CAD (Tabela 23, 25 e 26), assim favorecendo o processo de infiltração de água no solo, retenção e armazenamento desta água no solo (SILVA et al., 2022a, 2022b).

Assim como em SSD, em SPC os melhores resultados de trocas gasosas também foram verificados com a dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> (Figura 11 e 12). No entanto, neste sistema de manejo as plantas apresentaram menor temperatura foliar (Figura 10), implicando em menor VPD<sub>L</sub>, assim apresentando maior  $g_s$ ,  $A$ , EC, EUA e menor  $C_i$  e  $E$  (Figura 11 e 12). Neste caso, a maior EUA está associada ao comportamento do aparato fotossintético, que apresentou maior taxa de assimilação líquida de CO<sub>2</sub> e menor taxa de transpiração (RAY; SINCLAIR, 1998; ROSA et al., 2021; WANG et al., 2018a). Este comportamento indica eficiente ajuste entre a taxa fotossintética e a transpiração, mantendo o equilíbrio entre a economia de água e produção de fotoassimilados (SANTANIELLO et al., 2017).

Os menores valores de  $C_i$  observados na dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N em SSD e SPC (Figura 11D e 12D), indicam que não houve prejuízo na taxa de transporte de elétrons (ETR) (MCDONALD; PAULSEN, 1997), como pode ser observado nos resultados deste trabalho (Figura 13 e 14).

Em relação a fluorescência da clorofila  $a$ , a menor eficiência fotoquímica máxima do fotossistemas II ( $F_v/F_m$ ) em SSD com 50 kg ha<sup>-1</sup> de N, comparado ao SPC na mesma dose (Figura 13 e 14), pode estar associado à maior temperatura da folha

e VPDL (Figura 10, 11 e 12), uma vez que o aumento da temperatura na planta pode causar dano estrutural no fotossistemas II (GARSTKA et al., 2007).

Com exceção da  $F_v/F_m$ , a dose de  $50 \text{ kg ha}^{-1}$ , nas duas safras, resultou em efeito semelhante na fluorescência da clorofila *a* nos dois sistemas de manejo do solo (Figura 13 e 14). Apesar da menor  $F_v/F_m$  em SSD, o rendimento quântico potencial do fotossistemas II ( $F_v'/F_m'$ ) em SSD e SPC foram superiores na dose de  $50 \text{ kg ha}^{-1}$ , apresentando também maior coeficiente de extinção fotoquímico ( $qP$ ) e ETR (Figura 13 e 14). Na safra 2021/22, o coeficiente de extinção não fotoquímico (NPQ) também foi superior nestes tratamentos, contudo, na safra 2019/20, os sistemas de manejo do solo nesta dose de N, apresentaram comportamento diferentes em relação NPQ, com maior valor em SSD (Figura 13).

Os maiores valores de  $F_v'/F_m'$ ,  $qP$  e ETR nestes tratamentos indicam adequado funcionamento do fotossistema II (PS II), o que pode ser atribuído aos maiores teores de pigmentos fotossintéticos, que estão diretamente relacionados a fotossíntese (CROFT et al., 2017; HOUBORG et al., 2015; PENG et al., 2011; RICHARDSON; DUGAN; BERLYN, 2002). Já o maior valor de NPQ em SSD com  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  é um indicativo do mecanismo de proteção nas folhas de soja à temperatura mais alta (JUMRANI; BHATIA; PANDEY, 2017), como pode ser verificado pela maior temperatura da folha (Figura 10). Apesar do SSD, na safra 2019/20, ter apresentado maior  $qP$ , os resultados de NPQ indicam maior dissipação de energia na forma de calor, pois se a energia absorvida pelo PSII não for usada para reação fotoquímica, a mesma precisa ser dissipada por outros meios, como o calor, para evitar danos ao PSII, prejudicando a produção de carboidratos e açúcares (CHEN, 2014). O aumento deste parâmetro nas plantas cultivadas em SSD com  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  de N é um indicativo que o aparato fotossintético absorveu energia luminosa em excesso, que desencadeou a ativação destes mecanismos de proteção (ASHRAF; HARRIS, 2013).

## **5.7 Metabolismo oxidativo e atividade enzimática antioxidativa das plantas de soja**

Os maiores teores de  $\text{H}_2\text{O}_2$  e MDA nas plantas de soja na presença de adubação nitrogenada aplicado em cobertura no sorgo (Figura 16, 17 e 18) podem estar associados ao comportamento do NPQ em SPC e SSD na dose de  $50 \text{ kg ha}^{-1}$ , uma vez que também apresentou maiores valores (Figura 13 e 14), podendo ser

verificados pela correlação positiva entre parâmetros fisiológicos e bioquímicos (Figura 32B).

O NPQ representa um mecanismo de prevenção à formação de espécies reativas de oxigênio (ERO) e permitem que o excesso de energia luminosa seja dissipado na forma de calor (DĄBROWSKI et al., 2016; GUIDI; LO PICCOLO; LANDI, 2019; HAZRATI et al., 2016). Quando a energia luminosa absorvida excede a quantidade utilizada pela fotossíntese, ocorre dissipação da energia excedente, para a proteção do aparato fotossintético contra danos devido à excitação excessiva dos centros de reação PSII (ROSA et al., 2021; RUBAN; JOHNSON; DUFFY, 2012; SANTANIELLO et al., 2017).

Este excesso de energia nos centros de reação do PSII das plantas aumenta a produção de ERO, que ocasionam danos oxidativos às membranas celulares, aumentando assim os teores de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e MDA (CAVERZAN; CASASSOLA; PATUSSI BRAMMER, 2016).

O H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> nas plantas em baixa concentração atua como um sinal molecular envolvendo uma sinalização de aclimatação acionando a tolerância a vários estresses bióticos e abióticos, porém em alta concentração, ele leva à morte programada da célula (BHATTACHARJEE, 2012).

A alta reatividade dessas moléculas reativas de oxigênio podem ocasionar sérias modificações bioquímicas nos componentes celulares, tais como a peroxidação de lipídios (MONTEIRO et al., 2011), que por sua vez, resulta na formação de vários aldeídos, dentre eles o MDA, que é um indicador da existência de estresse oxidativo (AHSAN et al., 2007; DEWIR et al., 2006).

Em resposta aos maiores teores de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e MDA, as plantas cultivadas com 50 kg ha<sup>-1</sup> de em SPC e SSD, apresentaram maior atividade da superóxido dismutase (SOD), peroxidase (POD) e catalase (CAT) (Figura 19), já que em condições estressantes, ocorre na planta, a ativação dos mecanismos de defesas antioxidativas enzimáticas, a fim de regular os níveis tóxicos de ERO (CAVERZAN et al., 2016; MULLINEAUX; BAKER, 2014).

Este mecanismo de defesa é formado por diversas enzimas, dentre elas a SOD, POD e CAT, que catalisam a degradação de ERO (GRATÃO et al., 2010; MILLER et al., 2010; MITTLER et al., 2002; MITTLER et al., 2004; YOU; CHAN, 2015).

A SOD atua na primeira linha de defesa de eliminação de ERO, por meio da dismutação do  $O_2^{\cdot-}$  em  $O_2$  e  $H_2O_2$ , assim, diminuindo o risco de formação de  $OH^{\cdot}$  no interior celular (GILL; TUTEJA, 2010).

A POD e CAT agem na eliminação das moléculas de  $H_2O_2$  (SHARMA et al., 2012). A POD atua na catalisação da oxidação do substrato, utilizando o poder oxidante do  $H_2O_2$  ou de peróxidos orgânicos. O substrato geralmente é um composto aromático (tirosina, compostos fenólicos, etc.), sendo que também podem atuar sobre compostos não aromáticos, como o ácido ascórbico (BALEN; KRSNIK-RASOL; SIMEON-RUDOLF, 2003). A CAT reduz o  $H_2O_2$  a 2 moléculas de  $H_2O$ , atuando nos peroxissomos e glioxissomos, mas também pode estar presente nas mitocôndrias (CAVERZAN; CASASSOLA; PATUSSI BRAMMER, 2016; MHAMDI; NOCTOR; BAKER, 2012).

Já os maiores teores de  $H_2O_2$  e MDA nas plantas de soja na dose de  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  (Figura 16D e 17) pode ser um indicativo que a adubação nitrogenada com  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  no sorgo proporcionou um ambiente de produção mais estressante. Já que nesta dose houve menor produção de fitomassa de sorgo (Tabela 4), menor desenvolvimento radicular (Tabela 5, 8 e 9), reduzindo a quantidade de fitomassa sobre o solo e o aporte nutriente no solo (Tabela 4). O menor desenvolvimento radicular pode ter promovido menor formação de bioporos e aporte de C orgânico, principalmente em SSD, reduzindo os parâmetros de porosidade do solo (Tabela 22, 23, 26 e 27), que por consequência, o desenvolvimento radicular da soja em sucessão (Tabela 29 e 30). Este comportamento também pode ser observado pela correlação entre os grupos de física solo e agregados com os parâmetros bioquímicos (Figura 32B).

Desta forma, é possível que a dose de  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  de N tenha promovido efeito de toxicidade nas plantas de sorgo, o que prejudicou a cultura da soja em sucessão, evidenciando estes efeitos nos parâmetros fisiológicos (Figura 4, 5, 6, 8, 9, 11, 13, 14 e 15) e bioquímicos (Figura 16, 17 e 19). E, assim, justificando também a correlação negativa entre fisiologia e desenvolvimento do sorgo (Figura 32B).

Em relação a maior atividade das enzimas em SPC (Figura 19), tal comportamento está associado ao armazenamento e disponibilidade de água no solo, pois este sistema de manejo apresentou, em todo perfil de solo avaliado (0,00 – 0,60 m), conteúdo de água acima da capacidade de campo (Figura 2 e 3). A umidade do solo acima da capacidade de campo ocasiona deficiência de  $O_2$ , restringindo a

respiração aeróbica das raízes (BAILEY-SERRES et al., 2012), levando ao estresse oxidativo (MUHAMMAD ARSLAN ASHRAF, 2012).

## 5.8 Componentes de produção e produtividade de grãos das plantas de soja

Apesar do SPC ter resultado em 7% a mais de plantas por metro (Figura 20), isso não se refletiu na produtividade, tendo em vista que este sistema produziu menos grãos em todos os níveis de N, comparado ao SSD (Figura 25). Tal comportamento, pode estar relacionado ao número de vagens por planta, já que foi maior em SSD, apesar de não ter apresentado diferença na presença de adubação nitrogenada aplicada em cobertura no sorgo (safra 2019/20), principalmente na dose 100 (safra 2021/22) (Figura 24). O maior número de vagens por planta pode ter atuado como fator de compensação, implicando em maior produtividade (KLIMEK-KOPYRA; ZAJA, C; RE, BILAS, 2013; RE, BILAS et al., 2020; SILVA et al., 2022a).

A menor população de plantas em SSD está associada ao maior valor de RP na camada superficial do solo (Tabela 23), que apesar de não ter influenciado no desenvolvimento das plantas de soja, pode ter afetado a emergência das plântulas, tendo em vista que resultados semelhantes a este já foram relatados em experimentos de longa duração (SILVA et al., 2022a, 2022b).

A menor produção de vagens por planta em SPC (Figura 24) está relacionada com a menor presença de palhada e estruturação do solo. Em SSD a cobertura do solo com fitomassa e a maior presença de bioporos e continuidade em profundidade, garante as plantas melhores condições de desenvolvimento (FERREIRA et al., 2021; GALDOS et al., 2019; PEIXOTO et al., 2020), e desta forma, refletindo na maior produção de vagens, principalmente em ambientes mais estressantes, como no caso, ausência de adubação nitrogenada no sistema de produção.

