

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

GUILHERME NUNES CARVALHO RAMOS

**DESEMPENHO AGRONÔMICO DA CULTURA DA SOJA ADUBADA POR DOIS
ANOS CONSECUTIVOS COM FERTILIZANTE ORGANOMINERAL A BASE DE
LODO DE ESGOTO**

Ilha Solteira – SP
2025

GUILHERME NUNES CARVALHO RAMOS

**DESEMPENHO AGRONÔMICO DA CULTURA DA SOJA ADUBADA
POR DOIS ANOS CONSECUTIVOS COM FERTILIZANTE
ORGANOMINERAL A BASE DE LODO DE ESGOTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira –
Unesp como parte dos requisitos para obtenção
do grau de Engenheiro Agrônomo.

Prof. Dr. Thiago Assis Rodrigues Nogueira
Orientador

Profa. Dra. Jussara Borges Regitano
Coorientadora

Prof. Dr. Orivaldo Arf
Coorientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

R175d Ramos, Guilherme Nunes Carvalho.
Desempenho agrônomo da cultura da soja adubada por dois anos consecutivos com fertilizante organomineral a base de lodo de esgoto / Guilherme Nunes Carvalho Ramos. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
56 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Agrônoma) - Universidade Estadual Paulista, (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2025

Orientador: Thiago Assis Rodrigues Nogueira
Coorientador(a): Orivaldo Arf e Jussara Borges Regitano
Inclui bibliografia

1. Economia circular. 2. Glycine max L. 3. Resíduo urbano. 4. Segurança alimentar. 5. Sustentabilidade. .

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO" FACULDADE
DE ENGENHARIA – UNESP – CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA CURSO DE GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA AGRONÔMICA**

ATA DA DEFESA – TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**TÍTULO: "DESEMPENHO AGRONÔMICO DA CULTURA DA SOJA ADUBADA POR DOIS
ANOS CONSECUTIVOS COM FERTILIZANTE ORGANOMINERAL A BASE DE LODO
DE ESGOTO"**

ALUNO: GUILHERME NUNES CARVALHO RAMOS - RA: 202052451

ORIENTADOR: Prof. Dr. THIAGO ASSIS RODRIGUES NOGUEIRA

(COORDENAÇÃO DA Profa. Dra. JUSSARA BORGES REGITANO e do Prof. Dr. ORIVALDO ARF)

Aprovado (X) Reprovado () pela Comissão Examinadora com nota obtida: 9,7

Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
gov.br THIAGO ASSIS RODRIGUES NOGUEIRA
Data: 12/06/2025 20:18:25-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

THIAGO ASSIS RODRIGUES NOGUEIRA

1º EXAMINADOR (Orientador-Presidente)

Documento assinado digitalmente
gov.br MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA FILHO
Data: 14/06/2025 11:14:04-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA FILHO

2º EXAMINADOR

Documento assinado digitalmente
gov.br RODRIGO SILVA ALVES
Data: 14/06/2025 12:15:31-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

RODRIGO SILVA ALVES

3º EXAMINADOR

Documento assinado digitalmente
gov.br GUILHERME NUNES CARVALHO RAMOS
Data: 16/06/2025 16:01:52-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

GUILHERME NUNES CARVALHO RAMOS

Aluno

Ilha Solteira (SP), 25 de junho de 2024.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe, Maria Eugênia, minha base e fonte de inspiração. Pelo exemplo de dedicação na criação dos filhos, pelos ensinamentos valiosos e pelo apoio constante em todos os momentos. Sua força e amor incondicional foram essenciais para que eu seguisse em frente e lutasse pelos meus objetivos. Também dedico ao meu pai, Antônio Carlos, ao meu padrasto Raul e à minha irmã Sofia, que sempre me deram apoio e me ajudaram a cada passo dessa caminhada. Minha eterna gratidão à minha tia Lúcia Helena, à Chiquinha, ao meu tio João Luís e ao meu avô Antônio, que estiveram ao meu lado, oferecendo apoio e acreditando em mim, sempre.

“O futuro pertence àqueles que acreditam na beleza de seus sonhos.”

Eleanor Roosevelt

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pelo dom da vida e pela sabedoria divina que me tem guiado, proporcionando discernimento para enfrentar os desafios com fé e leveza. Agradeço também à Nossa Senhora da Piedade, pela proteção constante e pela saúde que me concede, sustentando-me em todos os momentos.

Gostaria de expressar minha imensa gratidão aos meus pais, Maria Eugênia e Antônio Carlos, ao meu padrasto Raul e à minha irmã Sofia, pelo exemplo de amor, dedicação e força. Agradeço pelo apoio incondicional que me deram desde o início da minha jornada acadêmica, sempre acreditando no meu potencial e me incentivando a seguir em frente. A cada dia, suas palavras de compreensão e auxílio me fortalecem, e sua presença constante tem sido fundamental em cada passo desta caminhada. Agradeço também à minha namorada, Mariam Youssef, por estar ao meu lado em todos os momentos. Pelo amor, compreensão, força, amizade e por sempre estar ao meu lado, ajudando-me a superar cada desafio com serenidade, confiança e dedicação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Thiago Assis Rodrigues Nogueira, agradeço imensamente pela oportunidade de realizar este trabalho sob sua orientação. Agradeço pelo constante incentivo, pela confiança em meu potencial e por acreditar em mim em todos os momentos. Seus conselhos valiosos, sua paciência e sua dedicação foram essenciais para o meu crescimento acadêmico e pessoal. O tempo dedicado ao meu desenvolvimento, sempre com gentileza e sabedoria, foi fundamental para que eu pudesse superar desafios e alcançar meus objetivos.

Aos meus amigos da vida acadêmica, Rafaela, Diogo, Júlia, Lilybeth e Isabella por tornar a graduação mais leve e divertida, pelos estudos e conhecimentos compartilhados.

À minha segunda família, a República SeuKupira, que me acolheram com tanto carinho e por estarem ao meu lado nos momentos de dificuldades, assim como nas conquistas. Agradeço pelo apoio, pela amizade sincera e por tornarem minha trajetória acadêmica mais leve e prazerosa. Um agradecimento especial para o Brian, Vinícius, Nelson, Lucas, Miguel, João Paulo, Vinícius Debona, Pedro, Kaíque, José Henrique e Breno. Agradeço também à nossa mãe da república, Santinha, que cuidou e cuida de todos nós com maior carinho e amor do mundo.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Câmpus de Ilha Solteira (FEIS/UNESP), pela oportunidade de fazer parte do curso de Engenharia Agrônômica, por proporcionar excelentes condições de aprendizado e por ser um ambiente que fomenta o crescimento acadêmico e pessoal. Guardo a FEIS/UNESP em um lugar especial no meu coração, por tudo que me ensinou e pelo impacto positivo que teve em minha formação.

Aos funcionários da Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão (FEPE), por todo suporte e ajuda para a adequada condução do experimento e aos professores e funcionários da FEIS/UNESP, pelo apoio concedido, sendo fundamentais para a conclusão do curso.

Ao Grupo de Estudos em Nutrição, Adubação e Fertilidade do Solo (GENAFERT), pelo companheirismo, dedicação e espírito de equipe. Em especial, sou grato aos meus colegas, pois, graças à colaboração de todos, conseguimos desenvolver excelentes pesquisas, construir amizades duradouras e também desfrutar de momentos de lazer que tornaram essa jornada ainda mais enriquecedora.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (proc. número 125708/2022-0), (proc. número 133391/2023-0), (proc. número 133219/2024-0) por me proporcionar bolsas de estudos (PIBIC) e ajudar a realizar sonhos, proporcionando meu crescimento acadêmico e impulsionando meu desenvolvimento pessoal.

Finalmente, muito obrigado a todas as pessoas que cruzaram meu caminho, pois sou uma pessoa melhor e mais feliz graças a participação de cada uma delas. Cada um de nós é resultado das experiências que vive e das pessoas com quem convive.

RESUMO

Os fertilizantes organominerais (FOM) a base de lodo de esgoto (LE) são uma alternativa promissora para melhorar a fertilidade do solo, o estado nutricional das plantas e aumentar a produtividade da soja. Além disso, podem reduzir custos de produção ao diminuir o uso de fertilizantes minerais, garantindo maior segurança alimentar. Também, contribuem para a destinação adequada do LE urbano, produzido em grande escala no Brasil. Nesse contexto, objetivou-se com esse estudo, avaliar o desempenho agrônômico da soja adubada por dois anos consecutivos com FOM a base de LE, em solo da região do Cerrado. Para tal, foi instalado um experimento em condições de campo na cidade de Selvíria, MS, Brasil. Foi adotado o delineamento experimental em blocos casualizados (DBC), com quatro repetições, em esquema fatorial $3 \times 2 + 3$, sendo: três formas físicas de FOM (farelada, granulada e peletizada), duas doses de FOM (70% e 100% da dose estabelecida para adubação mineral com base no teor de P_2O_5), somado a três tratamentos adicionais: i) fertilizante mineral (FM) (100% da dose do FOM), ii) aplicação de lodo de esgoto (LE), e iii) controle absoluto (CT, sem adição de FOM, FM e LE). Foram avaliados: a nodulação, o índice de clorofila Falker (ICF), o acúmulo de N, os componentes morfológicos e de produção e a produtividade de grãos de soja. Em relação a esses parâmetros, a matéria seca da parte aérea (MSPA), a matéria seca da raiz (MSR), o acúmulo de N na raiz (ANR) e o acúmulo de N na parte aérea (ANPA), na dose de 70% do FOM com forma física peletizada, obteve as maiores médias. No 1º ano, o fertilizante mineral apresentou maior ANPA e ANR. Na nodulação, a dose de 100% teve resultado superior a dose de 70%. A produtividade foi maior com FOM granulado (70%) e peletizado (100%) no 1º ano, e com FOM farelado e LE no 2º ano. Todos os tratamentos superaram a média nacional, com melhor desempenho no 2º ano. Não houve interação entre doses ou formas de FOM, mas os efeitos positivos foram mais evidentes no 2º ano. Os FOM foram superiores no 2º ano, indicando benefícios de aplicações sucessivas. Essa prática é uma alternativa viável para reduzir a aplicação de fertilizantes minerais, além de promover a destinação ambientalmente adequada do LE. No entanto, são necessários estudos de longo prazo para otimizar o manejo do FOM na agricultura.

Palavras-chave: Economia circular; *Glycine max* L.; Resíduo urbano; Segurança alimentar; Sustentabilidade.

ABSTRACT

Organomineral fertilizers (OMF) based on sewage sludge (SS) are a promising alternative to improve soil fertility, plant nutritional status, and increase soybean productivity. Furthermore, they can reduce production costs by reducing the use of mineral fertilizers, ensuring greater food security. They also contribute to the proper disposal of urban waste, produced on a large scale in Brazil. In this context, the objective of this study was to evaluate the agronomic performance of soybeans fertilized for two consecutive years with SS-based OMF, in soil in the Cerrado region. For this purpose, an experiment was carried out under field conditions in the city of Selvíria, MS, Brazil. A randomized complete block design was used, with four replications, in a $3 \times 2 + 3$ factorial scheme, as follows: three physical forms of FOM (bran, granulated, and pelleted), two OMF rates (70% and 100% of the rate established for mineral fertilizer based on the P_2O_5 content), added to three additional treatments: *i*) mineral fertilizer (FM) (100% of the OMF rate), *ii*) application of sewage sludge (SS), and *iii*) control (CT, without addition of OMF, MF, and SS). The following were evaluated: nodulation, Falker chlorophyll index (FCI), N accumulation, morphological and production components, and soybean grain yield. Regarding these parameters, the dry matter of shoot (DMS) and root (DMR), root N accumulation (RNA) and shoot N accumulation (SNA), at the 70% rate of OMF in pelleted physical form, obtained the highest averages. In the 1st crop year, the mineral fertilizer presented higher SHA and RNA. In nodulation, the 100% rate had a better result than the 70% application rate. Productivity was higher with granulated (70%) and pelleted (100%) OMF in the 1st crop year, and with bran OMF and LE in the 2nd crop year. All treatments exceeded the national average, with better performance in the 2nd crop year. There was no interaction between rates or forms of OMF, but the positive effects were more evident in the 2nd crop year. The FOMs were higher in the 2nd crop year, indicating benefits from successive applications. This practice is a viable alternative to reduce mineral fertilizers application, in addition to promoting environmentally appropriate disposal of SS. However, long-term studies are needed to optimize OMF management in agriculture.

Keywords: Circular economy; *Glycine max* L.; Urban waste; Food security; Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Local de estudo: município de Selvíria, MS, Brasil	18
Figura 2 -Fazenda de Ensino Pesquisa e Extensão (FEPE) da FEIS/Unesp (A) e vista aérea das unidades experimentais onde foi desenvolvida a presente pesquisa (B) composição física e química do lodo de esgoto da Estação de Tratamento de Esgoto de São José do Rio Preto.....	19
Figura 3 - Precipitação pluvial, umidade relativa do ar, temperaturas média, máxima e mínima obtidas durante o cultivo da cultura da soja (Selvíria, Mato Grosso do Sul, Brasil, 2021/22 e 2022/23). Dados obtidos da estação climática da Unesp, Câmpus de Ilha Solteira.....	19
Figura 4 - Fertilizante organomineral a partir de lodo de esgoto nas formas físicas farelada (A), granulada (B) e peletizada (C).....	24
Figura 5 - Avaliações fitotécnicas das plantas de soja no estágio R2, sendo: A) determinação do índice de clorofila foliar; A) verificação da nodulação das raízes e; C) Parte aérea de uma planta de soja, com destaque para o trifólio utilizado para avaliação da diagnosefoliar.....	28
Figura 6 – Grãos de soja para obtenção da produtividade.....	28
Figura 7 - Efeito da interação das formas físicas de FOM (F =Farelada; G = Granulada e P = Peletizada) e de duas doses de FOM aplicadas (70% e 100% da dose estabelecida para adubação mineral) no número de nódulos viáveis por planta da soja. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.....	36
Figura 8 - Efeito da interação das formas físicas de FOM (F=Farelada; G= Granulada; P = Peletizada) e das duas doses de FOM aplicadas (70% e 100% da dose estabelecida para adubação mineral) na produtividade de grãos da cultura da soja. Média nacional de produtividade. (3.026 kg ha ⁻¹ , safra 2021/22). Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização dos atributos químicos e físicos do solo (camada de 0–0,2 m de profundidade) utilizado no experimento (Média $\pm$ desvio-padrão, $n = 4$)	21
Tabela 2 - Composição física e química do lodo de esgoto da Estação de Tratamento de Esgoto de São José do Rio Preto.....	23
Tabela 3 - Caracterização dos parâmetros de interesse agrônômico no fertilizante organomineral (FOM) a partir de lodo de esgoto ⁽¹⁾ . (Média $\pm$ desvio-padrão, $n = 4$)	24
Tabela 4 - Teores de metais pesados no fertilizante organomineral (FOM) a partir de lodo de esgoto.....	25
Tabela 5 - Efeito dos tratamentos no índice de clorofila falker (ICF), na matéria seca da parte aérea (ANPA), na matéria seca da raiz (ANR), no acúmulo de nitrogênio na parte aérea (ANPA) e no acúmulo de nitrogênio na raiz (ANR) da cultura da soja.	32
Tabela 6 - Efeito dos tratamentos na matéria seca dos nódulos (MSN), no número de nódulos viáveis por planta (NNVP) e no número de nódulos por planta (NNP) da cultura da soja.....	33
Tabela 7 - Efeito dos tratamentos na massa de mil grãos (M100), na população final de plantas (POP), na altura de plantas (AP), na altura de inserção da primeira vagem (APV) e na produtividade (PROD) da cultura da soja.....	24

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	13
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	16
2.1 IMPORTÂNCIA DA CULTURA DA SOJA PARA O BRASIL.....	16
2.2 SOLOS DO CERRADO NA PRODUÇÃO DE GRÃOS NO BRASIL	17
2.3 O USO DE FERTILIZANTES NO BRASIL.....	17
2.4 LODO DE ESGOTO	18
2.5 FERTILIZANTE ORGANOMINERAL A PARTIR DE LODO DE ESGOTO	19
3 MATERIAL E MÉTODOS	21
3.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL	21
3.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS	25
3.3 OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO LODO DE ESGOTO	25
3.4 PREPARO DA FORMULAÇÃO DO FERTILIZANTE ORGANOMINERAL	26
3.5 IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO.....	28
3.6 VARIÁVEIS AVALIADAS NO EXPERIMENTO.....	29
a) Matéria seca e nodulação.....	29
b) Acúmulo de N	30
c) Índice de clorofila Falker.....	30
d) Componentes morfológicos e de produção e produtividade	31
3.7 ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	32
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
4.1 ÍNDICE DE CLOROFILA FALKER, ACÚMULO DE N E MATÉRIA SECA.....	33
4.2 NODULAÇÃO DA SOJA.....	36
4.3 COMPONENTES MORFOLÓGICOS E DE PRODUÇÃO E PRODUTIVIDADE	40
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	46
REFERÊNCIAS.....	47

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A soja (*Glycine max* L.) é a principal cultura de plantas oleaginosas no Brasil, desempenhando um papel crucial tanto na economia quanto na sociedade, em nível nacional e internacional. Seu impacto é tão significativo que a soja se consolidou como um dos pilares fundamentais do agronegócio brasileiro, contribuindo de maneira substancial para o crescimento e fortalecimento do setor no cenário global (CEPEA, 2024). A produção de soja é utilizada em diversas finalidades, incluindo a extração de óleo, a formulação de ração animal, a produção de biodiesel, o consumo humano e a fabricação de vários ingredientes industriais (Chen *et al.*, 2022). A soja representa atualmente 50% da produção brasileira de grãos, com estimativa de produção de 167,8 milhões de toneladas na atual safra 2024/25. Este volume representa um aumento de aproximadamente 13,6% em relação à safra anterior 2023/24, quando a produção foi estimada em 147,3 milhões de toneladas (CONAB, 2025).

O fornecimento adequado de fertilizantes é essencial para otimizar a produtividade e a qualidade da soja, uma vez que os nutrientes fornecidos por esses produtos são fundamentais para o crescimento saudável das plantas e o aumento da produção (Liao *et al.*, 2022). O nitrogênio (N) é um dos nutrientes requeridos em maior quantidade pela cultura. Estima-se que para cada 100 kg de soja produzidos são necessários de 8 a 9 kg de N, mas apenas cerca de 1/3 dele vem de fertilizantes (Li *et al.*, 2022). Basicamente, as fontes disponíveis de N para as plantas são provenientes da mineralização da matéria orgânica (MO), dos fertilizantes nitrogenados e da fixação biológica de N₂ (FBN) (Hungria; Nogueira, 2020).

O Cerrado é uma das principais fronteiras agrícolas do Brasil, desempenhando um papel fundamental na produção de alimentos. Entretanto, seus solos, predominantemente compostos por Latossolos, apresentam baixa fertilidade natural devido ao intenso processo de intemperismo (IBGE, 2021). Assim, visando garantir boas produtividades nas lavouras, é fundamental realizar a reposição dos nutrientes do solo por meio de um manejo adequado da adubação, bem como corrigir sua acidez, assegurando um ambiente propício para o desenvolvimento das plantas (Souza, 2019). Observando o contexto global atual, é evidente a dependência do Brasil em relação aos fertilizantes minerais importados, uma vez que a produção interna ainda não é suficiente para suprir a demanda (CNA, 2022). O Brasil é responsável por cerca de 8% do consumo global de fertilizantes, posicionando-se como o quarto maior consumidor mundial e a sua produção agrícola depende de 85% dos fertilizantes importados (ANDA, 2024). A crescente dependência externa do Brasil em relação aos fertilizantes estrangeiros, somada à elevação dos custos desses insumos, tem gerado

preocupações no setor agrícola nacional, levando à busca por fontes alternativas de nutrientes e otimização do manejo de adubação das lavouras (MAPA, 2022).

O lodo de esgoto (LE), proveniente das Estações de Tratamento de Esgotos Sanitários (ETEs), é um resíduo urbano rico em MO e nutrientes para as plantas (Nascimento et al., 2020; Chagas *et al.*, 2021). Devido a essas características, o LE pode ser reaproveitado na produção de fertilizantes orgânicos, podendo atuar de maneira semelhante a um condicionador de solos agrícolas, contribuindo para a melhoria da fertilidade e da estrutura do solo (Bloem et al., 2017; Costa et al., 2018). No entanto, a utilização do LE na agricultura requer cuidados, pois ele pode conter patógenos, metais pesados e compostos orgânicos tóxicos, que representam riscos à saúde humana e ao meio ambiente (Kacprzak, *et al.*, 2017; Grobelak, *et al.*, 2019). Apesar disso, este material pode ser uma fonte orgânica promissora para a produção de FOM. Os FOM são obtidos pela combinação de fertilizantes minerais simples com resíduos orgânicos de origem animal ou vegetal, regulados no Brasil pela instrução normativa (IN) nº 61/2020 (Brasil, 2020). A formulação dos fertilizantes organominerais permite ajustar a dose de aplicação conforme as exigências nutricionais das culturas e as características químicas de fertilidade dos solos (Magela *et al.*, 2019).

A adoção de práticas que promovam a adição de materiais orgânicos, como o uso de FOM, desempenha um papel crucial na melhoria das propriedades físico-químicas do solo (Yu *et al.*, 2013; Wu *et al.*, 2020). Devido a liberação lenta de parte dos nutrientes a medida em que é mineralizado, o uso de FOM têm se mostrado mais vantajoso, permitindo o seu melhor aproveitamento pelas plantas, principalmente em relação ao N e fósforo (P) (Barcelos *et al.*, 2019; Magela *et al.*, 2019). Portanto, a adoção de práticas que incluam o uso de FOM representa uma estratégia promissora para aumentar a ecoeficiência dos sistemas agrícolas, contribuindo para a sustentabilidade e a produtividade das culturas (Silva, 2021).

Diante da crescente necessidade de adotar práticas agrícolas mais sustentáveis, objetivou-se com este estudo, investigar a adubação de FOM à base de resíduo urbano, especialmente LE, na cultura da soja na região do Cerrado. Os resultados desta pesquisa poderão contribuir com recomendações agronômicas, principalmente no que tange à frequência e à eficiência de uso de FOM na agricultura tropical, com o intuito de melhorar a eficiência de fontes minerais. Assim, espera-se otimizar as práticas de adubação, estabelecer critérios para a utilização das formas físicas dos FOM e melhorar a fertilidade do solo, a produtividade das culturas e a sustentabilidade agrícola, ao mesmo tempo em que se favorece a destinação ambientalmente adequada do LE.

Este estudo está alinhado com a ‘Agenda 2030’ da ‘Organização das Nações Unidas’ (ONU) para promover os ‘Objetivos de Desenvolvimento Sustentável’ (ODS), além de possuir aderência às áreas tecnológicas prioritárias para o desenvolvimento sustentável e para a qualidade de vida – MCTIC no 1.122/2020 e no 1.329/2020, “Tecnologias para o Desenvolvimento Sustentável: Tratamento e Reciclagem de Resíduos Sólidos” e “Tecnologias para Qualidade de Vida: Saneamento Básico”.