A maior produtividade de grãos de soja nas duas safras foram observadas em SSD com adubação nitrogenada e SPC com 50 kg ha<sup>-1</sup> de N aplicados em cobertura no sorgo (Figura 25), estando relacionada com a quantidade de fitomassa seca de sorgo no momento da semeadura da soja, fitomassa seca radicular do sorgo, aporte de N e K no sistema de produção, COT, COM, Ag>2mm, RP, fitomassa seca radicular da soja, Ci, ETR, POD e PMG (Figura 26, 27, 28, 29, 30 e 31).

A maior quantidade de fitomassa seca de sorgo na semeadura da soja (Tabela 4), garante maior umidade do solo, favorecendo o germinação das sementes e o

desenvolvimento das plantas (ZHANG et al., 2021). Além disso, a maior quantidade de palha no momento da semeadura da cultura pode ser um indicativo de maior cobertura do solo ao longo do desenvolvimento da planta (ROSOLEM et al., 2019), este comportamento pode ser verificado neste trabalho, uma vez que estes tratamentos também apresentaram maior quantidade de palha até a fase fenológica R5 da soja (Tabela 4), desta forma, contribuindo para maior produtividade em SSD com adubação nitrogenada e SPC com 50 kg ha<sup>-1</sup> de N.

O melhor desenvolvimento radicular contribui para formação de bioporos, principalmente em SSD (GALDOS et al., 2019; ZHANG; PENG, 2021), aporte de carbono orgânico (PAUSCH; KUZYAKOV, 2018) e permite maior exploração de volume de solo pela cultura, o que favorece a absorção de água e nutriente (WASAYA et al., 2018; WEN et al., 2019). Assim, a maior produção de fitomassa seca de raiz de sorgo em SSD com 100 kg ha<sup>-1</sup> e SPC com 50 kg ha<sup>-1</sup> (Tabela 5, 6 e 9), pode ter facilitado o desenvolvimento radicular da soja, por meio dos bioporos formados após a decomposição das raízes do sorgo, além de aumentar o aporte de C no solo e aumentar o volume de solo explorado, e, assim, resultando em maior produtividade. O aumento da produtividade da soja em função do melhor desenvolvimento do sorgo pode ser verificado também por meio da correlação positiva ente fator e o grupo de nitrogênio e carbono orgânico (Figura 32A), em que a principal variável foi fitomassa seca de raiz de sorgo, COT e COM (Figura 26B, 27A e 27B).

Apesar do SSD com 50 kg ha<sup>-1</sup> ter associado à menor produção de raiz de sorgo com maior produtividade da soja (Figura 29B), houve maior ciclagem de N e K neste sistema (Figura 29C e 29D). Além deste fato, este tratamento apresentou maior desenvolvimento radicular da soja, refletindo em maior produtividade de grãos (Figura 31A e 31B), o que provavelmente favoreceu a absorção de água e nutrientes, permitindo melhor desenvolvimento das plantas e, conseqüentemente, aumentando a produtividade.

A maior produtividade da soja em SSD com adubação nitrogenada na cultura do sorgo e o SPC com 50 kg ha<sup>-1</sup> de N também pode ser explicada pelos maiores teores de COT e COM (Figura 30A e 30B), em que também apresentaram correlação significativa entre produtividade e nitrogênio e carbono orgânico (Figura 32). O maior aporte de carbono no solo favorece a agregação, que por sua vez beneficia as características de porosidade do solo (COOPER et al., 2021; SILVA et al., 2022c). Esta associação reflete na produtividade das culturas, como pode ser observado neste

trabalho em SSD com adubação nitrogenada (Figura 30) e também pelas correlações significativas entre o grupo de agregados com nitrogênio e carbono orgânico, física do solo e produtividade (Figura 32). Contudo, como em SPC há o revolvimento constante do solo, acaba por gerar a quebra dos torrões e agregados, devido a pulverização do solo, e, por isso, o maior aporte de C não resultou em maior agregação, em especial  $Ag > 2$  mm, porém a maior produtividade associou-se com menor porcentagem de  $Ag > 2$  mm em SPC com  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  (Figura 30C e 30D). Isso aconteceu porque apesar do SPC prejudicar a agregação do solo na camada arável, o mesmo proporciona condições satisfatórias ao desenvolvimento das plantas, porém, este efeito é temporário, normalmente, não superior a um ano (CALONEGO et al., 2017; GUEDES FILHO et al., 2013; MORAES et al., 2014).

Na componente física do solo, a variável de maior expressão foi a RP (loading de -0,99) (Figura 27E e 27F), e apresentou correlação significativa com a produtividade (-0,69 em 2019/20 e -0,74 em 2021/22) (Figura 32). A associação da física do solo com a maior produtividade em SSD, com adubação nitrogenada, evidenciou que os altos valores de RP não prejudicaram a produção de grãos de soja (Figura 30E e 30F). Pesquisas têm demonstrado que os valores críticos de RP em SSD são maiores do que os encontrados em SPC, principalmente quando se trata de sistema de manejo de longa duração (CALONEGO et al., 2017; MORAES et al., 2014; SILVA et al., 2022a), este comportamento está associado principalmente ao aporte de matéria orgânica e continuidade dos bioporos (COOPER et al., 2021; GALDOS et al., 2019). Já a associação do grupo física do solo com maior produtividade em SPC com  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  (Figura 30E e 30F), se deve aos menores valores de RP neste tratamento, principalmente nas camadas superficiais do solo (Tabela 23, 25 e 26).

As variáveis dos parâmetros fisiológicos que mais afetaram a produtividade da soja foram  $C_i$  (loading de -0,68 em 2019/20 e -0,88 em 2021/22) e ETR (loading de 0,71 em 2019/20 e 0,44 em 2021/22) (Figura 28C e 28D). A menor concentração interna de  $\text{CO}_2$  na folha demonstra o adequado funcionamento da enzima Rubisco e, conseqüentemente, menor dano ao aparato fotossintético (ZHANG; PORTIS, 1999). E, a maior taxa de transporte de elétrons indicam maior produção de  $\text{NAPH}_2$  e ATP, produtos do transporte de elétrons que foram utilizados no ciclo de Calvin, para a produção de fotoassimilados. Deste modo, maiores valores de ETR sugerem melhor atividade fotossintética (YEOM et al., 2014), podendo resultar no aumento da

produtividade, como verificado pela associação em SSD com adubação nitrogenada e em SPC com 50 kg ha<sup>-1</sup> (Figura 31E e 31F).

Em relação aos parâmetros bioquímicos, a POD foi a principal enzima a interferir na produtividade (Figura 28E e 28F). O SSD com 50 kg ha<sup>-1</sup>, nas duas safras, apresentou maior atividade da POD, porém com maior produtividade (Figura 31E), isso pode estar associado a atividade da SOD, já que na safra 2019/20, esta enzima também teve influência na produtividade da soja (Figura 28E). A SOD é a primeira enzima da linha de defesa da planta, agindo na dismutação O<sub>2</sub><sup>•-</sup> em O<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, e a POD atua na eliminação do H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (BALEN; KRSNIK-RASOL; SIMEON-RUDOLF, 2003; GILL; TUTEJA, 2010), desta forma é provável que a POD estava atuando na eliminação do peróxido de hidrogênio, gerado pela atividade da SOD. Sendo assim, notou-se que os maiores valores de atividade da POD, principalmente em SSD com adubação nitrogenada no cultivo do sorgo, não foi limitante a produtividade da soja, uma vez que estes tratamentos junto ao SPC com 100 kg ha<sup>-1</sup> apresentaram maior produtividade de grãos (Figura 31E e 31F).

Contudo, os parâmetros bioquímicos, na safra 2021/22, apresentaram correlação significativa com a produtividade (-0,54) (Figura 32B), neste caso, é provável que a melhor qualidade física do solo e desenvolvimento do sorgo tenham sido fatores fundamentais para minimizar este estresse, para que não houvesse prejuízo na produção de grãos de soja, já que houve correlação significativa da física do solo e desenvolvimento do sorgo com os parâmetros bioquímicos (Figura 32B).

Dentro do grupo de componentes de produção, o PMG associou-se diretamente com a maior produtividade dos tratamentos, apesar de não ter diferido pela estatística univariada (Figura 22E e 23E). O maior peso dos grãos de soja pode resultar em maior produtividade da lavoura, podendo ainda até ser um fator de compensação caso haja menor população, número de vagens por grãos e número de vagens por planta (KLIMEK-KOPYRA; ZAJA<sub>3</sub>C; RE<sub>3</sub>BILAS, 2013; RE<sub>3</sub>BILAS et al., 2020). Esta variável também já se associou com a maior produtividade de grãos em outras pesquisas envolvendo sistemas de manejo de longa duração (SILVA et al., 2022a, 2022b), sendo assim, práticas de manejo que proporcionem maior peso dos grãos pode ser uma importante alternativa para o aumento da produtividade da soja.

Neste sentido, os resultados desta pesquisa indicam que sistemas de produção com adubação nitrogenada no sorgo na safra de outono-inverno, aumenta a

produtividade da soja cultivada no verão em SSD e SPC, com melhor desempenho com a dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N aplicada em cobertura no sorgo biomassa.

## 6 CONCLUSÕES

A produtividade da soja está associada a ciclagem de nutrientes pela palhada em cobertura, aos teores de nitrogênio total e frações de carbono orgânico no solo, a agregação do solo, as propriedades físicas, desenvolvimento radicular, parâmetros fisiológicos, bioquímicos e aos componentes de produção da soja. Sendo estes fatores afetados pela produção de fitomassa da cultura de entressafra.

A adubação nitrogenada no sorgo em sistema de semeadura direta e a dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N em preparo convencional do solo aumenta a produção de fitomassa aérea e radicular e a ciclagem de nutrientes pela palhada de sorgo, contribuindo no aumento de aporte de carbono orgânico no solo, agregação das partículas e melhorando as propriedades físico-hídricas, o que coopera para o funcionamento adequado do aparato fotossintético da soja, que, mesmo com maior atividade das enzimas de estresse, apresenta maiores valores de componentes de produção e produtividade de grãos da soja.

A adubação nitrogenada na dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> em sistema de produção com sorgo e soja melhora as propriedades do solo e favorece o desenvolvimento destas culturas em sistema de semeadura direta e preparo convencional, resultando em maior produtividade da soja.

O sistema de semeadura direta oferece às plantas maior estabilidade hídrica e proporciona melhor produtividade da soja.

A avaliação conjunta das variáveis que afetam a produtividade da soja fornece dados mais consistentes, uma vez que esses fatores geralmente estão correlacionados. A avaliação isolada das variáveis pode ser insuficiente para detectar os fatores limitantes da produtividade, principalmente quando se comparam diferentes sistemas de manejo do solo.