Com base no exposto, estabelecemos para esta pesquisa, as seguintes hipóteses: o N presente no FOM à base de LE influencia na nodulação das plantas interferindo diretamente no acúmulo desse nutriente. Todavia, haverá suprimento de N durante toda a demanda da cultura, promovendo adequado rendimento da soja, bem como resultará em melhores resultados de componentes morfológicos e de produção e produtividade. Para tal, avaliamos a nodulação, o acúmulo de N, os componentes morfológicos e de produção e a produtividade de grãos de soja adubada por dois anos consecutivos com FOM à base de LE em solo da região do Cerrado.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 IMPORTÂNCIA DA CULTURA DA SOJA PARA O BRASIL

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) originou-se na Manchúria, região nordeste da China, onde seu cultivo e importância socioeconômica remontam a milênios antes de Cristo. Foi uma das primeiras culturas domesticadas que teve um impacto profundo na alimentação e nos sistemas agrícolas da Ásia Oriental (Gomes *et al.*, 2020; Silveira; Pereira, 2021). Sua expansão para o Ocidente, principalmente para as Américas, ocorreu ao longo dos séculos XIX e XX, quando a soja passou a ser crucial para as economias agrícolas e alimentares globais, destacando-se como uma fonte chave de óleo e proteína vegetal (Moreira *et al.*, 2022). O cultivo de soja também reformulou práticas agrícolas em diversas regiões do mundo, com destaque para o Brasil, que hoje é o maior produtor e exportador mundial da oleaginosa. Esse sucesso no setor agrícola brasileiro tem gerado grande impacto no comércio global de grãos e seus derivados, além de ser um pilar importante para o fortalecimento econômico do país (Gonçalves *et al.*, 2023).

A soja é a principal cultura agrícola brasileira, respondendo por cerca de 50% da produção de grãos no país. Sua relevância vai além do campo, influenciando diretamente a balança comercial, a geração de empregos e o abastecimento interno e externo de proteína e óleo vegetal. A cadeia da soja é estratégica para a segurança alimentar global e para a sustentabilidade econômica do agronegócio nacional (Castro, 2024). A soja ocupa posição estratégica no agronegócio brasileiro, sendo a principal cultura agrícola em termos de área plantada, produção e valor de exportação. De acordo com o último levantamento, na safra 2024/25, a área plantada de soja no Brasil alcança 47,5 milhões de hectares, com uma produtividade média de 3.533 kg ha⁻¹, o que representa um aumento de aproximadamente 10,4% em relação à safra anterior. Os principais estados produtores de soja, são o Mato Grosso com 27,8% da produção nacional, seguido por Paraná e Rio Grande do Sul, com 12,5% e 12,3%, respectivamente. Esse crescimento consolidou o Brasil como o maior produtor e exportador mundial da oleaginosa (CONAB, 2025).

O crescimento da produtividade da soja no Brasil se deve a diversos elementos, como o avanço das tecnologias agrícolas, o uso de variedades adaptadas às condições locais e a prática de manejo eficaz do solo e da nutrição das plantas, que proporcionam aumentos substanciais na produção (Nepomuceno, 2023). Além disso, a expansão da soja sobre áreas de pastagens degradadas tem permitido o crescimento da produção sem necessariamente

promover o desmatamento, especialmente no Cerrado brasileiro (FPA, 2021). Com a soja ocupando um papel central na economia nacional, o futuro da cultura está diretamente ligado à busca constante por inovações que otimizem a produtividade e garantam a sustentabilidade do setor no longo prazo (CONAB, 2025).

2.2 SOLOS DO CERRADO NA PRODUÇÃO DE GRÃOS NO BRASIL

O Cerrado, que ocupa cerca de 23,9% do território nacional, é o segundo maior bioma do Brasil, concentrando-se predominantemente na região central (ICMBIO, 2024). Esse bioma desempenha um papel crucial na produção agrícola do país, respondendo por cerca de 60% da produção nacional, especialmente com as culturas da soja, milho e algodão (IPAM, 2024). Entre 1985 e 2020, a área dedicada à agricultura no Cerrado cresceu significativamente, com um aumento de 450%, saltando de 4 milhões para quase 25 milhões de hectares (Silva *et al.*, 2021). Este crescimento reafirma a importância estratégica do Cerrado no agronegócio brasileiro, sendo fundamental não apenas para a economia interna, mas também para a segurança alimentar global (Embrapa, 2024).

Apesar de o Cerrado brasileiro concentrar grande parte da produção de grãos do país, destacando-se como a principal região produtora devido à ampla disponibilidade de terras, condições climáticas favoráveis e elevado nível de mecanização agrícola (Vilela *et al.*, 2021), seus solos apresentam limitações significativas, são altamente intemperizados, com elevada acidez ativa, trocável e potencial, baixos teores de MO, reduzida capacidade de troca de cátions (CTC) e escassa reserva de macro e micronutrientes (WRB, 2006; Santos *et al.*, 2018). Além disso, a adoção de práticas como a correção da acidez, o uso de cultivares adaptadas e a implementação de tecnologias agrícolas inovadoras contribuem para a maximização da produtividade, tornando esses solos mais eficientes na produção agrícola e garantindo a sustentabilidade das culturas (Bonini *et al.*, 2015).

2.3 O USO DE FERTILIZANTES NO BRASIL

O Brasil se destaca como um dos principais produtores e exportadores de *commodities* agrícolas do mundo, ocupando posição de liderança na produção de soja, milho, café, carne bovina e aves, entre outros produtos. Esse protagonismo no agronegócio está diretamente ligado à disponibilidade de terras agricultáveis e ao avanço de tecnologias de manejo do solo e da fertilidade. No entanto, para sustentar esse nível de produção e garantir competitividade

no mercado internacional, é fundamental adotar práticas que assegurem o uso eficiente e sustentável dos recursos naturais, especialmente do solo, base de toda a atividade agrícola (Embrapa, 2020; Mapa, 2022).

O solo é um recurso essencial para o desenvolvimento das plantas e a produção de alimentos, fibras e energia, além de desempenhar funções ecológicas essenciais, como a ciclagem de nutrientes, o armazenamento de água e o sequestro de carbono (C), fundamentais para o equilíbrio ambiental (FAO, 2015; Keesstra *et al.*, 2016). Para garantir sua produtividade a longo prazo, é crucial que seu uso seja racional e sustentável, adotando práticas de manejo que conservem suas propriedades e promovam a reposição adequada de nutrientes (Calegari *et al.*, 2017; Silva; Mendonça, 2017). Isso é de suma importância em regiões tropicais, como o Brasil, onde os solos possuem baixa fertilidade natural e alta acidez (Embrapa, 2018; Oliveira *et al.*, 2019).

Apesar de seu grande potencial agrícola, o Brasil enfrenta desafios para suprir toda a sua demanda interna por fertilizantes, tornando-se altamente dependente do mercado externo. Em 2024, o país importou 44,3 milhões de toneladas de fertilizantes, marcando um aumento de 8,3% em relação ao ano anterior (Conab, 2025). Essa dependência coloca o Brasil em uma posição vulnerável, especialmente em momentos de instabilidade no mercado internacional, como variações nos preços globais, questões logísticas e conflitos entre os grandes produtores de fertilizantes (FAO, 2020). Além disso, o volume crescente de importações desses insumos aumenta os custos de produção, afetando a competitividade do setor agrícola nacional (Embrapa, 2021). Por conseguinte, o uso de fontes alternativas é cada vez mais necessário, com o objetivo de reduzir os custos e promover a sustentabilidade ambiental (Almeida; Silva, 2009; Silva *et al.*, 2022). Além disso, diminuir a dependência do Brasil em relação à importação de fertilizantes é crucial para fortalecer a competitividade da agricultura nacional no cenário internacional (Higashikawa *et al.*, 2022). O Plano Nacional de Fertilizantes (PNF, 2023), aprovado em 2023, visa reduzir essa dependência, estabelecendo metas para aumentar a produção nacional de fertilizantes e promover práticas agrícolas sustentáveis.

2.4 LODO DE ESGOTO

O crescimento urbano desordenado e o consequente aumento da poluição dos recursos hídricos intensificaram a necessidade do tratamento adequado dos esgotos sanitários. Nesse contexto, a implantação de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) tem se consolidado como a principal estratégia para mitigar a carga poluidora lançada nos mananciais. Como

subproduto desse processo, é gerado o LE (Oliveira., 2021), que é um resíduo semissólido resultante do tratamento dos esgotos ou das águas residuárias cuja composição, predominantemente orgânica, varia em função da sua origem e do sistema de tratamento do esgoto (Berton; Nogueira, 2010). No Brasil, a produção anual de LE seco varia entre 150 e 220 mil toneladas, segundo estimativas (Regitano; Rodrigues; Martins, 2021). Devido ao grande volume gerado diariamente, o LE tornou-se uma preocupação crescente, principalmente na sua destinação final e aos possíveis impactos ambientais associados ao seu descarte inadequado (Ferreira et al., 2020). podendo causar poluição do solo e de mananciais, efeitos negativos sobre a biota e riscos à saúde humana (Rastetter; Gerhardt, 2017). Os agentes patogênicos e os metais pesados (Hg, Zn, Ni, Cr, Fe, Cd, Co e Pb), que podem estar contidos no LE são os principais motivos que causam preocupação no uso desse resíduo em culturas de interesse agrônômico (Pedrosa *et al.*, 2017).

O uso agrícola do LE agrícola é foco de diversas pesquisas, com o objetivo de alinhar sua disposição final ambientalmente adequada com a fertilidade do solo. A sua aplicação vem sendo estudada em diversas culturas, incluindo: cana-de-açúcar, eucalipto, feijão, soja, sorgo, milho, feijão, girassol e trigo (Berton; Nogueira, 2010).

O LE apresenta elevado potencial agrônômico, podendo ser utilizado na agricultura tanto como fonte de nutrientes, servindo de matéria-prima para a produção de fertilizantes orgânicos, contribuindo para a melhoria das propriedades do solo (Católico *et al.*, 2015). Comprovadamente, o LE é considerado uma fonte relevante de MO, pela sua capacidade de melhorar as propriedades químicas e físicas do solo ao favorecer a estabilidade dos agregados na superfície, aumento da retenção de umidade do solo, infiltração e permeabilidade, além de fornecer P e N dentre outros nutrientes em teores menores (Sampaio *et al.*, 2012), melhorando a fertilidade do solo (Ferraz *et al.*, 2016).

2.5 FERTILIZANTE ORGANOMINERAL A PARTIR DE LODO DE ESGOTO

Os solos brasileiros, em sua maioria, apresentam fertilidade natural limitada, o que resulta em uma forte dependência de corretivos de acidez e fertilizantes para sustentar a produção agrícola em larga escala (Lopes e Guilherme, 2016). A crescente conscientização sobre os impactos ambientais e econômicos desses insumos tem motivado a busca por fontes alternativas que ofereçam nutrientes de maneira mais sustentável, mas que seja atendida às necessidades das culturas (Magela *et al.*, 2019). Dentre as soluções mais promissoras, destacam-se os fertilizantes orgânicos, especialmente os FOM que combinam os benefícios ao

obter quantidade significativa de nutrientes e MO. Essa associação favorece a melhoria da fertilidade e da estrutura do solo, além de representar uma prática alinhada aos princípios da agricultura sustentável (Souza *et al.*, 2020; Santos *et al.*, 2023).

Os FOM desempenham um importante papel no aumento da eficiência de fertilizantes minerais e garantir adequada disposição final de resíduos. A dependência do Brasil em relação à importação de fertilizantes, torna ainda mais urgente a busca por alternativas mais sustentáveis e econômicas, como o uso de FOM. Além disso, do ponto de vista ambiental, os FOM oferecem vantagens em relação aos fertilizantes minerais convencionais. Estudos indicam que a aplicação de FOM contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), como o óxido nitroso (N_2O), um potente GEE, que pode ser emitido a partir da aplicação de fertilizantes nitrogenados (Gomes *et al.*, 2020).

Os FOM representam uma tecnologia promissora em relação à fertilização mineral convencional, pois combinam nutrientes advindos de matérias-primas minerais e orgânicas, de origem animal ou vegetal. Essa combinação proporciona benefícios ambientais e agrônômicos, com o aumento da retenção de umidade e a liberação gradual de nutrientes para as plantas, além de reduzir perdas por lixiviação, volatilização e fixação (Tiritan *et al.*, 2012; Borsari, 2013; Almeida; Almeida, 2018; Silva *et al.*, 2021; Higashikawa *et al.*, 2022). No Brasil, os FOM são regulamentados pela Instrução Normativa nº 61/2020 (Brasil, 2020), sendo considerados uma alternativa sustentável, que favorece a nutrição vegetal e a conservação dos solos. Nesse contexto, o LE resultante do tratamento dos esgotos ou das águas residuárias de ser uma fonte orgânica promissora para o desenvolvimento e produção de FOM.

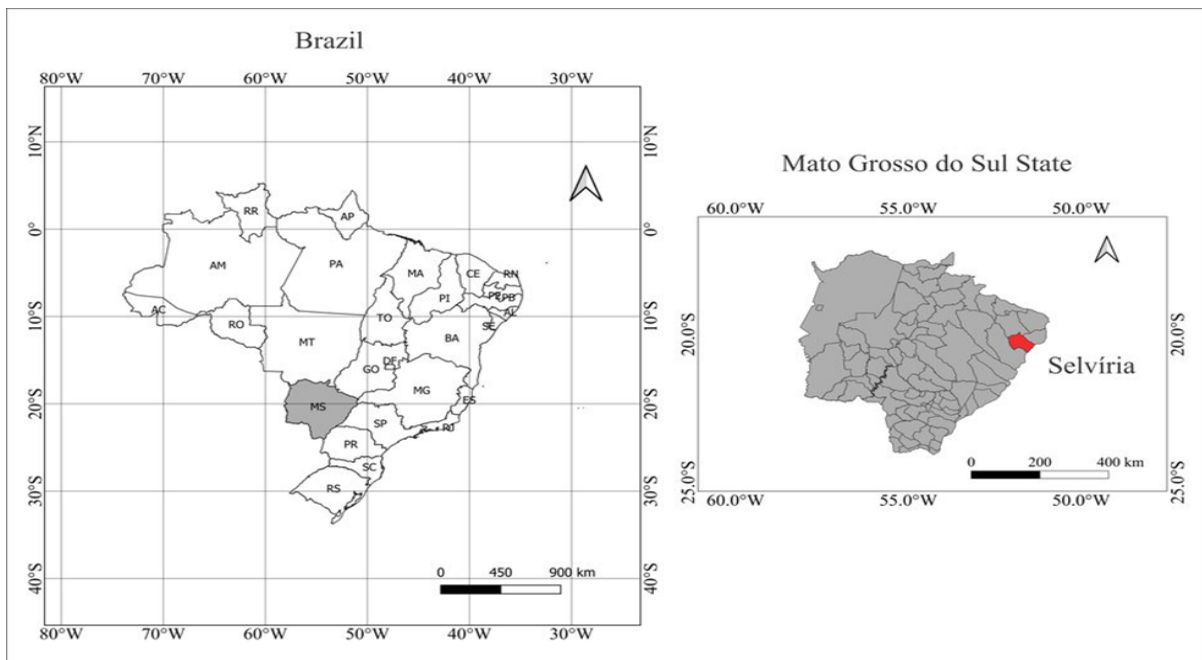
A aplicação de FOM à base de LE tem sido associada à melhoria da microbiota do solo e ao aumento da eficiência no uso dos nutrientes pelas plantas, promovendo maior produtividade agrícola sem comprometer a qualidade ambiental (Costa *et al.*, 2022; Cunha *et al.*, 2023). Em comparação aos fertilizantes minerais, os FOM apresentam melhor desempenho, principalmente devido à liberação lenta e gradual de nutrientes para as plantas (Barcelos *et al.*, 2019). Dessa forma, a adoção dessa tecnologia representa uma estratégia viável e promissora para a agricultura tropical, especialmente em regiões com solos de baixa fertilidade natural, como os solos do Cerrado.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

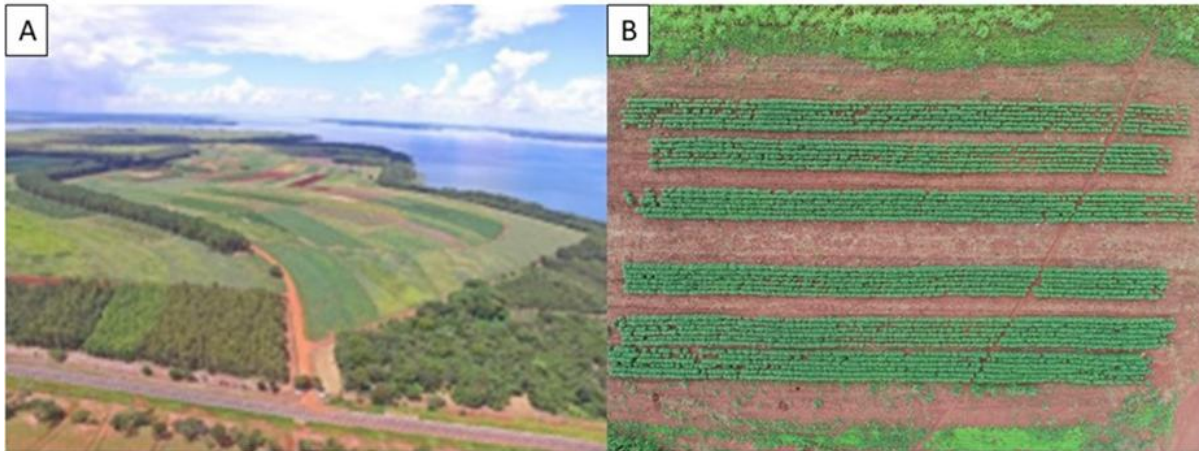
O experimento foi realizado em condições de campo, nos anos agrícolas 2021/22 e 2022/23, em área experimental do Setor de Produção Vegetal da Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão (FEPE) pertencente à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, da UNESP, no município de Selvíria ($20^{\circ}20'35''$ S e $51^{\circ}24'04''$ W), estado do Mato Grosso do Sul, Brasil, com altitude de 358 m (Figuras 1 e 2).

Figura 1. Local de estudo: município de Selvíria, MS, Brasil.



Fonte: Elaborado pelo autor.

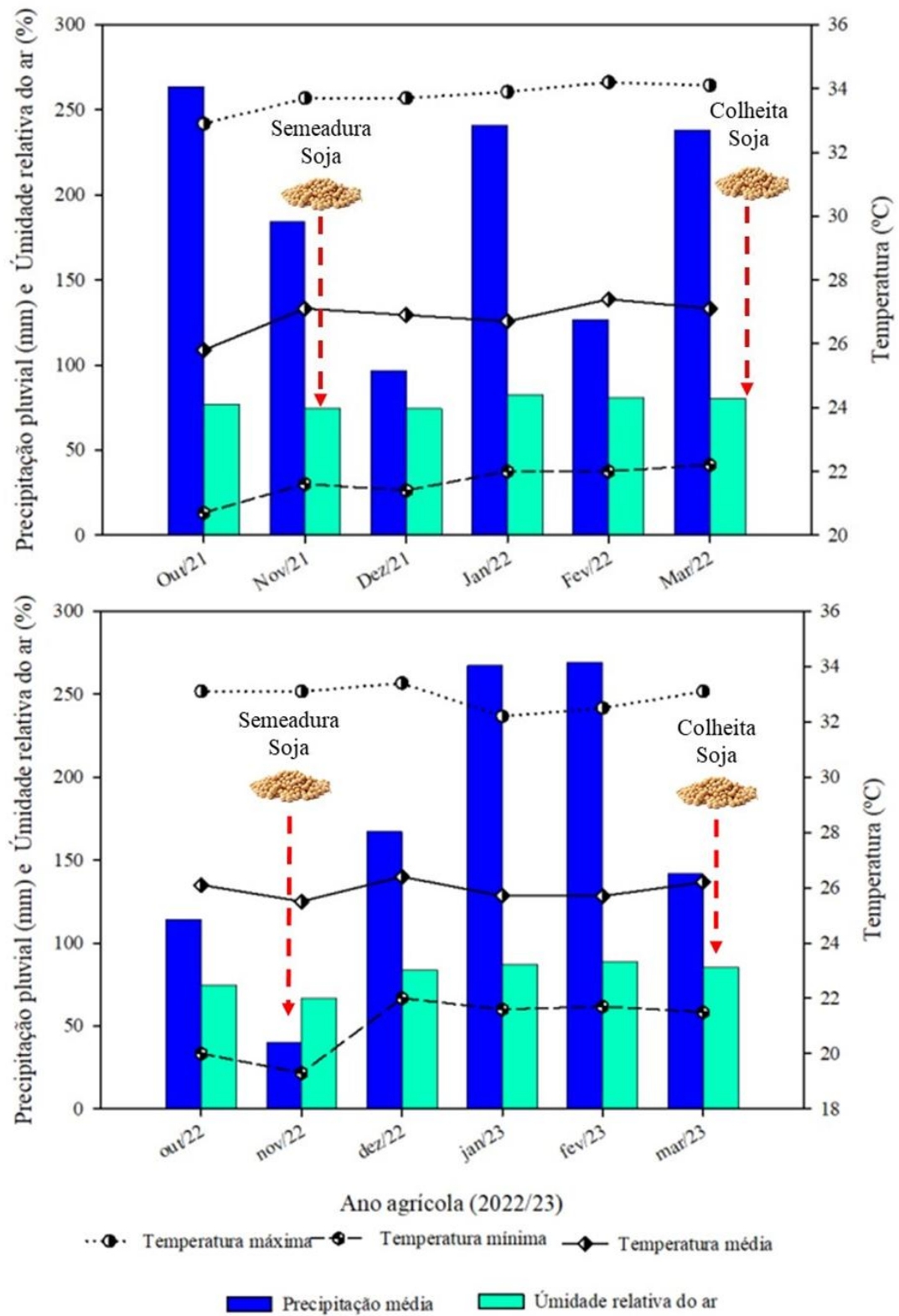
Figura 2. Fazenda de Ensino Pesquisa e Extensão (FEPE) da FEIS/UNESP (A) e vista aérea das unidades experimentais onde foi desenvolvida a pesquisa (B).



Fonte: GENAFERT/UNESP.

A região apresenta médias anuais de: precipitação pluvial de 1.370 mm, temperatura média de 24,5 °C e umidade relativa do ar de 75%. O tipo climático da região é o Aw segundo classificação de Köppen e Geiger (1936), caracterizado por verões chuvosos e invernos secos (Lombardi Neto; Drugowich, 1994). Durante toda a realização do experimento foram coletados os dados diários referentes às temperaturas máxima e mínima, umidade relativa do ar e precipitação pluvial (Figura 3).

Figura 3. Precipitação pluvial, umidade relativa do ar, temperaturas média, máxima e mínima obtidas durante o cultivo da cultura da soja em Selvíria, Mato Grosso do Sul, Brasil, anos agrícolas 2021/22 e 2022/23. Dados obtidos da Estação Agrometeorológica Clima da UNESP, câmpus de Ilha Solteira, SP.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por meio do levantamento detalhado realizado por Demattê (1980) e utilizando-se o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (Santos et al., 2018), o solo da área experimental foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico argiloso, o qual era mantido em pousio na segunda safra e cultivado com milho na primeira safra, em sistema convencional, sem irrigação, por aproximadamente 10 anos. Antes da instalação do experimento foram coletadas amostras de solo da camada 0–0,2 m, a fim de realizar a caracterização física (Teixeira *et al.*, 2017) e química (Raij *et al.*, 2001) (Tabela 1).

Tabela 1. Caracterização dos atributos químicos⁽¹⁾ e físicos⁽²⁾ do solo utilizado no experimento (Média $\pm$ desvio padrão, $n = 4$).