## REFERÊNCIAS

- AHSAN, N.; LEE, D. G.; LEE, S. H.; LEE, K. W.; BAHK, J. D.; LEE, B. H. A proteomic screen and identification of waterlogging-regulated proteins in tomato roots. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 295, n. 1–2, p. 37–51, 2007.
- AKHTAR, K.; WANG, W.; KHAN, A.; REN, G.; AFRIDI, M. Z.; FENG, Y.; YANG, G. Wheat straw mulching offset soil moisture deficient for improving physiological and growth performance of summer sown soybean. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 211, p. 16–25, 2019.
- ALEXIEVA, V.; SERGIEV, I.; MAPELLI, S.; KARANOV, E. The effect of drought and ultraviolet radiation on growth and stress markers in pea and wheat. **Plant, Cell & Environment**, Chichester, v. 24, n. 12, p. 1337–1344, 2001.
- ALLIPRANDINI, L. F.; ABATTI, C.; BERTAGNOLLI, P. F.; CAVASSIM, J. E.; GABE, H. L.; KUREK, A.; MATSUMOTO, M. N.; DE OLIVEIRA, M. A. R.; PITOL, C.; PRADO, L. C.; STECKLING, C. Understanding Soybean Maturity Groups in Brazil: Environment, Cultivar Classification, and Stability. **Crop Science**, Hoboken, v. 49, n. 3, p. 801–808, 2009.
- ALVARENGA, R. C.; CABEZAS, W. A. L.; CRUZ, J. C.; SANTANA, D. P. Plantas de cobertura de solo para sistema plantio direto. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 22, n. 208, p. 25–36, 2001.
- ANDERSON, R.; BRYE, K. R.; WOOD, L. S. Soil Aggregate Stability as Affected by Landuse and Soil Properties in the Lower Mississippi River Valley. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 83, n. 5, p. 1512–1524, 2019.
- ARAÚJO, M. L. S.; SANO, E. E.; BOLFE, É. L.; SANTOS, J. R. N.; DOS SANTOS, J. S.; SILVA, F. B. Spatiotemporal dynamics of soybean crop in the Matopiba region, Brazil (1990–2015). **Land Use Policy**, Oxford, v. 80, p. 57–67, 2019.
- ASHRAF, M.; HARRIS, P. J. C. Photosynthesis under stressful environments: An overview. **Photosynthetica**, Prague, v. 51, n. 2, p. 163–190, 2013.
- ASSUNÇÃO, S. A.; PEREIRA, M. G.; ROSSET, J. S.; BERBARA, R. L. L.; GARCÍA, A. C. Carbon input and the structural quality of soil organic matter as a function of agricultural management in a tropical climate region of Brazil. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 658, p. 901–911, 2019.
- BAILEY-SERRES, J.; FUKAO, T.; GIBBS, D. J.; HOLDSWORTH, M. J.; LEE, S. C.; LICAUSI, F.; PERATA, P.; VOESENEK, L. A. C. J.; VAN DONGEN, J. T. Making sense of low oxygen sensing. **Trends in Plant Science**, Cambridge, v. 17, n. 3, p. 129–138, 2012.
- BAKER, N. R. Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v. 59, n. 1, p. 89–113, 2008.

BALBINOT JUNIOR, A. A.; VEIGA, M.; MORAES, A.; PELISSARI, A.; MAFRA, Á. L.; PICCOLLA, C. D. Winter pasture and cover crops and their effects on soil and summer grain crops. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1357–1363, 2011.

BALEN, B.; KRSNIK-RASOL, M.; SIMEON-RUDOLF, V. Isoenzymes of peroxidase and esterase related to morphogenesis in *Mammillaria gracillis* Pfeiff. tissue culture. **Journal of Plant Physiology**, Muenchen, v. 160, n. 11, p. 1401–1406, 2003.

BALESDENT, J.; WAGNER, G. H.; MARIOTTI, A. Soil Organic Matter Turnover in Long- term Field Experiments as Revealed by Carbon- 13 Natural Abundance. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 52, n. 1, p. 118–124, 1988.

BARBOSA, J. C.; MALDONADO JÚNIOR, W. **AgroEstat: Sistema para análises estatísticas de ensaios agronômicos**. Jaboticabal: FCAV/Funep, p. 396, 2015.

BATTIE-LACLAU, P.; LACLAU, J.-P.; BERI, C.; MIETTON, L.; MUNIZ, M. R. A.; ARENQUE, B. C.; CASSIA PICCOLO, M.; JORDAN-MEILLE, L.; BOUILLET, J.-P.; NOUVELLON, Y. Photosynthetic and anatomical responses of *Eucalyptus grandis* leaves to potassium and sodium supply in a field experiment. **Plant, Cell & Environment**, Chichester, v. 37, n. 1, p. 70–81, 2014.

BENNIE, A. T. Growth and mechanical impedance. In: WAISEL, Y.; ESHEL, A.; KAFKAFI, U. (Eds.). **Plants roots: the hidden half**. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 1996. p. 453–470.

BHATTACHARJEE, S. The language of reactive oxygen species signaling in plants. **Journal of Botany**, New York, v. 2012, p. 1–22, 2012.

BISWAL, B.; RAVAL, M.; UC, B.; JOSHI, P. Response of photosynthetic organelles to abiotic stress. Modulation by sulfur metabolism. In: KHAN, N. A.; SINGH, S.; UMAR, S. (Eds.). **Sulfur assimilation and abiotic stress in plants**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. p. 167–191.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk Density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2. ed. Madison: America Society of Agronomy, 1986. p. 363–375.

BLANCO-CANQUI, H.; RUIS, S. J. No-tillage and soil physical environment. **Geoderma**, Amsterdam, v. 326, p. 164–200, 2018a.

BLANCO-CANQUI, H.; WORTMANN, C. S. Does occasional tillage undo the ecosystem services gained with no-till? A review. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 198, p. 104534, 2020.

BLANCO-CANQUI, H.; SHAVER, T. M.; LINDQUIST, J. L.; SHAPIRO, C. A.; ELMORE, R. W.; FRANCIS, C. A.; HERGERT, G. W. Cover Crops and Ecosystem Services: Insights from Studies in Temperate Soils. **Agronomy Journal**, Madison, v. 107, n. 6, p. 2449–2474, 2015. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2134/agronj15.0086>>

BLOOMFIELD, K. J.; FARQUHAR, G. D.; LLOYD, J. Photosynthesis–nitrogen relationships in tropical forest tree species as affected by soil phosphorus availability: a controlled environment study. **Functional Plant Biology**, Melbourne, v. 41, n. 8, p. 820, 2014.

BODDEY, R. M.; JANTALIA, C. P.; CONCEIÇÃO, P. C.; ZANATTA, J. A.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; DIECKOW, J.; DOS SANTOS, H. P.; DENARDIN, J. E.; AITA, C.; GIACOMINI, S. J.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S. Carbon accumulation at depth in Ferralsols under zero-till subtropical agriculture. **Global Change Biology**, Chichester, v. 16, n. 2, p. 784–795, 2010.

BOGUNOVIC, I.; PEREIRA, P.; KISIC, I.; SAJKO, K.; SRAKA, M. Tillage management impacts on soil compaction, erosion and crop yield in Stagnosols (Croatia). **CATENA**, Amsterdam, v. 160, p. 376–384, 2018.

BORÉM, A.; PIMENTEL, L.; PARRELLA, R. **Sorgo do plantio a colheita**. Viçosa: UFV, 2014, 275 p.

BORGHI, E.; BORTOLON, L.; AVANZI, J. C.; BORTOLON, E. S. O.; UMMUS, M. E.; GONTIJO NETO, M. M.; COSTA, R. V. Desafios das novas fronteiras agrícolas de produção de milho e sorgo no Brasil: desafios da região do MATOPIBA. In: KARAM, D.; MAGALHÃES, P. C. (Eds.). **Eficiência nas cadeias produtivas e o abastecimento global**. Sete Lagoas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2014. p. 263–278.

BORGHI, E.; SILVA, G. F.; CALONEGO, J. C.; PARRELLA, R. A. da C.; ANTONIO, M. S. **Sorgo biomassa BRS 716 para produção de forragem e palha em sistema de plantio direto e preparo convencional com soja**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2020, 25 p.

BRAIDA, J. A.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M. Matéria orgânica e seu efeito na física no solo. In: KLAUBERG FILHO, O.; MAFRA, A. L.; GATIBONI, L. C. (Eds.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa - MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2011. p. 221–278.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Regras para análise de sementes**. Brasília, DF: SNAD/DNDV/CLAV, 2009, 398p.

BUCZEK, J.; BOBRECKA-JAMRO, D.; JAŃCZAK-PIENIAŻEK, M. Photosynthesis, Yield and Quality of Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) under Different Soil-Tillage Systems. **Sustainability**, Basel, v. 14, n. 9, p. 4903, 2022.

BUYANOVSKY, G. A.; ASLAM, M.; WAGNER, G. H. Carbon Turnover in Soil Physical Fractions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 4, p. 1167–1173, 1994.

CALLESEN, I.; HARRISON, R.; STUPAK, I.; HATTEN, J.; RAULUND-RASMUSSEN, K.; BOYLE, J.; CLARKE, N.; ZABOWSKI, D. Carbon storage and nutrient mobilization from soil minerals by deep roots and rhizospheres. **Forest Ecology and**

**Management**, Amsterdam, v. 359, p. 322–331, 2016.

CALONEGO, J. C.; RAPHAEL, J. P. A.; RIGON, J. P. G.; OLIVEIRA NETO, L.; ROSOLEM, C. A. Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 85, p. 31–37, 2017.

CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Soybean root growth and yield in rotation with cover crops under chiseling and no-till. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 33, n. 3, p. 242–249, 2010.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 3, p. 777–783, 1992.

CAMPBELL, C. D.; SAGE, R. F. Interactions between the effects of atmospheric CO<sub>2</sub> content and P nutrition on photosynthesis in white lupin (*Lupinus albus* L.). **Plant, Cell and Environment**, Chichester, v. 29, n. 5, p. 844–853, 2006.

CARVALHO, W. P. De; CARVALHO, G. J. De; ABBADE NETO, D. de O.; TEIXEIRA, L. G. V. Desempenho agrônômico de plantas de cobertura usadas na proteção do solo no período de pousio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 48, n. 2, p. 157–166, 2013.

CASTELLINI, M.; FORNARO, F.; GAROFALO, P.; GIGLIO, L.; RINALDI, M.; VENTRELLA, D.; VITTI, C.; VONELLA, A. Effects of no-tillage and conventional tillage on physical and hydraulic properties of fine textured soils under winter wheat. **Water**, Basel, v. 11, n. 3, p. 484, 2019.

CASTRO FILHO, C.; LOURENÇO, A.; DE F. GUIMARÃES, M.; FONSECA, I. C. B. Aggregate stability under different soil management systems in a red latosol in the state of Parana, Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 65, n. 1, p. 45–51, 2002.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num latossolo roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 3, p. 527–538, 1998.

CASTRO, G. S. A.; CRUSCIOL, C. A. C.; ROSOLEM, C. A.; CALONEGO, J. C.; BRYE, K. R. Surface lime and silicate application and crop production system effects on physical characteristics of a Brazilian Oxisol. **Soil Research**, Melbourne, v. 55, n. 8, p. 778, 2017.

CAVERZAN, A.; CASASSOLA, A.; PATUSSI BRAMMER, S. Reactive oxygen species and antioxidant enzymes involved in plant tolerance to stress. In: **Abiotic and biotic stress in plants - recent advances and future perspectives**. London: InTech, 2016.

CAXITO, A. M. **Desempenho agrônômico e qualidade nutricional de silagens de sorgo biomassa, sacarino e forrageiro em região semiárida**. 2017. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal no Semiárido) – Universidade Estadual de Montes Claros, Janaúba, 2017.

CERDÀ, A.; RODRIGO-COMINO, J.; YAKUPOĞLU, T.; DINDAROĞLU, T.; TEROL, E.; MORA-NAVARRO, G.; ARABAMERI, A.; RADZIEMSKA, M.; NOVARA, A.; KAVIAN, A.; VAVERKOVÁ, M. D.; ABD-ELMABOD, S. K.; HAMMAD, H. M.; DALIAKOPOULOS, I. N. Tillage versus no-tillage. soil properties and hydrology in an organic persimmon farm in eastern iberian peninsula. **Water**, Basel, v. 12, n. 6, p. 1539, 2020.

CHALISE, K. S.; SINGH, S.; WEGNER, B. R.; KUMAR, S.; PÉREZ-GUTIÉRREZ, J. D.; OSBORNE, S. L.; NLEYA, T.; GUZMAN, J.; ROHILA, J. S. Cover crops and returning residue impact on soil organic carbon, bulk density, penetration resistance, water retention, infiltration, and soybean yield. **Agronomy Journal**, Madison, v. 111, n. 1, p. 99–108, 2019.

CHEN, H.; LIU, Y.; LÜ, L.; YUAN, L.; JIA, J.; CHEN, X.; MA, J.; ZHAO, J.; LIANG, C.; XIE, H.; HE, H.; ZHANG, X.; LU, C.; CHI, G. Effects of no-tillage and stover mulching on the transformation and utilization of chemical fertilizer N in Northeast China. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 213, p. 105131, 2021.

CHEN, J.; LIU, L.; WANG, Z.; ZHANG, Y.; SUN, H.; SONG, S.; BAI, Z.; LU, Z.; LI, C. Nitrogen fertilization increases root growth and coordinates the root–shoot relationship in cotton. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 11, 2020.

CHEN, M. Chlorophyll modifications and their spectral extension in oxygenic photosynthesis. **Annual Review of Biochemistry**, Palo Alto, v. 83, n. 1, p. 317–340, 2014.

CHUNG, G.; SINGH, R. J. Broadening the Genetic Base of Soybean: A Multidisciplinary Approach. **Critical Reviews in Plant Sciences**, New York, v. 27, n. 5, p. 295–341, 2008.

CHUNG, H.; GROVE, J. H.; SIX, J. Indications for Soil Carbon Saturation in a Temperate Agroecosystem. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 72, n. 4, p. 1132–1139, 2008.

COLOMBI, T.; BRAUN, S.; KELLER, T.; WALTER, A. Artificial macropores attract crop roots and enhance plant productivity on compacted soils. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 574, p. 1283–1293, 2017.

COLOMBI, T.; KELLER, T. Developing strategies to recover crop productivity after soil compaction—A plant eco-physiological perspective. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 191, p. 156–161, 2019.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: safra 2022/23 - segundo levantamento**. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento, 2022. Disponível em:

<<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>>. Acesso em: 08 dez. 2020.

CONROY, J. P.; SMILLIE, R. M.; KÜPPERS, M.; BEVEGE, D. I.; BARLOW, E. W. Chlorophyll a fluorescence and photosynthetic and growth responses of pinus radiata to phosphorus deficiency, drought stress, and high CO<sub>2</sub>. **Plant Physiology**, Rockville, v. 81, n. 2, p. 423–429, 1986.

COOPER, H. V.; SJÖGERSTEN, S.; LARK, R. M.; GIRKIN, N. T.; VANE, C. H.; CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C.; MOONEY, S. J. Long-term zero-tillage enhances the protection of soil carbon in tropical agriculture. **European Journal of Soil Science**, Chichester, v. 72, n. 6, p. 2477–2492, 2021.

CORDEIRO, C. F. dos S.; RODRIGUES, D. R.; SILVA, G. F. Da; ECHER, F. R.; CALONEGO, J. C. Soil organic carbon stock is improved by cover crops in a tropical sandy soil. **Agronomy Journal**, Madison, v. 114, n. 2, p. 1546–1556, 2022.

COSTA, F. de S.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, J. A.; FONTOURA, S. M. V. Aumento de matéria orgânica num latossolo bruno em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 2, p. 587–589, 2004.

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C. A. C.; PARIZ, C. M.; BOSSOLANI, J. W.; PASCOALOTO, I. M.; DA ROCHA LIMA, C. G.; DOS SANTOS BATISTA BONINI, C.; DE CASTILHOS, A. M.; CALONEGO, J. C. Soybean yield and nutrition after tropical forage grasses. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 121, n. 1, p. 31–49, 2021.

CROFT, H.; CHEN, J. M.; LUO, X.; BARTLETT, P.; CHEN, B.; STAEBLER, R. M. Leaf chlorophyll content as a proxy for leaf photosynthetic capacity. **Global Change Biology**, Chichester, v. 23, n. 9, p. 3513–3524, 2017.

CROUS, K. Y.; O'SULLIVAN, O. S.; ZARAGOZA-CASTELLS, J.; BLOOMFIELD, K. J.; NEGRINI, A. C. A.; MEIR, P.; TURNBULL, M. H.; GRIFFIN, K. L.; ATKIN, O. K. Nitrogen and phosphorus availabilities interact to modulate leaf trait scaling relationships across six plant functional types in a controlled-environment study. **New Phytologist**, Chichester, v. 215, n. 3, p. 992–1008, 2017.

CRUSCIOL, C. A. C.; MATEUS, G. P.; MOMESSO, L.; PARIZ, C. M.; CASTILHOS, A. M.; CALONEGO, J. C.; BORGHI, E.; COSTA, C.; FRANZLUEBBERS, A. J.; CANTARELLA, H. Nitrogen-fertilized systems of maize intercropped with tropical grasses for enhanced yields and estimated land use and meat production. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, Lausanne, v. 4, 2020.

CRUSCIOL, C. A. C.; NASCENTE, A. S.; BORGHI, E.; SORATTO, R. P.; MARTINS, P. O. Improving soil fertility and crop yield in a tropical region with palisadegrass cover crops. **Agronomy Journal**, Madison, v. 107, n. 6, p. 2271–2280, 2015.

DĄBROWSKI, P.; BACZEWSKA, A. H.; PAWLUŚKIEWICZ, B.; PAUNOV, M.; ALEXANTROV, V.; GOLTSEV, V.; KALAJI, M. H. Prompt chlorophyll a fluorescence as a rapid tool for diagnostic changes in PSII structure inhibited by salt stress in Perennial ryegrass. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**,

Amsterdam, v. 157, p. 22–31, 2016.

DEISS, L.; KLEINA, G. B.; MORAES, A.; FRANZLUEBBERS, A. J.; MOTTA, A. C. V.; DIECKOW, J.; SANDINI, I. E.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F. Soil chemical properties under no-tillage as affected by agricultural trophic complexity. **European Journal of Soil Science**, Chichester, v. 71, n. 6, p. 1090-1105, 2019.

DEL LONGO, O. T.; GONZÁLEZ, C. A.; PASTORI, G. M.; TRIPPI, V. S. Antioxidant defences under hyperoxygenic and hyperosmotic conditions in leaves of two lines of maize with differential sensitivity to drought. **Plant and Cell Physiology**, Oxford, v. 34, n. 7, p. 1023–1028, 1993.

DEUSCHLE, D.; MINELLA, J. P. G.; HÖRBE, T. de A. N.; LONDERO, A. L.; SCHNEIDER, F. J. A. Erosion and hydrological response in no-tillage subjected to crop rotation intensification in southern Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 340, p. 157–163, 2019.

DEWIR, Y. H.; CHAKRABARTY, D.; ALI, M. B.; HAHN, E. J.; PAEK, K. Y. Lipid peroxidation and antioxidant enzyme activities of *Euphorbia millii* hyperhydric shoots. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 58, n. 1–3, p. 93–99, 2006.

DICKEY, E. C.; SIEMENS, J. C.; JASA, P. J.; HOFMAN, V. L.; SHELTON, D. P. Tillage system definitions. In: DICKEY, E. C.; SIEMENS, J. C.; JASA, P. J.; HOFMAN, V. L.; SHELTON, D. P. (Eds.). **Conservation tillage systems and management: crop residue management with no-till, ridge-till, mulch-till**. Ames: Midwest Plan Service, 1992. p. 5–7.

DING, J.; HU, W.; WU, J.; YANG, Y.; FENG, H. Simulating the effects of conventional versus conservation tillage on soil water, nitrogen dynamics, and yield of winter wheat with RZWQM2. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 230, p. 105956, 2020.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed., re ed. Brasília - DF: Embrapa, 2018. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/199517/1/SiBCS-2018-ISBN-9788570358004.pdf>. Acesso em: 05 dez. 2022.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1085209>. Acesso em: 05 dez. 2022.

ESCOBEDO, J. F.; GOMES, E. N.; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J. Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil. **Applied Energy**, Oxford, v. 86, n. 3, p. 299–309, 2009.

ESTEBAN, D. A. A.; SOUZA, Z. M.; TORMENA, C. A.; LOVERA, L. H.; SOUZA

LIMA, E.; OLIVEIRA, I. N.; RIBEIRO, N. P. Soil compaction, root system and productivity of sugarcane under different row spacing and controlled traffic at harvest. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 187, p. 60–71, 2019.

EVANS, J. R. Nitrogen and Photosynthesis in the Flag Leaf of Wheat (*Triticum aestivum* L.). **Plant Physiology**, Rockville, v. 72, n. 2, p. 297–302, 1983.

FAROOQ, M.; GOGOI, N.; BARTHAKUR, S; BAROOWA, B.; BHARADWAJ, N.; ALGHAMDI, S.S.; SIDDIQUE, K.H.M. Drought stress in grain legumes during reproduction and grain filling. **Journal of Agronomy and Crop Science**, Berlin, v. 203, n. 2, p. 81-102, 2016.

FARIAS, G. D.; DUBEUX, J. C. B.; SAVIAN, J. V.; DUARTE, L. P.; MARTINS, A. P.; TIECHER, T.; ALVES, L. A.; DE FACCIO CARVALHO, P. C.; BREMM, C. Integrated crop-livestock system with system fertilization approach improves food production and resource-use efficiency in agricultural lands. **Agronomy for Sustainable Development**, Paris, v. 40, n. 6, p. 39, 2020.

FEBRAPDP, F. B. do S. P. D. **Evolução Área sob Plantio Direto no Brasil**. 2021. Disponível em: <<https://febrapdp.org.br/download/14588evolucao-pd-no-bbasil-2021-jpg.jpg>>. Acesso em: 5 dez. 2022.

FERNANDES, M. M. H.; DA SILVA, M. F.; FERRAUDO, A. S.; FERNANDES, C. Soil structure under tillage systems with and without cultivation in the off-season. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 342, p. 108237, 2023.

FERREIRA, C. J. B.; TORMENA, C. A.; SEVERIANO, E. D. C.; ZOTARELLI, L.; BETIOLI JÚNIOR, E. Soil compaction influences soil physical quality and soybean yield under long-term no-tillage. **Archives of Agronomy and Soil Science**, Abingdon, v. 67, n. 3, p. 383–396, 2021.

FIORINI, A.; BOSELLI, R.; AMADUCCI, S.; TABAGLIO, V. Effects of no-till on root architecture and root-soil interactions in a three-year crop rotation. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 99, p. 156–166, 2018.

FONTAINE, S.; BAROT, S.; BARRÉ, P.; BDIQUI, N.; MARY, B.; RUMPEL, C. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. **Nature**, London, v. 450, n. 7167, p. 277–280, 2007.

FOSTER, K.; LAMBERS, H.; REAL, D.; RAMANKUTTY, P.; CAWTHRAY G. R.; RYAN, M. H. Drought resistance and recovery in mature *Bituminaria bituminosa* var. *albomarginata*. **Annals of Applied Biology**, Chichester, v. 166, p. 154-169, 2015.

FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; TONON, B. C.; FARIAS, J. R. B.; OLIVEIRA, M. C. N.; TORRES, E. Evolution of crop yields in different tillage and cropping systems over two decades in southern Brazil. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 137, p. 178–185, 2012.

FRANZLUEBBERS, A. . Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 66, n. 2, p. 95–106, 2002.