Atributos	Unidade	Profundidade (m)
pH (CaCl ₂)	-	5,2 $\pm$ 0,2
Matéria orgânica	g dm ⁻³	19 $\pm$ 1,4
P	mg dm ⁻³	16 $\pm$ 3,7
K	mmolc dm ⁻³	2,1 $\pm$ 0,6
Ca	mmolc dm ⁻³	14 $\pm$ 1,8
Mg	mmolc dm ⁻³	13 $\pm$ 1,0
Alumínio	mmolc dm ⁻³	1 $\pm$ 1,0
H+Al	mmolc dm ⁻³	30 $\pm$ 3,8
SB	mmolc dm ⁻³	29,1 $\pm$ 2,8
S-SO ₄	mg dm ⁻³	5 $\pm$ 1,0
CTC	mmolc dm ⁻³	59,4 $\pm$ 3,9
V	%	49 $\pm$ 5,0
B	mg dm ⁻³	0,33 $\pm$ 0,1
Cu (DTPA)	mg dm ⁻³	1,6 $\pm$ 0,1
Fe (DTPA)	mg dm ⁻³	46 $\pm$ 9,0
Mn (DTPA)	mg dm ⁻³	20,6 $\pm$ 3,2
Zn (DTPA)	mg dm ⁻³	0,9 $\pm$ 0,1
Areia (> 0,05 mm)	g kg ⁻¹	550 $\pm$ 13
Silte (> 0,002 e < 0,05 mm)	g kg ⁻¹	80 $\pm$ 3
Argila (< 0,002 mm)	g kg ⁻¹	370 $\pm$ 19
Textura	-	Argilosa

⁽¹⁾ Raij et al. (2001). ⁽²⁾ Teixeira et al. (2017). SB = Soma de bases. CTC = Capacidade de troca catiônica.

V = Saturação por bases.

Fonte: GENAFERT/UNESP.

No ano agrícola 2021/22, foram cultivadas na 1ª safra a soja e na 2ª safra a cultura do milho (*Zea mays* L.). Na sequência, foi instalado o sistema plantio direto (SPD), no qual foram cultivados em 2022/23 as mesmas culturas em sucessão, soja (1ª safra) e milho (2ª safra).

Avaliou-se os seguintes atributos químicos: Ca e Mg trocáveis e P disponível (extração pela resina de troca iônica e quantificação por espectrofotometria de

absorção atômica), pH (CaCl_2 0,01 mol L^{-1}), H+Al, Al trocável (extração via KCl e quantificação por titulação com NaOH), S-SO_4^{-2} (extração por solução de fosfato de cálcio e quantificação por turbidimetria), Cu, Zn, Mn, Fe (método DTPA a pH 7,3 e quantificação por espectrofotometria de absorção atômica), B (extração com solução de cloreto de bário no micro-ondas e quantificação por colorimetria), (MO) e (combustão). Os atributos químicos do solo, soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions potencial (CTC pH 7,0) e saturação por bases (V), foram calculados. Os atributos físicos areia total, silte e argila, além da densidade do solo, também foram avaliados.

3.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS

Adotou-se o delineamento experimental em blocos ao acaso, com nove tratamentos e quatro repetições, totalizando 36 unidades experimentais. Os tratamentos foram originados de esquema fatorial $3 \times 2 + 3$, sendo: três formas físicas de FOM (farelada, granulada e peletizada), duas doses do FOM (70% e 100% da dose estabelecida para a adubação mineral com base no teor de P_2O_5), somado a três tratamentos adicionais: i) fertilizante mineral (FM) KCL e MAP (100% da dose do FOM), ii) aplicação de lodo de esgoto (LE) e iii) controle absoluto (CT, sem adição de FOM, FM e LE). A dose de 70% foi estabelecida com base em ensaio preliminar em casa de vegetação, a qual permitiu o desenvolvimento das plantas de soja de forma similar à 100% da fertilização mineral (Rodrigues *et al.*, 2021).

3.3 OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO LODO DE ESGOTO

O lodo de esgoto (LE) foi obtido na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), localizada em São José do Rio Preto, SP. Como amostra representativa para a formulação do FOM, foram utilizados aproximadamente 900 kg de LE. Este apresenta níveis elevados de Ni e Zn devido a sua origem urbana e industrial, no qual o processo de tratamento é do tipo lodos ativados convencionais. Após ser seco ao ar sobre lona plástica, ao atingir 8% de umidade, o material foi seco em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C durante 48 h e moído a um pó fino (<2 mm), o qual foi determinado: pH (CaCl_2 0,01 mol L^{-1}), umidade (60–65 °C), densidade, carbono orgânico (combustão), teores totais de N (Kjeldahl), P (P_2O_5 , determinação por espectrofotômetro do ácido molibdovanadofosfórico), K (K_2O), Na (fotometria de chama), S (gravimetria de sulfato de bário), B (espectrofotometria da

azometina-H), Ca, Mg, Cu, Mn, Zn e Fe (extração com HCl e determinação via espectrofotômetro de absorção atômica), com cálculos subsequentes da relação C/N e CTC (MAPA, 2017). Também foram determinados os teores de matéria orgânica total (MO, via combustão) (Alcarde, 2009) (Tabela 2).

Tabela 2. Composição física e química do lodo de esgoto (LE) da Estação de Tratamento de Esgoto (ETEs) de São José do Rio Preto, SP.

Parâmetros	Unidade	Valores
pH (CaCl ₂)	-	4,9
pH (H ₂ O)	-	5,4
Densidade ⁽¹⁾	g cm ⁻³	0,93
Resíduo mineral total	%	34,9
Umidade ⁽¹⁾	%	6,1
Matéria orgânica	g kg ⁻¹	625,7
Carbono orgânico	g kg ⁻¹	335,7
N	g kg ⁻¹	55,0
C/N ⁽¹⁾	g kg ⁻¹	6
P ₂ O ₅ total	g kg ⁻¹	30,0
P ₂ O ₅ Solúvel ⁽²⁾	g kg ⁻¹	26,0
K ₂ O	g kg ⁻¹	1,3
Ca	g kg ⁻¹	19,4
Mg	g kg ⁻¹	3,4
S	g kg ⁻¹	1,0
B	mg kg ⁻¹	44,7
Fe	mg kg ⁻¹	23,000
Mn	mg kg ⁻¹	144
CTC ⁽³⁾	mmol _c kg ⁻¹	380
CRA ⁽³⁾	%	78,71
CE ⁽³⁾	mS cm ⁻¹	7,35

⁽¹⁾Valores em base úmida; ⁽²⁾P₂O₅solúvel foi extraído com citrato neutro de amônio + água; ⁽³⁾ CTC = Capacidade de troca de cátions. CRA = Capacidade de retenção de água. CE = Condutividade elétrica.

Fonte: GENAFERT/UNESP.

3.4 PREPARO DA FORMULAÇÃO DO FERTILIZANTE ORGANOMINERAL

A formulação do FOM foi feita de acordo com a Instrução Normativa (IN) nº 61 de 2020 (Brasil, 2020), no qual: *i*) carbono orgânico: mínimo de 8%; *ii*) umidade máxima: 20%; e CTC mínima: 80 mmol_c kg⁻¹. De acordo com os resultados analíticos do LE, o FOM foi formulado e complementado com fertilizantes minerais simples. A mistura farelada foi utilizada na elaboração das formas físicas granulada e peletizada. A granulação foi feita com uso de misturador-granulador de alta intensidade, em que em ensaios anteriores foram

definidas a granulometria ideal das matérias-primas na formação dos grânulos. A peletização foi feita em peletizadora CHV, com 7,5 HP de potência. Por fim, as formas físicas foram caracterizadas de forma similar ao LE, as quais foram determinados os parâmetros de interesse agrônômico (Brasil, 2017) (Tabela 3) e os metais pesados presentes no fertilizante (Tabela 4).

Tabela 3. Caracterização dos parâmetros de interesse agrônômico no fertilizante organomineral (FOM) a partir de lodo de esgoto⁽¹⁾. (Média $\pm$ desvio-padrão, $n = 4$).

Parâmetro	Farelado	Granulado	Peletizado
pH (CaCl ₂)	4,7 $\pm$ 0,1	4,7 $\pm$ 0,1	4,6 $\pm$ 0,10
Densidade (g cm ⁻³)	0,89 $\pm$ 0,01	0,89 $\pm$ 0,01	0,87 $\pm$ 0,01
Umidade (%)	2,01 $\pm$ 0,14	2,12 $\pm$ 0,01	1,93 $\pm$ 0,35
MO (%)	43,2 $\pm$ 0,6	43,9 $\pm$ 1,1	43,0 $\pm$ 0,21
C org (%)	24,0 $\pm$ 0,31	24,4 $\pm$ 0,61	23,9 $\pm$ 0,11
N total (%)	4,06 $\pm$ 0,15	4,12 $\pm$ 0,07	4,05 $\pm$ 0,10
C/N	6 $\pm$ 0,0	6 $\pm$ 0,0	6 $\pm$ 0,0
P ₂ O ₅ total (%)	10,2 $\pm$ 1,2	8,8 $\pm$ 0,2	10,0 $\pm$ 0,3
P ₂ O ₅ CNA+água(%)	9,7 $\pm$ 0,2	8,1 $\pm$ 0,2	9,0 $\pm$ 0,3
K ₂ O total (%)	10,0 $\pm$ 0,4	8,1 $\pm$ 0,2	8,0 $\pm$ 0,6
K ₂ O água (%)	9,7 $\pm$ 0,8	8,9 $\pm$ 0,7	8,6 $\pm$ 0,7
Ca total (%)	2,9 $\pm$ 0,05	2,9 $\pm$ 0,23	3,0 $\pm$ 0,18
Mg total (%)	1,9 $\pm$ 0,03	1,8 $\pm$ 0,05	1,8 $\pm$ 0,09
S total (%)	0,57 $\pm$ 0,07	0,58 $\pm$ 0,07	0,61 $\pm$ 0,00
Cu total (mg kg ⁻¹)	163,6 $\pm$ 5,77	180,0 $\pm$ 10,00	173,3 $\pm$ 15,3
Fe total (mg kg ⁻¹)	12643,3 $\pm$ 471,73	14126,7 $\pm$ 1245,00	14143,3 $\pm$ 752,68
Mn total (mg kg ⁻¹)	346,7 $\pm$ 11,55	333,3 $\pm$ 15,28	340,0 $\pm$ 17,32
Zn total (mg kg ⁻¹)	626,7 $\pm$ 35,12	710,0 $\pm$ 70,00	680,0 $\pm$ 36,64
B total (mg kg ⁻¹)	273,3 $\pm$ 25,14	246,7 $\pm$ 5,77	240,0 $\pm$ 20,0
Na (mg kg ⁻¹)	2740,0 $\pm$ 52,92	2536,7 $\pm$ 28,87	2580,0 $\pm$ 72,11
CTC (mmol _c dm ⁻³)	180 $\pm$ 20	183,3 $\pm$ 5,8	153,3 $\pm$ 32,1
CRA (%)	95,7 $\pm$ 1,2	94,7 $\pm$ 1,2	112,0 $\pm$ 1,6
CE (mS cm ⁻¹)	69,9 $\pm$ 5,4	58,7 $\pm$ 4,2	62,3 $\pm$ 5,9

⁽¹⁾Formulação do FOM: 4-8-8.

*CRA = Capacidade de Retenção de Água.

Os fertilizantes minerais e formas físicas do FOM, a base de lodo de esgoto, podem ser visualizados na Figura 4.

Figura 4. Fertilizante organomineral a partir de lodo de esgoto nas formas físicas farelada (A), granulada (B) e peletizada (C).



Fonte: GENAFERT/UNESP.

Tabela 4. Teores de metais pesados no fertilizante organomineral (FOM) a partir de lodo de esgoto.

Elemento	FOM-F	FOM-G	FOM-P
	mg kg ⁻¹		
As	3,38	< 1	< 1
Cd	3,35	2,39	2,42
Pb	13,1	17,5	16,4
Cr ⁶⁺	< 0,4	<0,4	< 0,4
Hg	0,28	0,31	< 0,29
Ni	49,5	60,2	64,5
Se	< 1	<1	< 1

FOM-F: Fertilizante organomineral na forma física farelado. FOM-G: Fertilizante organomineral na forma física granulada. FOM-P: Fertilizante organomineral na forma física peletizado.

3.5 IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO

Cada unidade experimental teve 12 m² (4 m x 3 m), com espaçamento entrelinhas de 0,45 m. Foram descartadas as 4 linhas das extremidades a fim de minimizar efeitos de borda. As operações de pré-semeadura (calagem, gessagem e preparo de solo) foram realizadas em setembro de 2021, considerando a semeadura da soja e de acordo com os resultados da análise química do solo (Tabela 1). Assim, a área foi escarificada e nivelada. Com base nos resultados da avaliação de fertilidade do solo, foi aplicado 2,0 t ha⁻¹ de calcário dolomítico (PRNT = 90%), objetivando elevar a saturação por bases a 70% e, em seguida, a foi realizada a aplicação de 850 kg ha⁻¹ de gesso agrícola (Raij *et al.*, 1997).

O primeiro ciclo do presente estudo foi realizado no ano agrícola 2021/22, com a cultura da soja na 1ª safra. A semeadura da soja (cv. TMG 7063 IPRO) foi realizada em 23 de

novembro de 2021 (Figura 5). A escolha dessa cultivar se baseou em suas características predominantes, como elevado potencial produtivo, peso de grãos e maturação precoce, as quais o tornam bem-adaptado as condições da região. Para o tratamento de sementes, utilizou-se o inoculante líquido Masterfix (2 mL kg⁻¹ de semente) + Geo CoMo (200 mL ha⁻¹) + fungicida Derosal Plus (carbendazim + tiram). Em novembro de 2021, os tratamentos (FM, FOM e LE) foram aplicados manualmente no sulco de semeadura. Os fertilizantes foram dosados previamente por linha e aplicados a cerca de 5 cm de profundidade, sendo posteriormente cobertos com solo. A semeadura da soja foi realizada de forma mecanizada, a 3 cm de profundidade aproximadamente. A determinação da dose do FM foi baseada nas necessidades nutricionais da cultura da soja, levando em consideração a produtividade esperada de cultivar escolhida e os parâmetros relacionados à fertilidade do solo (Mascarenhas; Tanaka, 1997). No tratamento adicional com adubação mineral, foram aplicados no sulco de semeadura 60 kg ha⁻¹ de K₂O (via KCl) e 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (via MAP). Não houve aplicação de adubação de cobertura. Em relação as doses dos FOM e do LE, estas foram calculadas com base na necessidade de P₂O₅ pela cultura da soja. Foram aplicados 625 kg ha⁻¹ de FOM (formulação 4-8-8) e 2.200 kg ha⁻¹ de LE, ambos com o intuito de fornecer 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅.

Quanto ao segundo ciclo da pesquisa, também realizado com a cultura da soja em cultivo de 1ª safra, no ano agrícola 2022/23 em SPD. A semeadura da soja foi realizada em 21 de novembro de 2022. A cultivar de soja utilizada foi o HO Pirapó IPRO, caracterizada por alto teto produtivo, elevado peso de grãos e excelente engalhamento, além de ser resistente às principais doenças e nematóides (HO Genética, 2023). Para o tratamento de sementes, utilizou-se o inoculante líquido Masterfix (2 mL kg⁻¹ de semente) + Geo CoMo (200 mL ha⁻¹) + Standak Top. Em novembro de 2022, repetimos os mesmos tratamentos com (FM, FOM, LE e CT), sendo aplicados na mesma dose e do mesmo modo da safra anterior. Assim, os tratamentos da safra 2021/22 foram repetidos na safra 2022/23 do mesmo modelo.

O manejo fitossanitário foi realizado de acordo com as recomendações técnicas para o desenvolvimento da cultura da soja na região. Sempre que necessário foram aplicadas lâminas de água variando de 10–14 mm via irrigação suplementar fornecida via pivô central.

3.6 VARIÁVEIS AVALIADAS NO EXPERIMENTO

a) Matéria seca e nodulação

Foram avaliados a matéria seca das raízes e da parte aérea, o número de nódulos totais, o número de nódulos viáveis e a matéria seca de nódulos. Para tal, foram retiradas seis plantas de cada parcela na fase correspondente ao florescimento pleno (estádio R2) (Fehr; Caviness, 1977). As plantas foram separadas em parte aérea e raiz. Retirou-se todo o excesso de solo da raiz com auxílio de água e peneira para não haver perdas. Os nódulos foram retirados das raízes, contados e depois passados em peneira de 2 mm, os maiores que 2 mm foram cortados ao meio para observar a viabilidade dos mesmos (coloração avermelhada). Após esta última etapa, os nódulos foram acondicionados em sacos de papel, assim como a raiz e a parte aérea, e colocados em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C por 72h. (Matoso; Kusdra, 2014).

b) Acúmulo de N

Após secas e pesadas, as raízes e a parte aérea foram moídas em moinho tipo Willey com peneira de 40 mesh, e depois submetidas à digestão sulfúrica e destilação a vapor para a determinação dos teores de N (Malavolta *et al.*, 1997). Com base nos teores de N e na produção de matéria seca, foram calculadas as quantidades acumuladas do N.

c) Índice de clorofila Falker

No estágio de florescimento pleno (R2) (Fehr; Caviness, 1977), foi avaliado o teor relativo de clorofila nas folhas, utilizando o clorofilômetro portátil Falker (clorofiLOG, 43 modelo CFL 1030) (Falker, 2008), equipamento capaz de realizar medições instantâneas na folha por meio do índice ICF, avaliando-se 10 folhas por parcela, com leituras realizadas ao lado da nervura central das folhas totalmente expandidas (Barbieri Junior *et al.*, 2012) (Figura 6).

Figura 5. Avaliações fitotécnicas das plantas de soja no estágio R2, sendo: A) determinação do índice de clorofila falker; A) verificação da nodulação das raízes, e; C) Parte aérea de uma planta de soja, com destaque para o trifólio utilizado para avaliação da diagnose foliar.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

d) Componentes morfológicos e de produção e produtividade

Após a maturidade fisiológica (estádio R8) da cultura, foram realizadas as avaliações de altura de plantas e altura de inserção da primeira vagem (cm) na área útil, analisando-se 10 plantas aleatórias por parcela, medindo a distância do nível do solo ao ápice do primeiro trifólio e primeira inserção de vagens, respectivamente. No mesmo estágio fenológico, também foram avaliados os componentes de produção: população final de plantas, com a contagem do total de plantas na área útil, a massa de 1.000 grãos e a produtividade. Para estimar a produtividade de grãos, todas as plantas da área útil da parcela foram trilhadas mecanicamente, pesadas e, posteriormente, foram realizados os cálculos com extrapolação para kg ha^{-1} e corrigidos para o teor de 13% de umidade (base úmida). A avaliação da massa de 1.000 grãos foi obtida também por pesagem em balança digital de precisão com umidade corrigida para 13% (base úmida), após três repetições.

Figura 6. Grãos de soja para a obtenção da produtividade.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e o desdobramento da interação entre os fatores (formas físicas e doses do FOM). No caso de interação significativa pelo teste F ($p < 0,05$), as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%. Os tratamentos adicionais foram comparados utilizando o teste de Dunnett ($p < 0,05$). Os resultados foram analisados nos programas estatísticos AgroEstat (Barbosa; Maldonado Júnior, 2015) e R versão 4.0.1 (R core team, 2021), utilizando o procedimento para o modelo linear geral (GLM).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ÍNDICE DE CLOROFILA FALKER, ACÚMULO DE N E MATÉRIA SECA

Em relação ao ICF, não houve interação entre as formas físicas e as doses de FOM para os dois anos avaliados (Tabela 5). Também não houve diferença nos valores de ICF entre as formas de aplicação de FOM em ambos os anos de cultivo. No entanto, os maiores valores de ICF foram obtidos com a dose correspondente a 70% da recomendação, com incremento de 1% e 2%, respectivamente, para o 1º e o 2º ano agrícola (Tabela 5). No 1º ano, os tratamentos adicionais apresentaram diferenças, sendo que a aplicação de LE isoladamente resultou na maior média de ICF (40,60), destacando-se entre os demais tratamentos. De maneira geral, os maiores valores de ICF foram observados no 2º ano de cultivo, indicando um incremento nos teores de clorofila das plantas nesse período (Tabela 5). Tais resultados não divergem dos encontrados por Nakao (2015), que não encontrou influência da adubação com composto orgânico no ICF do feijoeiro, onde os valores variaram entre 38,17 e 41,17.

O ICF desempenha um importante papel como parâmetro para avaliar indiretamente o teor de clorofila, uma vez que está correlacionado com os teores de N na planta, e este nutriente faz parte da estrutura molecular da clorofila (Filla *et al.*, 2020). Verifica-se na literatura que plantas bem nutridas, em especial com N, possuem valores de ICF, no estágio R1, variando de 40,0 a 60,0 (Argenta *et al.*, 2001; Costa *et al.*, 2012). Os resultados obtidos corroboram com os resultados de Prates *et al.* (2020), onde os autores estudaram o desempenho agrônômico na sucessão soja-milho adubados com composto de lodo de esgoto (CLE) na região do Cerrado, e também não observaram incremento dos valores de ICF com a adubação do fertilizante orgânico, com doses variando de 10 a 25 t ha⁻¹. A ausência de aumento nos valores de ICF nos tratamentos com FOM pode estar relacionada à fixação biológica de N₂ (FBN), uma vez que todos os tratamentos receberam inoculação de microrganismos fixadores via semente, previamente à semeadura, o que contribui significativamente para o suprimento de N às plantas (Tabela 5).

Para a matéria seca da parte aérea (MSPA), matéria seca de raiz (MSR), acúmulo de N na parte aérea (ANPA) e acúmulo de N na raiz (ANR) da soja, não foi observado interação entre as formas físicas e as doses de FOM para o 1º e 2º ano agrícola (Tabela 5). No entanto, verificou-se que, em ambos os anos, a dose correspondente a 70% da recomendação de FOM apresentou os maiores valores médios percentuais em comparação à dose de 100%, com incrementos de 12% e 9% para MSPA, 5% e 3% para MSR, 14% e 11% para ANPA, e 16% e

3% para ANR, respectivamente para o 1º e o 2º ano agrícola (Tabela 5). Com relação às formas físicas de aplicação, apenas para a variável MSR no 2º ano de cultivo foi observada diferença. A aplicação na forma granulada resultou nos maiores valores, com média de 3,93 g planta⁻¹ (Tabela 5). Somente para o acúmulo de N na parte aérea (ANPA) foi observado que o 1º ano de cultivo apresentou médias superiores em comparação ao 2º ano. Com destaque para o tratamento com fertilizante mineral (FM), que resultou na maior média, com 75,05 mg planta⁻¹. Esses resultados podem ser explicados pela pronta disponibilidade do N adicionado via fertilizante mineral, enquanto a maior parte do N adicionado via FOM está na forma orgânica, oriunda do LE, sendo liberada gradualmente para as plantas à medida que ocorre a mineralização (Parker; Sommer, 1983; Kominko *et al.*, 2017).