GALDOS, M. V.; PIRES, L. F.; COOPER, H. V.; CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A.; MOONEY, S. J. Assessing the long-term effects of zero-tillage on the macroporosity of Brazilian soils using X-ray Computed Tomography. **Geoderma**, Amsterdam, v. 337, p. 1126–1135, 2019.

GARSTKA, M.; VENEMA, J. H.; RUMAK, I.; GIECZEWSKA, K.; ROSIAK, M.; KOZIOL-LIPINSKA, J.; KIERDASZUK, B.; VREDENBERG, W. J.; MOSTOWSKA, A. Contrasting effect of dark-chilling on chloroplast structure and arrangement of chlorophyll–protein complexes in pea and tomato: plants with a different susceptibility to non-freezing temperature. **Planta**, Heidelberg, v. 226, n. 5, p. 1165–1181, 2007.

GE, S.; ZHU, Z.; JIANG, Y. Long-term impact of fertilization on soil pH and fertility in an apple production system. **Journal of soil science and plant nutrition**, Heidelberg, v. 18, n. 1, p. 282-293, 2018.

GHIDEY, F.; ALBERTS, E. E. Plant root effects on soil erodibility, splash detachment, soil strength, and aggregate stability. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v. 40, n. 1, p. 129–135, 1997.

GIANNOPOLITIS, C. N.; RIES, S. K. Superoxide Dismutases. **Plant Physiology**, Rockville, v. 59, n. 2, p. 309–314, 1977.

GILL, S. S.; TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, Issy les Moulineaux Cedex, v. 48, n. 12, p. 909–930, 2010.

GRATÃO, P. L.; MONTEIRO, C. C.; CARVALHO, R. F.; TEZOTTO, T.; PIOTTO, F. A.; GREENE, D. W. The development and use of plant bioregulators in tree fruit production. **Acta Horticulturae**, Leuven, v. 884, p. 31-40, 2010.

GUEDES FILHO, O.; DA SILVA, A. P.; GIAROLA, N. F. B.; TORMENA, C. A. Structural properties of the soil seedbed submitted to mechanical and biological chiseling under no-tillage. **Geoderma**, Amsterdam, v. 204–205, p. 94–101, 2013.

GUHRA, T.; STOLZE, K.; TOTSCHKE, K. U. Pathways of biogenically excreted organic matter into soil aggregates. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 164, p. 108483, 2022.

GUIDI, L.; LO PICCOLO, E.; LANDI, M. Chlorophyll Fluorescence, Photoinhibition and Abiotic Stress: Does it Make Any Difference the Fact to Be a C3 or C4 Species? **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 10, 2019.

GUIMARÃES JÚNNYOR, W. da S.; DISERENS, E.; DE MARIA, I. C.; ARAUJO-JUNIOR, C. F.; FARHATE, C. V. V.; DE SOUZA, Z. M. Prediction of soil stresses and compaction due to agricultural machines in sugarcane cultivation systems with and without crop rotation. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 681, p. 424–434, 2019.

HABIBI, G. Physiological, photochemical and ionic responses of sunflower seedlings

to exogenous selenium supply under salt stress. **Acta Physiologiae Plantarum**, Heidelberg, v. 39, n. 10, p. 213, 2017.

HAIR JR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise multivariada de dados**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009, 688 p.

HARTMANN, M.; SIX, J. Soil structure and microbiome functions in agroecosystems. **Nature Reviews Earth & Environment**, London, 2022.

HARUNA, S. I.; ANDERSON, S. H.; NKONGOLO, N. V.; ZAIBON, S. Soil Hydraulic Properties: Influence of Tillage and Cover Crops. **Pedosphere**, Beijing, v. 28, n. 3, p. 430–442, 2018.

HASANUZZAMAN, M.; NAHAR, K.; GILL, S. S.; FUJITA, M. Drought Stress Responses in Plants, Oxidative Stress, and Antioxidant Defense. In: **Climate Change and Plant Abiotic Stress Tolerance**. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013. p. 209–250.

HAZRATI, S.; TAHMASEBI-SARVESTANI, Z.; MODARRES-SANAVY, S. A. M.; MOKHTASSI-BIDGOLI, A.; NICOLA, S. Effects of water stress and light intensity on chlorophyll fluorescence parameters and pigments of Aloe vera L. **Plant Physiology and Biochemistry**, Issy les Moulineaux Cedex, v. 106, p. 141–148, 2016.

HEATH, R. L.; PACKER, L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts. **Archives of Biochemistry and Biophysics**, Maryland Heights, v. 125, n. 1, p. 189–198, 1968.

HICKS PRIES, C. E.; SULMAN, B. N.; WEST, C.; O'NEILL, C.; POPPLETON, E.; PORRAS, R. C.; CASTANHA, C.; ZHU, B.; WIEDEMEIER, D. B.; TORN, M. S. Root litter decomposition slows with soil depth. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 125, p. 103–114, 2018.

HOCHMAL, A. K.; SCHULZE, S.; TROMPELT, K.; HIPPLER, M. Calcium-dependent regulation of photosynthesis. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics**, Amsterdam, v. 1847, n. 9, p. 993–1003, 2015.

HOUBORG, R.; MCCABE, M.; CESCATTI, A.; GITELSON, A. Leaf chlorophyll constraint on model simulated gross primary productivity in agricultural systems. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Amsterdam, v. 43, p. 160–176, 2015.

HOYT, G. D.; MONKS, D. W.; MONACO, T. J. Conservation Tillage for Vegetable Production. **HortTechnology**, Alexandria, v. 4, n. 2, p. 129–135, 1994.

HU, W.; TABLEY, F.; BEARE, M.; TREGURTHA, C.; GILLESPIE, R.; QIU, W.; GOSDEN, P. Short-term dynamics of soil physical properties as affected by compaction and tillage in a silt loam soil. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 17, n. 1, p. 1–13, 2018.

HUANG, S.; CHEN, S.; LIANG, Z.; ZHANG, C.; YAN, M.; CHEN, J.; XU, G.; FAN, X.; ZHANG, Y. Knockdown of the partner protein OsNAR2.1 for high-affinity nitrate

transport represses lateral root formation in a nitrate-dependent manner. **Scientific Reports**, London, v. 5, n. 1, p. 18192, 2015.

HUBERT, F.; HALLAIRE, V.; SARDINI, P.; CANER, L.; HEDDADJ, D. Pore morphology changes under tillage and no-tillage practices. **Geoderma**, Amsterdam, v. 142, n. 1–2, p. 226–236, 2007.

HUDEK, C.; PUTINICA, C.; OTTEN, W.; DE BAETS, S. Functional root trait-based classification of cover crops to improve soil physical properties. **European Journal of Soil Science**, Chichester, v. 73, n. 1, 2022.

HUNGRIA, M.; KASCHUK, G. Regulation of N<sub>2</sub> fixation and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/NH<sub>4</sub><sup>+</sup> assimilation in nodulated and N-fertilized *Phaseolus vulgaris* L. exposed to high temperature stress. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 98, p. 32–39, 2014.

HUNGRIA, M.; MENDES, I. C. Nitrogen fixation with soybean: the perfect symbiosis? In: **Biological Nitrogen Fixation**. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2015. p. 1009–1024.

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A.; ARAUJO, R. S. Alternative methods of soybean inoculation to overcome adverse conditions at sowing. **African Journal of Agricultural Research**, Sapele, v. 10, n. 23, p. 2329–2338, 2015.

IHSAN, M. Z.; DAUR, I.; ALGHABARI, F.; ALZAMANAN, S.; RIZWAN, S.; AHMAD, M.; WAQAS, M.; SHAFQAT, W. Heat stress and plant development: role of sulphur metabolites and management strategies. **Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science**, Stockholm, v. 69, n. 4, p. 332–342, 2019.

INAGAKI, T. M.; SÁ, J. C. de M.; TORMENA, C. A.; DRANSKI, A.; MUCHALAK, A.; BRIEDIS, C.; DE OLIVEIRA FERREIRA, A.; GIAROLA, N. F. B.; DA SILVA, Á. P. Mechanical and biological chiseling impacts on soil organic C stocks, root growth, and crop yield in a long-term no-till system. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 211, p. 104993, 2021.

JENSEN, J. L.; SCHJØNNING, P.; WATTS, C. W.; CHRISTENSEN, B. T.; OBOUR, P. B.; MUNKHOLM, L. J. Soil degradation and recovery – Changes in organic matter fractions and structural stability. **Geoderma**, Amsterdam, v. 364, p. 114181, 2020.

JHA, P.; HATI, K. M.; DALAL, R. C.; DANG, Y. P.; KOPITTKE, P. M.; MENZIES, N. W. Soil carbon and nitrogen dynamics in a Vertisol following 50 years of no-tillage, crop stubble retention and nitrogen fertilization. **Geoderma**, Amsterdam, v. 358, p. 113996, 2020.

JIN, S. H.; HUANG, J. Q.; LI, X. Q.; ZHENG, B. S.; WU, J. S.; WANG, Z. J.; LIU, G. H.; CHEN, M. Effects of potassium supply on limitations of photosynthesis by mesophyll diffusion conductance in *Carya cathayensis*. **Tree Physiology**, Oxford, v. 31, n. 10, p. 1142–1151, 2011.

JOHNSON, J. M.-F.; BARBOUR, N. W.; WEYERS, S. L. Chemical Composition of

Crop Biomass Impacts Its Decomposition. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 71, n. 1, p. 155–162, 2007.

JUMRANI, K.; BHATIA, V. S.; PANDEY, G. P. Impact of elevated temperatures on specific leaf weight, stomatal density, photosynthesis and chlorophyll fluorescence in soybean. **Photosynthesis Research**, Dordrecht, v. 131, n. 3, p. 333–350, 2017.

KARLEN, D. L.; KOVAR, J. L.; CAMBARDELLA, C. A.; COLVIN, T. S. Thirty-year tillage effects on crop yield and soil fertility indicators. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 130, p. 24–41, 2013.

KÄTTERER, T.; BOLINDER, M. A.; ANDRÉN, O.; KIRCHMANN, H.; MENICHETTI, L. Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues, as revealed by a long-term field experiment. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 141, n. 1–2, p. 184–192, 2011.

KAUTZ, T. Research on subsoil biopores and their functions in organically managed soils: A review. **Renewable Agriculture and Food Systems**, Cambridge, v. 30, n. 4, p. 318–327, 2015.

KELLER, T.; SANDIN, M.; COLOMBI, T.; HORN, R.; OR, D. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 194, p. 104293, 2019.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: Black, C. A. et al. **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, part. 1, cap 40, p. 499-510, 1965.

KLIMEK-KOPYRA, A.; ZAJA, C. T.; REBILAS, K. A mathematical model for the evaluation of cooperation and competition effects in intercrops. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 51, p. 9–17, 2013.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 2018. p. 635–662.

KOMISSAROV, M. A.; KLIK, A. The Impact of No-Till, Conservation, and Conventional Tillage Systems on Erosion and Soil Properties in Lower Austria. **Eurasian Soil Science**, Moscow, v. 53, p. 503–511, 2020.

LEITE, H. M. F.; CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A.; MENDES, L. W.; MORAES, L. N.; GROTTTO, R. M. T.; ARAUJO, F. F.; PEREIRA, A. P. de A.; MELO, V. M. M.; ARAUJO, A. S. F. Cover crops shape the soil bacterial community in a tropical soil under no-till. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 168, p. 104166, 2021.