O N é o nutriente mais exigido pela cultura da soja, sendo fundamental em muitas funções fisiológicas na planta, logo, é importante garantir um aproveitamento eficiente do nutriente pela cultura (Domingos *et al.*, 2015). A matriz orgânica associada aos fertilizantes minerais nos tratamentos com FOM pode ter contribuído para a melhoria dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo, promovendo melhor estruturação, maior retenção de água e maior eficiência na absorção de nutrientes (Souza *et al.*, 2020; Oliveira *et al.*, 2021). Esses fatores favoreceram o desenvolvimento do sistema radicular (Silva *et al.*, 2019). o que é evidenciado pelos maiores valores de MSPA e MSR no 2º ano de cultivo. Essa resposta pode estar relacionada à característica dos FOM de disponibilizarem os nutrientes de forma mais gradual em comparação ao fertilizante mineral, uma vez que a matriz orgânica proporciona liberação lenta e contínua dos nutrientes ao longo do ciclo da cultura, beneficiando especialmente o desenvolvimento do sistema radicular (Tabela 5). A adição de MO ao solo tende a melhorar a sua estrutura, permitindo melhor infiltração de água e aeração, o que contribui para um maior desenvolvimento das raízes (Cardoso; Oliveira 2002).

Tabela 5. Efeito dos tratamentos no índice de clorofila falker (ICF), na matéria seca da parte aérea (ANPA), na matéria seca da raiz (ANR), no acúmulo de nitrogênio na parte aérea (ANPA) e no acúmulo de nitrogênio na raiz (ANR) da cultura da soja.

Tratamento	ICF		MSPA		MSR		ANPA		ANR	
	g planta ⁻¹						mg planta			
Tratamentos adicionais	2021/22	2022/23	2021/22	2022/23	2021/22	2022/23	2021/22	2022/23	2021/22	2022/23
Controle ⁽¹⁾	37,63 [▲]	40,55 [▲]	10,79 [▲]	19,60 [▲]	1,45 [▲]	2,45 [▲]	66,11 [▲]	25,27 [▲]	3,52 [▲]	5,24 [▲]
Lodo de esgoto ⁽²⁾	40,60 [●]	42,12 [●]	11,79 [●]	21,15 [●]	1,66 [●]	2,33 [●]	73,41 [●]	29,02 [●]	3,32 [●]	4,86 [●]
Fertilizante mineral ⁽³⁾	40,33 [■]	40,80 [■]	11,83 [■]	20,17 [■]	1,75 [■]	2,52 [■]	75,05 [■]	25,27 [■]	3,69 [■]	5,32 [■]
Formas (F)										
FOM farelado	39,30 ^{▲●■}	40,70 ^{▲●■}	9,83 ^{▲●■}	22,10 ^{▲●■}	1,20 ^{▲●■}	3,66 ^{▲●■}	58,61 ^{▲●■}	27,01 ^{▲●■}	2,57 ^{▲●■}	5,37 ^{▲●■}
FOM granulado	40,15 ^{▲●■}	40,72 ^{▲●■}	9,68 ^{▲●■}	21,91 ^{▲■}	1,52 ^{▲●■}	3,93 ^{▲●■}	63,49 ^{▲●■}	28,47 ^{▲●■}	2,84 ^{▲●■}	4,98 ^{▲●■}
FOM peletizado	39,94 ^{▲●■}	41,91 ^{▲●■}	11,37 ^{▲●■}	22,37 ^{▲●■}	1,56 ^{▲●■}	2,93 ^{▲●■}	73,38 ^{▲●■}	31,70 ^{▲●■}	3,30 ^{▲●■}	5,73 ^{▲●■}
Doses (D)										
70%	40,00	41,44	10,97 ^{▲●■}	23,16	1,47 ^{▲●■}	3,56	70,08	30,72	3,16	5,44
100%	39,55	40,78	9,62 ^{▲●■}	21,09	1,39 ^{▲●■}	3,46	60,24	27,40	2,65	5,29
Teste F										
Tratamentos adicionais	5,86 ^{**}	0,98 ^{NS}	1,21 ^{NS}	0,13 ^{NS}	0,51 ^{NS}	0,17 ^{NS}	0,20 ^{NS}	0,47 ^{NS}	0,17 ^{NS}	0,30 ^{NS}
Formas (F)	0,87 ^{NS}	1,31 ^{NS}	0,55 ^{NS}	0,02 ^{NS}	1,67 ^{NS}	9,35 ^{**}	1,00 ^{NS}	1,20 ^{NS}	1,34 ^{NS}	1,37 ^{NS}
Doses (D)	0,76 ^{NS}	0,89 ^{NS}	0,86 ^{NS}	1,34 ^{NS}	0,23 ^{NS}	0,31 ^{NS}	1,29 ^{NS}	1,74 ^{NS}	1,95 ^{NS}	0,17 ^{NS}
F x D	0,23 ^{NS}	0,18 ^{NS}	1,21 ^{NS}	2,12 ^{NS}	0,48 ^{NS}	1,46 ^{NS}	0,39 ^{NS}	0,43 ^{NS}	2,90 ^{NS}	0,14 ^{NS}
CV (%)	3,40	4,16	33,30	20,33	28,38	15,14	27,36	21,91	20,52	17,08

⁽¹⁾ Ausência de adubação mineral ou orgânica. ⁽²⁾ Aplicação de 2,6 t ha⁻¹ de lodo de esgoto (base seca) visando o fornecimento de P. ⁽³⁾ Aplicação de 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅ conforme recomendação estabelecida por Raij et al. (1997). ** e ^{NS} – Significativo a 1% de probabilidade e não significativo, respectivamente. ▲, ●, ■ Médias seguidas pelo mesmo símbolo não diferem entre si pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade.

4.2 NODULAÇÃO DA SOJA

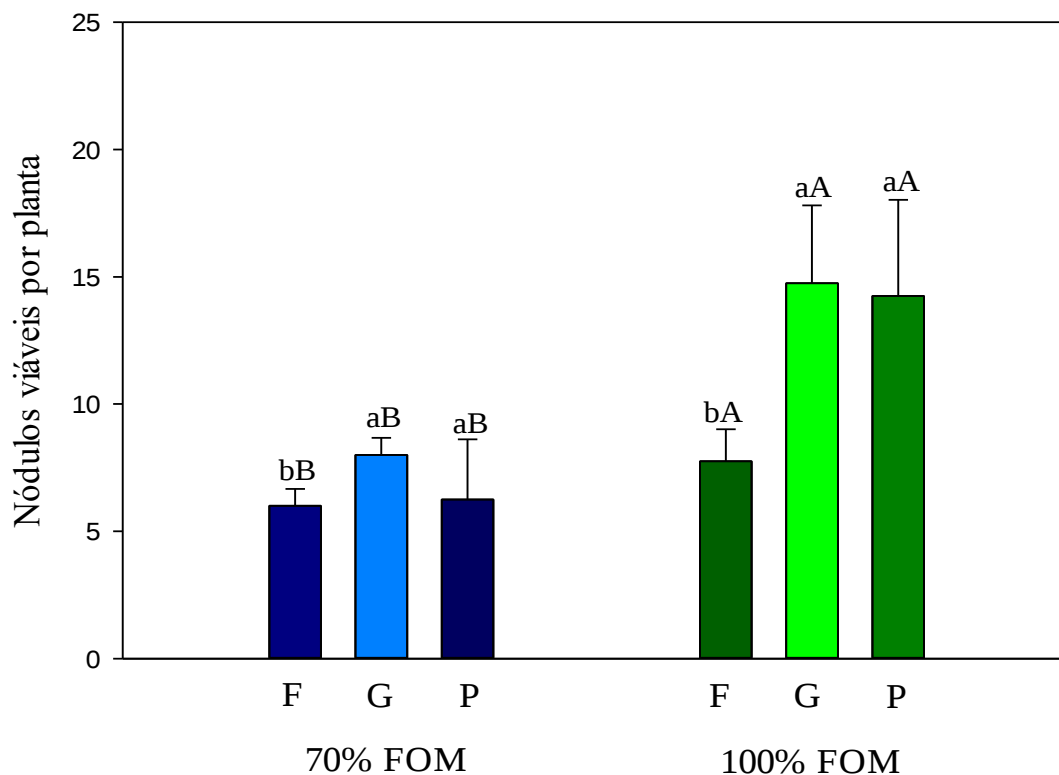
Para avaliar a eficiência da nodulação nas plantas de soja, foram analisados no estágio R2, aproximadamente 40 dias após a emergência (DAE), o número de nódulos planta⁻¹ (NNP), a matéria seca dos nódulos (MSN) e o número de nódulos viáveis planta⁻¹ (NNVP) (Tabela 6). A MSN e o NNP não apresentaram interação entre as formas físicas e as doses de FOM analisadas, para o 1º e 2º ano agrícola (Tabela 6). Para a MSN, no 1º ano de cultivo foram observadas diferenças entre as formas físicas de FOM, sendo a forma farelada (0,15 g) superior em relação às demais. No 2º ano, embora não tenham sido verificadas diferenças estatísticas entre as formas físicas, a forma farelada também apresentou os maiores valores médios de MSN. Para ambas as variáveis MSN e NNP, observou-se que, no 1º ano, a dose de 100% do FOM resultou em maiores valores médios quando comparada à dose de 70% (Tabela 6). No entanto, foi observada interação entre as formas físicas e as doses de FOM para o NNVP no 1º ano de cultivo (Tabela 6).

Tabela 6. Efeito dos tratamentos na matéria seca dos nódulos (MSN), no número de nódulos viáveis por planta (NNVP) e no número de nódulos por planta (NNP) da cultura da soja.

Tratamento	MSN		NNVP		NNP	
	g					
Tratamentos adicionais	2021/22	2022/23	2021/22	2022/23	2021/22	2022/23
Controle ⁽¹⁾	0,07 [▲]	0,47 [▲]	5,75 [▲]	30,74 [▲]	17,00 [▲]	41,12 [▲]
Lodo de esgoto ⁽²⁾	0,05 [●]	0,43 [●]	3,75 [●]	20,37 [●]	14,75 [●]	28,87 [●]
Fertilizante mineral ⁽³⁾	0,17 [■]	0,43 [■]	10,25 [■]	26,16 [■]	11,25 [■]	28,87 [■]
Formas (F)						
FOM farelado	0,15 ^{▲■}	0,58 ^{▲●■}	6,87 ^{▲●■}	33,33 ^{▲●■}	15,87 ^{▲●■}	47,12 ^{▲●■}
FOM granulado	0,13 ^{▲●■}	0,49 ^{▲●■}	11,37 ^{▲●■}	34,81 ^{▲●■}	23,25 ^{▲●■}	44,73 ^{▲●■}
FOM peletizado	0,11 ^{▲■}	0,53 ^{▲●■}	10,25 ^{▲●■}	33,83 ^{▲●■}	14,75 ^{▲●■}	42,35 ^{▲●■}
Doses (D)						
70%	0,11	0,54	6,75	32,66	15,83	41,61
100%	0,15	0,52	12,25	35,31	20,08	47,86
Teste F						
Tratamentos adicionais	27,25 ^{**}	0,13 ^{NS}	8,56 ^{**}	0,40 ^{NS}	2,17 ^{NS}	0,41 ^{NS}
Formas (F)	7,52 ^{**}	0,82 ^{NS}	8,47 ^{**}	0,02 ^{NS}	11,03 ^{**}	0,12 ^{NS}
Doses (D)	11,50 ^{**}	0,09 ^{NS}	35,05 ^{**}	0,15 ^{NS}	7,01 [*]	0,63 ^{NS}
F x D	1,23 ^{NS}	1,33 ^{NS}	4,22 [*]	0,66 ^{NS}	2,72 ^{NS}	0,96 ^{NS}
CV (%)	20,31	29,01	26,68	42,91	23,47	36,43

⁽¹⁾ Ausência de adubação mineral ou orgânica. ⁽²⁾ Aplicação de 2,6 t ha⁻¹ de lodo de esgoto (base seca) visando o fornecimento de P. ⁽³⁾ Aplicação de 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅ conforme recomendação estabelecidas por Raij et al. (1997). **, * e ^{NS} – Significativo a 1% e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente. ▲, ●, ■ Médias seguidas pelo mesmo símbolo não diferem entre si pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade.