LI, J.; YUAN, X.; GE, L.; LI, Q.; LI, Z.; WANG, L.; LIU, Y. Rhizosphere effects promote soil aggregate stability and associated organic carbon sequestration in rocky areas of desertification. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 304, p. 107126, 2020.

LI, M.; XU, J.; WANG, X.; FU, H.; ZHAO, M.; WANG, H.; SHI, L. Photosynthetic characteristics and metabolic analyses of two soybean genotypes revealed adaptive strategies to low-nitrogen stress. **Journal of Plant Physiology**, Muenchen, v. 229, p. 132–141, 2018.

LI, Y.; LI, Z.; CUI, S.; LIANG, G.; ZHANG, Q. Microbial-derived carbon components are critical for enhancing soil organic carbon in no-tillage croplands: A global perspective. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 205, p. 104758, 2021.

LICHTENTHALER, H. K. [34] Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. **Methods in Enzymology**, San Diego, v. 148, p. 350-382, 1987.

LIMA, R. P.; ROLIM, M. M.; TOLEDO, M. P. S.; TORMENA, C. A.; DA SILVA, A. R.; E SILVA, I. A. C.; PEDROSA, E. M. R. Texture and degree of compactness effect on the pore size distribution in weathered tropical soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 215, p. 105215, 2022.

LIU, X.; DONG, W.; JIA, S.; LIU, Q.; LI, Y.; HOSSAIN, M. E.; LIU, E.; KUZYAKOV, Y. Transformations of N derived from straw under long-term conventional and no-tillage soils: A <sup>15</sup>N labelling study. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 786, p. 147428, 2021.

LONG, S. P.; MARSHALL-COLON, A.; ZHU, X.-G. Meeting the Global Food Demand of the Future by Engineering Crop Photosynthesis and Yield Potential. **Cell**, Cambridge, v. 161, n. 1, p. 56–66, 2015.

LUO, H.; MEROPE, T.; ZHANG, Y.; ZHANG, W. Combining gas exchange and chlorophyll a fluorescence measurements to analyze the photosynthetic activity of drip-irrigated cotton under different soil water deficits. **Journal of Integrative Agriculture**, Oxford a, v. 15, n. 6, p. 1256–1266, 2016.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Potafos, 1997.

MANAVALAN, L.P.; GUTTIKONDA, S.K.; TRAN, L.-S.P.; NGUYEN, H.T. Physiological and molecular approaches to improve drought resistance in soybean. **Plant and Cell Physiology**, Oxford, v. 50, n. 7, p. 1260-1276, 2009.

MAOKA, T. Carotenoids as natural functional pigments. **Journal of Natural Medicines**, Tokyo, v. 74, n. 1, p. 1–16, 2020.

MARSCHNER, P. **Mineral nutrition of higher plants**. London: Academic Press, 2012.

MATEUS, G. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; PARIZ, C. M.; COSTA, N. R.; BORGHI, E.; COSTA, C.; MARTELLO, J. M.; CASTILHOS, A. M.; FRANZLUEBBERS, A. J.; CANTARELLA, H. Corn intercropped with tropical perennial grasses as affected by sidedress nitrogen application rates. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 116, n. 2, p. 223–244, 2020.

- MAY, A.; SILVA, D. D.; SANTOS, F. C. **Cultivo do sorgo biomassa para a cogeração de energia elétrica**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2013, 65 p.
- MAW, M. J. W.; HOUX, J. H.; FRITSCHI, F. B. Nitrogen fertilization of high biomass sorghum affects macro- and micronutrient accumulation and tissue concentrations. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 156, p. 112819, 2020.
- MCDONALD, G.; PAULSEN, G. M. High temperature effects on photosynthesis and water relations of grain legumes. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 196, p. 47–58, 1997.
- MHAMDI, A.; NOCTOR, G.; BAKER, A. Plant catalases: Peroxisomal redox guardians. **Archives of Biochemistry and Biophysics**, Maryland Heights, v. 525, n. 2, p. 181–194, 2012.
- MINGOTTE, F. L. C.; JARDIM, C. A.; YADA, M. M.; AMARAL, C. B.; CHIAMOLERA, T. P. L. C.; COELHO, A. P.; LEMOS, L. B.; FORNASIERI FILHO, D. Impact of crop management and no-tillage system on grain and straw yield of maize crop. **Cereal Research Communications**, Budapest, v. 48, n. 3, p. 399–407, 2020.
- MONTEIRO, C. C.; CARVALHO, R. F.; GRATÃO, P. L.; CARVALHO, G.; TEZOTTO, T.; MEDICI, L. O.; PERES, L. E. P.; AZEVEDO, R. A. Biochemical responses of the ethylene-insensitive Never ripe tomato mutant subjected to cadmium and sodium stresses. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 71, n. 2, p. 306–320, 2011.
- MORAES, M. T. De; LUZ, F. B. Da; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R. Soil load support capacity increases with time without soil mobilization as a result of age-hardening phenomenon. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 186, p. 128–134, 2019a.
- MORAES, M. T.; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R. Da. Critical limits of soil penetration resistance in a rhodic Eutrudox. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 1, p. 288–298, 2014.
- MORAES, M. T.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; BONETTI, J. de A.; LEVIEN, R.; SCHNEPF, A.; LEITNER, D. Mechanical and Hydric Stress Effects on Maize Root System Development at Different Soil Compaction Levels. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 10, 2019b.
- MOREAU, D.; BARDGETT, R. D.; FINLAY, R. D.; JONES, D. L.; PHILIPPOT, L. A plant perspective on nitrogen cycling in the rhizosphere. **Functional Ecology**, Chichester, v. 33, n. 4, p. 540–552, 2019.
- MUHAMMAD ARSLAN ASHRAF. Waterlogging stress in plants: A review. **African Journal of Agricultural Research**, Sapele, v. 7, n. 13, p. 1976-1981, 2012.
- MÜLLER, K.; KATUWAL, S.; YOUNG, I.; MCLEOD, M.; MOLDRUP, P.; DE JONGE, L. W.; CLOTHIER, B. Characterising and linking X-ray CT derived macroporosity parameters to infiltration in soils with contrasting structures. **Geoderma**, Amsterdam,

v. 313, p. 82–91, 2018.

MÜLLER, L. Taxonomia e morfologia. In: MIYASAKA, S.; MEDINA, J. C. (Eds.). **A soja no Brasil**. 1. ed. Campinas: Instituto de Tecnologia de Alimentos, 1981. p. 65–104.

MURGIA, I.; TARANTINO, D.; VANNINI, C.; BRACALE, M.; CARRAVIERI, S.; SOAVE, C. *Arabidopsis thaliana* plants overexpressing thylakoidal ascorbate peroxidase show increased resistance to paraquat-induced photooxidative stress and to nitric oxide-induced cell death. **The Plant Journal**, Chichester, v. 38, p. 940-953, 2004.

NAIK, S. N.; GOUD, V. V.; ROUT, P. K.; DALAI, A.K. Production of first and second generation biofuels: a comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 14, n. 2, p. 578-597, 2010.

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

NOGUEIRA, A. P. O.; SEDIYAMA, T.; BARROS, H. B.; TEIXEIRA, R. C. Morfologia, crescimento e desenvolvimento. In: SEDIYAMA, T. (Ed.). **Tecnologias de produção e usos da soja**. Londrina: Mecenas, 2009. p. 7–16.

NOURI, A.; YODER, D. C.; RAJI, M.; CEYLAN, S.; JAGADAMMA, S.; LEE, J.; WALKER, F. R.; YIN, X.; FITZPATRICK, J.; TREXLER, B.; ARELLI, P.; SAXTON, A. M. Conservation agriculture increases the soil resilience and cotton yield stability in climate extremes of the southeast US. **Communications Earth & Environment**, London, v. 2, n. 1, p. 155, 2021.

NOVARA, A.; KEESSTRA, S.; CERDÀ, A.; PEREIRA, P.; GRISTINA, L. Understanding the role of soil erosion on CO<sub>2</sub>-C loss using 13C isotopic signatures in abandoned Mediterranean agricultural land. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 550, p. 330–336, 2016.

OLIVEIRA, F. É. R. De; OLIVEIRA, J. de M.; XAVIER, F. A. da S. Changes in Soil Organic Carbon Fractions in Response to Cover Crops in an Orange Orchard. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 40, p. e0150105, 2016.

OSUNBITAN, J. A.; OYEDELE, D. J.; ADEKALU, K. O. Tillage effects on bulk density, hydraulic conductivity and strength of a loamy sand soil in southwestern Nigeria. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 82, n. 1, p. 57–64, 2005.

PALM, C.; BLANCO-CANQUI, H.; DECLERCK, F.; GATERE, L.; GRACE, P. Conservation agriculture and ecosystem services: An overview. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 187, p. 87–105, 2014.

PAN, Y. Q.; TUNG, S. A.; YANG, L.; WANG, Y.; ZHOU, X. B. Effect of Straw Return and Nitrogen Application Rate on the Photosynthetic Characteristics and Yield of

Double-Season Maize. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Heidelberg, v. 22, n. 1, p. 660–673, 2022.

PARRELLA, R. A. C.; SCHAFFERT, R. E.; MAY, A.; EMYGDIO, B.; PORTUGAL, A.F.; DAMASCENO, C.M.B. **Desempenho agrônômico de híbridos de sorgo biomassa**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2011, 19 p.

PARUELO, J. M.; BURKE, I. C.; LAUENROTH, W. K. Land-use impact on ecosystem functioning in eastern Colorado, USA. **Global Change Biology**, Chichester, v. 7, n. 6, p. 631–639, 2001.

PATRIGNANI, A.; GODSEY, C. B.; OCHSNER, T. E.; EDWARDS, J. T. Soil Water Dynamics of Conventional and No-Till Wheat in the Southern Great Plains. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 76, n. 5, p. 1768–1775, 2012.

PAUSCH, J.; KUZYAKOV, Y. Carbon input by roots into the soil: Quantification of rhizodeposition from root to ecosystem scale. **Global Change Biology**, Chichester, v. 24, n. 1, p. 1–12, 2018.

PEIXOTO, D. S.; SILVA, B. M.; OLIVEIRA, G. C.; MOREIRA, S. G.; SILVA, F.; CURI, N. A soil compaction diagnosis method for occasional tillage recommendation under continuous no tillage system in Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 194, p. 104307, 2019.

PEIXOTO, D. S.; SILVA, L. de C. M. Da; MELO, L. B. B. De; AZEVEDO, R. P.; ARAÚJO, B. C. L.; CARVALHO, T. S.; MOREIRA, S. G.; CURI, N.; SILVA, B. M. Occasional tillage in no-tillage systems: A global meta-analysis. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 745, p. 140887, 2020.

PEIXOTO, H. P. P.; CAMBRAIA, J.; SANT'ANNA, R.; MOSQUIM, P. R.; MOREIRA, M. A. Aluminium effects on lipid peroxidation and the activities of enzymes of oxidative metabolism in sorghum. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Campinas, v. 11, p. 137–143, 1999.

PENG, Y.; GITELSON, A. A.; KEYDAN, G.; RUNDQUIST, D. C.; MOSES, W. Remote estimation of gross primary production in maize and support for a new paradigm based on total crop chlorophyll content. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 115, n. 4, p. 978–989, 2011.

PFEIFER, J.; KIRCHGESSNER, N.; WALTER, A. Artificial pores attract barley roots and can reduce artifacts of pot experiments. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 177, n. 6, p. 903–913, 2014.

PHILLIPS, R. E.; THOMAS, G. W.; BLEVINS, R. L.; FRYE, W. W.; PHILLIPS, S. H. No-Tillage Agriculture. **Science**, Washington, v. 208, n. 4448, p. 1108–1113, 1980.

PINHEIRO, C.; CHAVES M. M. Photosynthesis and drought: can we make metabolic connections from available data?. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 62, p. 869–882, 2011.

PIRES, G. C.; DE OLIVEIRA DENARDIN, L. G.; SILVA, L. S.; DE FREITAS, C. M.; GONÇALVES, E. C.; DE CAMARGO, T. A.; BREMM, C.; DE FACCIÓ CARVALHO, P. C.; DE SOUZA, E. D. System Fertilization Increases Soybean Yield Through Soil Quality Improvements in Integrated Crop-Livestock System in Tropical Soils. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Heidelberg, v. 22, n. 4, p. 4487–4495, 2022.

PÖHLITZ, J.; RÜCKNAGEL, J.; KOBLENZ, B.; SCHLÜTER, S.; VOGEL, H.-J.; CHRISTEN, O. Computed tomography and soil physical measurements of compaction behaviour under strip tillage, mulch tillage and no tillage. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 175, p. 205–216, 2018.

PROSDOCIMI, M.; JORDÁN, A.; TAROLLI, P.; KEESSTRA, S.; NOVARA, A.; CERDÀ, A. The immediate effectiveness of barley straw mulch in reducing soil erodibility and surface runoff generation in Mediterranean vineyards. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 547, p. 323–330, 2016.

QIAO, Y.; MIAO, S.; LI, N.; HAN, X.; ZHANG, B. Spatial distribution of rhizodeposit carbon of maize (*Zea mays* L.) in soil aggregates assessed by multiple pulse <sup>13</sup>C labeling in the field. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 375, n. 1–2, p. 317–329, 2014.

RAHMAN, M. M.; ALAM, M. S.; KAMAL, M. Z. U.; RAHMAN, G. K. M. M. Organic Sources and Tillage Practices for Soil Management. In: **Resources Use Efficiency in Agriculture**. Singapore: Springer Singapore, 2020. p. 283–328.

RAIJ, B. V.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: IAC, 2001.

RAMOS, F. T.; DORES, E. F. de C.; WEBER, O. L. dos S.; BEBER, D. C.; CAMPELO, J. H.; MAIA, J. C. de S. Soil organic matter doubles the cation exchange capacity of tropical soil under no-till farming in Brazil. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, Oxford, v. 98, n. 9, p. 3595–3602, 2018.

RAPHAEL, J. P. A.; CALONEGO, J. C.; MILORI, D. M. B. P.; ROSOLEM, C. A. Soil organic matter in crop rotations under no-till. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 155, p. 45–53, 2016.

RASSE, D. P.; RUMPEL, C.; DIGNAC, M.-F. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 269, n. 1–2, p. 341–356, 2005.

RAY, D. K.; MUELLER, N. D.; WEST, P. C.; FOLEY, J. A. Yield Trends Are Insufficient to Double Global Crop Production by 2050. **PLoS ONE**, San Francisco, v. 8, n. 6, p. e66428, 2013.

RAY, J. D.; SINCLAIR, T. R. The effect of pot size on growth and transpiration of maize and soybean during water deficit stress. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 49, n. 325, p. 1381–1386, 1998.

REBILAS, K.; KLIMEK-KOPYRA, A.; BACIOR, M.; ZAJĄC, T. A model for the yield losses estimation in an early soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) cultivar depending on

the cutting height at harvest. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 254, p. 107846, 2020.

REEVE, M. J.; CARTER, A. D. Water release characteristic. In: SMITH, K. A.; MULLINS, C. E. (Eds.). **Soil analysis: physical methods**. New York: Marcel Dekker, 1991. p. 111–160.

RIBAS, P. M. **Importância econômica: cultivo do sorgo**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2003.

RICHARDSON, A. D.; DUGAN, S. P.; BERLYN, G. P. An evaluation of noninvasive methods to estimate foliar chlorophyll content. **New Phytologist**, Chichester, v. 153, n. 1, p. 185–194, 2002.

RIGON, J. P. G.; CALONEGO, J. C.; CAPUANI, S.; FRANZLUEBBERS, A. J. Soil organic C affected by dry-season management of no-till soybean crop rotations in the tropics. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 462, n. 1–2, p. 577–590, 2021.

RIGON, J. P. G.; FRANZLUEBBERS, A. J.; CALONEGO, J. C. Soil aggregation and potential carbon and nitrogen mineralization with cover crops under tropical no-till. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 75, n. 5, p. 601–609, 2020.

RODRIGUES, M.; WITHERS, P. J. A.; SOLTANGHEISI, A.; VARGAS, V.; HOLZSCHUH, M.; PAVINATO, P. S. Tillage systems and cover crops affecting soil phosphorus bioavailability in Brazilian Cerrado Oxisols. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 205, p. 104770, 2021.

ROSA, V. do R.; SANTOS, A. L. F. Dos; SILVA, A. A. Da; SAB, M. P. V.; GERMINO, G. H.; CARDOSO, F. B.; SILVA, M. de A. Increased soybean tolerance to water deficiency through biostimulant based on fulvic acids and *Ascophyllum nodosum* (L.) seaweed extract. **Plant Physiology and Biochemistry**, Issy les Moulineaux Cedex, v. 158, p. 228–243, 2021.

ROSOLEM, C. A.; NETO, L. O.; COSTA, V. E.; DA SILVA GRASSMANN, C. Ruzigrass root persistence and soybean root growth. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 442, n. 1–2, p. 333–341, 2019.

RUBAN, A. V.; JOHNSON, M. P.; DUFFY, C. D. P. The photoprotective molecular switch in the photosystem II antenna. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics**, Amsterdam, v. 1817, n. 1, p. 167–181, 2012.

SÁ, J. C. M.; SÉGUY, L.; TIVET, F.; LAL, R.; BOUZINAC, S.; BORSZOWSKI, P. R.; BRIEDIS, C.; DOS SANTOS, J. B.; DA CRUZ HARTMAN, D.; BERTOLONI, C. G.; ROSA, J.; FRIEDRICH, T. Carbon depletion by plowing and its restoration by no-till cropping systems in oxisols of subtropical and tropical agro-ecoregions in Brazil. **Land Degradation & Development**, Oxford, v. 26, n. 6, p. 531–543, 2015.

SANTACHIARA, G.; SALVAGIOTTI, F.; ROTUNDO, J. L. Nutritional and environmental effects on biological nitrogen fixation in soybean: A meta-analysis. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 240, p. 106–115, 2019.

SANTANIELLO, A.; SCARTAZZA, A.; GRESTA, F.; LORETI, E.; BIASONE, A.; DI TOMMASO, D.; PIAGGESI, A.; PERATA, P. Ascophyllum nodosum Seaweed Extract Alleviates Drought Stress in Arabidopsis by Affecting Photosynthetic Performance and Related Gene Expression. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 8, 2017.

SANTOS, F. C.; ALBUQUERQUE FILHO, M. R.; RESENDE, A. V.; OLIVEIRA, A. C. OLIVEIRA, M. S.; GOMES, T. C. Adubação nitrogenada e potássica na nutrição e na extração de macronutrientes pelo sorgo biomassa. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 14, n. 1, p. 10-22, 2015.

SARTO, M. V. M.; BORGES, W. L. B.; BASSEGIO, D.; RICE, C.; ROSOLEM, C. A. Maize and sorghum root growth and yield when intercropped with forage grasses. **Agronomy Journal**, Madison, v. 113, n. 6, p. 4900–4915, 2021.

SARTORI, F.; PICCOLI, I.; POLESE, R.; BERTI, A. A multivariate approach to evaluate reduced tillage systems and cover crop sustainability. **Land**, Basel, v. 11, n. 1, p. 55, 2021.

SCHOLANDER, P.F.; HAMMEL, H.T.; BRADSTREET, E.D.; HEMINGSEN, E.A. Sap pressure in vascular plants. **Science**, Washington, v.148, p. 339-345, 1965.

SCHMIDT, M. W. I.; TORN, M. S.; ABIVEN, S.; DITTMAR, T.; GUGGENBERGER, G.; JANSSENS, I. A.; KLEBER, M.; KÖGEL-KNABNER, I.; LEHMANN, J.; MANNING, D. A. C.; NANNIPIERI, P.; RASSE, D. P.; WEINER, S.; TRUMBORE, S. E. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. **Nature**, London, v. 478, n. 7367, p. 49–56, 2011.

SCHULTEN, H.-R.; LEINWEBER, P. New insights into organic-mineral particles: composition, properties and models of molecular structure. **Biology and Fertility of Soils**, Heidelberg, v. 30, n. 5–6, p. 399–432, 2000.

SEDIYAMA, T.; SILVA, F.; BORÉM, A. **Soja do plantio a colheita**. Viçosa: UFV, 2015, 333 p.

SHARMA, P.; JHA, A. B.; DUBEY, R. S.; PESSARAKLI, M. Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. **Journal of Botany**, New York, v. 2012, p. 1–26, 2012.

SILVA, G. F.; CALONEGO, J. C.; LUPERINI, B. C. O.; CHAMMA, L.; ALVES, E. R.; RODRIGUES, S. A.; PUTTI, F. F.; DA SILVA, V. M.; DE ALMEIDA SILVA, M. Soil–plant relationships in soybean cultivated under conventional tillage and long-term no-tillage. **Agronomy**, Basel, v. 12, n. 3, p. 697, 2022a.

SILVA, G. F.; MATUSEVICIUS, A. P. O.; CALONEGO, J. C.; CHAMMA, L.; LUPERINI, B. C. O.; ALVES, M. da S.; LEITE, H. M. F.; PINTO, E. J.; SILVA, M. A.; PUTTI, F. F. Soil–plant relationships in soybean cultivated under crop rotation after 17 years of no-tillage and occasional chiseling. **Plants**, Basel, v. 11, n. 19, p. 2657, 2022b.

SILVA, J. F.; GONTIJO NETO, M. M.; SILVA, G. F. Da; BORGHI, E.; CALONEGO, J. C. Soil organic matter and aggregate stability in soybean, maize and urochloa production systems in a very clayey soil of the brazilian savanna. **Agronomy**, Basel, v. 12, n. 7, p. 1652, 2022c.

SILVA, F. A. M.; NAUDIN, K.; CORBEELS, M.; SCOPEL, E.; AFFHOLDER, F. Impact of conservation agriculture on the agronomic and environmental performances of maize cropping under contrasting climatic conditions of the Brazilian Cerrado. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 230, p. 72–83, 2019.

SINGH, G.; WILLIARD, K. W. J.; SCHOONOVER, J. E. Cover Crops and Tillage Influence on Nitrogen Dynamics in Plant-Soil-Water Pools. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 82, n. 6, p. 1572–1582, 2018.

SINGH, V.; VAN OOSTEROM, E. J.; JORDAN, D. R.; MESSINA, C. D.; COOPER, M.; HAMMER, G. L. Morphological and architectural development of root systems in sorghum and maize. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 333, n. 1–2, p. 287–299, 2010.

SIVARAJAN, S.; MAHARLOOEI, M.; BAJWA, S. G.; NOWATZKI, J. Impact of soil compaction due to wheel traffic on corn and soybean growth, development and yield. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 175, p. 234–243, 2018.

SIX, J.; BOSSUYT, H.; DEGRYZE, S.; DENEFF, K. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, n. 1, p. 7–31, 2004.

SIX, J.; FELLER, C.; DENEFF, K.; OGLE, S. M.; MORAES, J. C.; ALBRECHT, A. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - effects of no-tillage. **Agronomie**, Paris, v. 22, n. 7–8, p. 755–775, 2002.

SOLLENBERGER, L. E.; KOHMANN, M. M.; DUBEUX, J. C. B.; SILVEIRA, M. L. Grassland Management Affects Delivery of Regulating and Supporting Ecosystem Services. **Crop Science**, Hoboken n, v. 59, n. 2, p. 441–459, 2019.

SORATTO, R. P.; GUIDORIZZI, F. V. C.; SOUSA, W. S.; GILABEL, A. P.; JOB, A. L. G.; CALONEGO, J. C. Effects of previous fall–winter crop on spring–summer soybean nutrition and seed yield under no-till system. **Agronomy**, Basel, v. 12, n. 12, p. 2974, 2022.

SOUZA, B. P.; MARTINEZ, H. E. P.; DE CARVALHO, F. P.; LOUREIRO, M. E.; STURIAÑO, W. P. Gas exchanges and chlorophyll fluorescence of young coffee plants submitted to water and nitrogen stresses. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 43, n. 16, p. 2455–2465, 2020.

STEWART, C. E.; PAUSTIAN, K.; CONANT, R. T.; PLANTE, A. F.; SIX, J. Soil carbon saturation: Implications for measurable carbon pool dynamics in long-term incubations. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 41, n. 2, p. 357–366, 2009.

STOLF, R.; MURAKAMI, J. H.; BRUGNARO, C.; SILVA, L. G.; SILVA, L. C. F. Da;

- MARGARIDO, L. A. C. Penetrômetro de impacto stolf - programa computacional de dados em EXCEL-VBA. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 3, p. 774–782, 2014.
- STONE, L. R.; SCHLEGEL, A. J. Tillage and crop rotation phase effects on soil physical properties in the west-central great plains. **Agronomy Journal**, Madison, v. 102, n. 2, p. 483–491, 2010.
- TAKAHASHI, S.; BADGER M. R. Photoprotection in plants: a new light on photosystem II damage. **Trends in Plant Science**, Cambridge, v. 16, p. 53-60, 2011.
- TANAKA, K. S.; CRUSCIOL, C. A. C.; SORATTO, R. P.; MOMESSO, L.; COSTA, C. H. M.; FRANZLUEBBERS, A. J.; OLIVEIRA JUNIOR, A.; CALONEGO, J. C. Nutrients released by Urochloa cover crops prior to soybean. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 113, n. 3, p. 267–281, 2019.
- TILMAN, D.; BALZER, C.; HILL, J.; BEFORT, B. L. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Oxford, v. 108, n. 50, p. 20260–20264, 2011.
- TOMEMORI, H.; HAMAMURA, K.; TANABE, K. Interactive effects of sodium and potassium on the growth and photosynthesis of spinach and komatsuna. **Plant Production Science**, Abingdon, v. 5, n. 4, p. 281–285, 2002.
- TULLBERG, J. Tillage, traffic and sustainability—A challenge for ISTRO. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 111, n. 1, p. 26–32, 2010.
- TURNER, B. L.; HOPKINS, D. W.; HAYGARTH, P. M.; OSTLE, N.  $\beta$ -Glucosidase activity in pasture soils. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 20, n. 2, p. 157–162, 2002.
- VANHEES, D. J.; LOADES, K. W.; BENGOUGH, A. G.; MOONEY, S. J.; LYNCH, J. P. The ability of maize roots to grow through compacted soil is not dependent on the amount of roots formed. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 264, p. 108013, 2021.
- VELOSO, M. G.; ANGERS, D. A.; TIECHER, T.; GIACOMINI, S.; DIECKOW, J.; BAYER, C. High carbon storage in a previously degraded subtropical soil under no-tillage with legume cover crops. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 268, p. 15–23, 2018.
- VELOSO, M. G.; CECAGNO, D.; BAYER, C. Legume cover crops under no-tillage favor organomineral association in microaggregates and soil C accumulation. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 190, p. 139–146, 2019.
- WANG, A.; LAM, S. K.; HAO, X.; LI, F. Y.; ZONG, Y.; WANG, H.; LI, P. Elevated CO<sub>2</sub> reduces the adverse effects of drought stress on a high-yielding soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) cultivar by increasing water use efficiency. **Plant Physiology and Biochemistry**, Issy les Moulineaux Cedex, v. 132, p. 660–665, 2018a.

WANG, M.; ZHENG, Q.; SHEN, Q.; GUO, S. The critical role of potassium in plant stress response. **International Journal of Molecular Sciences**, Basel, v. 14, n. 4, p. 7370–7390, 2013.

WANG, S.; ZHUANG, K.; ZHANG, S.; YANG, M.; KONG, F.; MENG, Q. Overexpression of a tomato carotenoid  $\epsilon$ -hydroxylase gene ( SILUT1 ) improved the drought tolerance of transgenic tobacco. **Journal of Plant Physiology**, Muenchen, v. 222, p. 103–112, 2018b.

WASAYA, A.; ZHANG, X.; FANG, Q.; YAN, Z. Root phenotyping for drought tolerance: a review. **Agronomy**, Basel, v. 8, n. 11, p. 241, 2018.

WEN, Z.; LI, H.; SHEN, Q.; TANG, X.; XIONG, C.; LI, H.; PANG, J.; RYAN, M. H.; LAMBERS, H.; SHEN, J. Tradeoffs among root morphology, exudation and mycorrhizal symbioses for phosphorus-acquisition strategies of 16 crop species. **New Phytologist**, Chichester, v. 223, n. 2, p. 882–895, 2019.

WIESMEIER, M.; URBANSKI, L.; HOBLEY, E.; LANG, B.; VON LÜTZOW, M.; MARIN-SPIOTTA, E.; VAN WESEMAEL, B.; RABOT, E.; LIESS, M.; GARCIA-FRANCO, N.; WOLLSCHLÄGER, U.; VOGEL, H.-J.; KÖGEL-KNABNER, I. Soil organic carbon storage as a key function of soils - A review of drivers and indicators at various scales. **Geoderma**, Amsterdam, v. 333, p. 149–162, 2019.

WU, G.; CHEN, Z.; JIANG, N.; JIANG, H.; CHEN, L. Effects of long-term no-tillage with different residue application rates on soil nitrogen cycling. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 212, p. 105044, 2021.

WU, L.; MISSELBROOK, T. H.; FENG, L.; WU, L. Assessment of Nitrogen Uptake and Biological Nitrogen Fixation Responses of Soybean to Nitrogen Fertiliser with SPACSYS. **Sustainability**, Basel, v. 12, n. 15, p. 5921, 2020.

WULANNINGTYAS, H. S.; GONG, Y.; LI, P.; SAKAGAMI, N.; NISHIWAKI, J.; KOMATSUZAKI, M. A cover crop and no-tillage system for enhancing soil health by increasing soil organic matter in soybean cultivation. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 205, p. 104749, 2021.

YANG, X.; ZHENG, L.; YANG, Q.; WANG, Z.; CUI, S.; SHEN, Y. Modelling the effects of conservation tillage on crop water productivity, soil water dynamics and evapotranspiration of a maize-winter wheat-soybean rotation system on the Loess Plateau of China using APSIM. **Agricultural Systems**, Amsterdam, v. 166, p. 111–123, 2018.

YEOM, M.; KIM, H.; LIM, J.; SHIN, A.-Y.; HONG, S.; KIM, J.-I.; NAM, H. G. How do phytochromes transmit the light quality information to the circadian clock in Arabidopsis? **Molecular Plant**, Cambridge, v. 7, n. 11, p. 1701–1704, 2014.

YODER, R. E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses 1. **Agronomy Journal**, Madison, v. 28, n. 5, p. 337–351, 1936.

YOSHIMURA, K.; MIYAO, K.; GABER, A.; TAKEDA, T.; KANABOSHI, H.; MIYASAKA, H.; SHIGEOKA, S. Enhancement of stress tolerance in transgenic tobacco plants overexpressing *Chlamydomonas* glutathione peroxidase in chloroplasts or cytosol. **The Plant Journal**, Chichester, v. 37, n. 1, p. 21–33, 2004.

YU, W.; HUANG, W.; WEINTRAUB-LEFF, S. R.; HALL, S. J. Where and why do particulate organic matter (POM) and mineral-associated organic matter (MAOM) differ among diverse soils? **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 172, p. 108756, 2022.

YUAN, M.; DUAN, J.; LI, J.; JIAN, S.; GAMAGE, L.; DZANTOR, K. E.; HUI, D.; FAY, P. A. Effects of nitrogen fertilization and bioenergy crop species on central tendency and spatial heterogeneity of soil glycosidase activities. **Scientific Reports**, London, v. 10, n. 1, p. 19681, 2020.

ZAGO, L. M. S.; MOREIRA, A. K. O.; SILVA-NETO, C. M.; NABOUT, J. C.; FERREIRA, M. E.; CARAMORI, S. S. Biochemical activity in Brazilian Cerrado soils is differentially affected by perennial and annual crops. **Australian Journal of Crop Science**, Lismore, v. 12, n. 02, p. 235–242, 2018.

ZHANG, N.; PORTIS, A. R. Mechanism of light regulation of Rubisco: a specific role for the larger Rubisco activase isoform involving reductive activation by thioredoxin-f. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Oxford, v. 96, n. 16, p. 9438–9443, 1999.

ZHANG, Y.; JIA, A.; ZHAO, W.; KANG, J.; WANG, C.; KANG, W.; TIAN, Z. Soil macroporosity and water flow in the root zone of oases in hyper-arid regions. **European Journal of Soil Science**, Chichester, v. 73, n. 2, 2022.

ZHANG, Y.; WANG, J.; GONG, S.; XU, D.; MO, Y.; ZHANG, B. Straw mulching improves soil water content, increases flag leaf photosynthetic parameters and maintains the yield of winter wheat with different irrigation amounts. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 249, p. 106809, 2021.

ZHANG, Y.; WANG, S.; WANG, H.; NING, F.; ZHANG, Y.; DONG, Z.; WEN, P.; WANG, R.; WANG, X.; LI, J. The effects of rotating conservation tillage with conventional tillage on soil properties and grain yields in winter wheat-spring maize rotations. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 263, p. 107–117, 2018.

ZHANG, Z.; LIU, K.; ZHOU, H.; LIN, H.; LI, D.; PENG, X. Linking saturated hydraulic conductivity and air permeability to the characteristics of biopores derived from X-ray computed tomography. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 571, p. 1–10, 2019.

ZHANG, Z.; PENG, X. Bio-tillage: A new perspective for sustainable agriculture. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 206, p. 104844, 2021.

ZHOU, H.; WHALLEY, W. R.; HAWKESFORD, M. J.; ASHTON, R. W.; ATKINSON, B.; ATKINSON, J. A.; STURROCK, C. J.; BENNETT, M. J.; MOONEY, S. J. The interaction between wheat roots and soil pores in structured field soil. **Journal of**

**Experimental Botany**, Oxford, v. 72, n. 2, p. 747–756, 2021.

ZUFFO, A. M.; RATKE, R. F.; OKLA, M. K.; AL-HASHIMI, A.; GONZÁLEZ AGUILERA, J.; TRENTO, A. C. S.; PEREIRA DA SILVA, N.; SOUZA, E. D.; NOGUEIRA, B. K. A.; COUTINHO, J. H.; STEINER, F.; DE ALCÂNTARA NETO, F.; SILVA JÚNIOR, G. B.; SANTOS SILVA, F. C.; SOBRINHO, R. L.; ABDELGAWAD, H. Understanding the contribution of soybean crop residues inoculated with *Bradyrhizobium* spp. and not harvested on nitrogen supply in off-season corn cultivars. **Plos One**, San Francisco, v. 17, n. 6, p. e0269799, 2022.