Figura 7. Efeito da interação entre as formas físicas (F =Farelada; G = Granulada e P = Peletizada) e as doses de FOM aplicadas (70% e 100% da dose estabelecida para adubação mineral) no número de nódulos viáveis planta⁻¹ de soja para o 1º ano agrícola. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Verificou-se que, independentemente da forma física do FOM, a dose correspondente a 100% da recomendação foi superior à dose de 70% para todas as variáveis analisadas no 1º ano (Figura 7). Adicionalmente, as formas granuladas e peletizada, quando aplicadas na dose de 100% de FOM, apresentaram desempenho superior em relação à forma farelada, evidenciando maior eficiência na promoção de nódulos viáveis em soja (Figura 7).

Para a MSN e NNVP, no 1º ano os valores mais elevados entre os tratamentos adicionais, foram observados no tratamento com FM, com médias 0,17 g e 10,25, respectivamente. Esses valores superaram as médias obtidas nos tratamentos com LE e controle. No entanto, observou-se que a maior média de NNP (17,00) foi encontrada no tratamento CT (Tabela 6). É importante destacar que a aplicação de formas solúveis de N (NO_3^- ou NH_4^+) no solo possui um efeito significativo na supressão da nodulação da soja, reduzindo o número de nódulos e afetando a arquitetura radicular, o que tem impacto no desenvolvimento da planta (Ferguson et al., 2019). Diversos estudos apresentam que as análises realizadas com número de nódulos totais e matéria seca do nódulo (Ferreira; Castro, 1995; Martins *et al.*, 2022) são eficientes para estimar a FBN. Quantidades entre 30 e 60 kg

ha⁻¹ de N solúvel podem inibir o processo simbiótico nas raízes, sendo que em solos brasileiros com baixo conteúdo de MO, a aplicação de N não deve ultrapassar 20 kg ha⁻¹ no cultivo de soja (Zuffo *et al.*, 2018).

Para as variáveis MSN, NNP e NNVP no 2º ano agrícola 2022/23, as formas físicas e as doses de FOM superaram os resultados obtidos nos tratamentos adicionais, demonstrando a eficiência do LE como matriz orgânica na formulação de FOM, especialmente no que se refere à promoção da nodulação das plantas de soja (Tabela 6). Esse resultado reforça a capacidade dos FOM em fornecer nutrientes de forma mais gradual e contínua ao longo do ciclo da cultura, favorecendo o ambiente rizosférico e a simbiose com bactérias fixadoras de nitrogênio (diazotróficas) (Citação *et al.*, 202?). De modo geral, o 2º ano agrícola apresentou superioridade em todos os parâmetros avaliados em relação ao 1º ano, evidenciando o efeito residual positivo do uso dos FOM. Tal resposta pode estar relacionada à liberação lenta e gradual dos nutrientes promovida pela matriz orgânica presente nesses fertilizantes, o que contribui para um ambiente mais favorável ao crescimento das plantas ao longo do tempo. Além disso, a aplicação sucessiva dos FOM pode ter resultado em melhorias acumulativas nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, que são fatores que influenciam diretamente o desenvolvimento radicular, a absorção de nutrientes e, consequentemente, o desempenho da cultura.

Resultados semelhantes foram observados por Oliveira *et al.* (2019), ao verificarem incremento no desempenho agrônômico da soja em áreas manejadas com aplicação continuada de compostos orgânicos e organominerais. Esses resultados reforçam o potencial do uso contínuo dos FOMs como estratégia para a melhoria mais sustentável da fertilidade do solo e da produtividade agrícola.

No presente estudo, a quantidade estimada de N total no FOM foi de 25 kg ha⁻¹, com a maior parte na forma orgânica, o que é considerado seguro para evitar a supressão da nodulação. Alguns estudos já evidenciaram que o LE pode favorecer a nodulação em plantas leguminosas, como em soja e o feijão fava (Rebah *et al.*, 2007; Eid *et al.*, 2018). Além disso, Rebah *et al.* (2007) indicaram que vários componentes do LE são fundamentais para aumentar a atividade das bactérias fixadoras de N, sendo notável o favorecimento da nodulação com a utilização destes compostos orgânicos.

4.3 COMPONENTES MORFOLÓGICOS E DE PRODUÇÃO E PRODUTIVIDADE

As avaliações dos componentes morfológicos, incluindo altura de plantas (AP) e altura de inserção da primeira vagem (APV), foram realizadas após a maturidade fisiológica, no estágio R8 (aproximadamente 125 DAE) da cultura da soja. Tais variáveis são de grande relevância, pois influenciam diretamente na produtividade da cultura, sendo, portanto, fundamentais quando avaliados em conjunto com os parâmetros de rendimento (Besen *et al.*, 2019).

Com base nos resultados obtidos, verificou-se que, para o 1º e o 2º ano agrícola, não houve interação entre as doses e as formas físicas de FOM para nenhuma dessas variáveis. Essas variáveis morfológicas são fortemente determinadas pelo genótipo da cultivar, apresentando pouca variação mesmo diante de diferentes condições ambientais, desde que sejam atendidas as exigências nutricionais, hídricas e de manejo da cultura. No 1º ano de cultivo, foram observadas diferenças para a APV entre as formas físicas de FOM, com destaque para a forma granulada (18,05 cm), seguida pela peletizada (17,33 cm), sendo superiores em relação às demais (Tabela 7).

Tabela 7. Efeito dos tratamentos na massa de mil grãos (M1000), na população final de plantas (POP), na altura de plantas (AP), na altura de inserção da primeira vagem (APV) e na produtividade (PROD) da cultura da soja.

Tratamento	M1000		POP		AP		APV		PROD	
	g		plantas ha ⁻¹		cm				kg ha ⁻¹	
Tratamentos adicionais	2021/22	2022/23	2021/22	2022/23	2021/22	2022/23	2021/22	2022/23	2021/22	2022/23
Controle ⁽¹⁾	147,07 [▲]	169,75 [▲]	105554,75 [▲]	174304,00 [▲]	87,57 [▲]	70,35 [▲]	16,77 [▲]	14,22 [▲]	2538 [▲]	4577 [▲]
Lodo de esgoto ⁽²⁾	140,85 [●]	179,20 [●]	115276,00 [●]	168748,50 [●]	76,37 [●]	73,97 [●]	15,02 [●]	13,80 [●]	2421 [●]	5088 [●]
Fertilizante mineral ⁽³⁾	135,65 [■]	181,45 [■]	133332,25 [■]	179165,00 [■]	76,15 [■]	74,35 [■]	14,27 [■]	15,77 [■]	3174 [■]	4689 [■]
Formas (F)										
FOM farelado	131,83 ^{▲●■}	177,00 ^{▲●■}	134720,87 ^{▲●■}	183331,75 ^{▲●■}	78,32 ^{▲●■}	73,21 ^{▲●■}	14,63 ^{▲●■}	15,10 ^{▲●■}	2828 ^{▲●■}	5411 ^{▲●■}
FOM granulado	134,06 ^{▲●■}	178,52 ^{▲●■}	109026,75 ^{▲●■}	161803,87 ^{▲●■}	80,42 ^{▲●■}	75,07 ^{▲●■}	18,05 ^{▲●■}	14,43 ^{▲●■}	2992 ^{▲●■}	5011 ^{▲●■}
FOM peletizado	142,50 ^{▲●■}	178,38 ^{▲●■}	110763,00 ^{▲●■}	165970,75 ^{▲●■}	81,85 ^{▲●■}	74,25 ^{▲●■}	17,33 ^{▲●■}	15,33 ^{▲●■}	3050 ^{▲●■}	4677 ^{▲●■}
Doses (D)										
70%	137,86	178,35	121063,83	165970,75	76,57	73,96	16,37	15,57	2963	4895
100%	134,40	177,58	115276,58	174766,83	80,49	74,39	16,97	14,34	2951	5171
Teste F										
Tratamentos adicionais	0,48 ^{NS}	3,87 ^{NS}	2,40 ^{NS}	0,13 ^{NS}	7,42 ^{**}	2,06 ^{NS}	1,19 ^{NS}	1,44 ^{NS}	3,64 [*]	0,66 ^{NS}
Formas (F)	0,94 ^{NS}	0,14 ^{NS}	5,03 [*]	1,23 ^{NS}	7,25 ^{NS}	0,73 ^{NS}	4,68 [*]	0,58 ^{NS}	0,59 ^{NS}	2,64 ^{NS}
Doses (D)	0,27 ^{NS}	0,09 ^{NS}	0,61 ^{NS}	0,55 ^{NS}	4,00 ^{NS}	0,11 ^{NS}	0,39 ^{NS}	3,04 ^{NS}	0,00 ^{NS}	1,04 ^{NS}
F x D	0,27 ^{NS}	2,19 ^{NS}	1,22 ^{NS}	0,59 ^{NS}	4,05 ^{NS}	1,91 ^{NS}	2,37 ^{NS}	0,01 ^{NS}	9,28 ^{**}	0,44 ^{NS}
CV (%)	11,93	3,55	15,32	16,99	6,07	4,17	14,50	11,67	14,76	13,38

⁽¹⁾ Ausência de adubação mineral ou orgânica. ⁽²⁾ Aplicação de 2,6 t ha⁻¹ de lodo de esgoto (base seca) visando o fornecimento de P. ⁽³⁾ Aplicação de 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅ conforme recomendação estabelecidas por Raij et al. (1997). **, * e ^{NS} – Significativo a 1% e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente ▲, ●, ■ Médias seguidas pelo mesmo símbolo não diferem entre si pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade.

No 1º ano de cultivo, os tratamentos apresentaram maior desenvolvimento vegetativo, com destaque para o controle, que obteve a maior média de altura de plantas (87,57 cm). Esse resultado pode estar associado a uma melhor disponibilidade de nutrientes ou a condições ambientais mais favoráveis durante esse ciclo (Tabela 7). No 2º ano, os valores de AP foram inferiores, variando de 70,35 a 75,07 cm, o que pode ser reflexo de variações edafoclimáticas entre os anos agrícolas. No 2º ano, os menores valores de APV foram observados no tratamento com LE (13,80 cm), enquanto o tratamento que recebeu FM obteve o maior valor médio (15,77 cm) (Tabela 7). Tais variáveis são de suma importância para rendimento e eficiência em termos qualitativos e quantitativos da colheita mecanizada da cultura da soja (Medina, 1994). Os resultados obtidos em todos os tratamentos foram acima do valor mínimo recomendado de altura de inserção da primeira vagem (13 cm) para obtenção de maiores rendimentos e menores perdas com danos físicos aos grãos e perdas na colheita da cultura da soja (Queiroz *et al.*, 1981).

Para os componentes de produção, incluindo massa de mil grãos (M1000) e população final de plantas (POP), não houve interação entre as formas físicas e as doses de FOM para 1º e o 2º ano agrícola avaliado. Da mesma forma, os tratamentos adicionais não apresentaram diferenças para essa variável. Para o 1º ano os maiores valores de M1000 foram obtidos no tratamento controle (147,07 g), por outro lado, o FOM farelado teve o menor valor (131,83 g) (Tabela 7). No 2º, os maiores valores foram observados nos tratamentos com FM (181,45 g), LE (179,20 g) e FOM granulado (178,52 g) (Tabela 7). De maneira geral, o 2º ano apresentou médias superiores às médias do 1º ano, indicando um possível efeito residual positivo dos FOM. Apesar de que, o FM apresentou os maiores valores para M1000, o que pode ser atribuído à sua alta solubilidade e disponibilidade imediata de nutrientes, atendendo com mais eficiência as exigências da cultura em fases críticas. Já os FOM apresentaram desempenho crescente, com destaque para o efeito residual positivo observado. Esses resultados reforçam o potencial dos FOM como alternativa viável e sustentável em sistemas de cultivo a longo prazo.

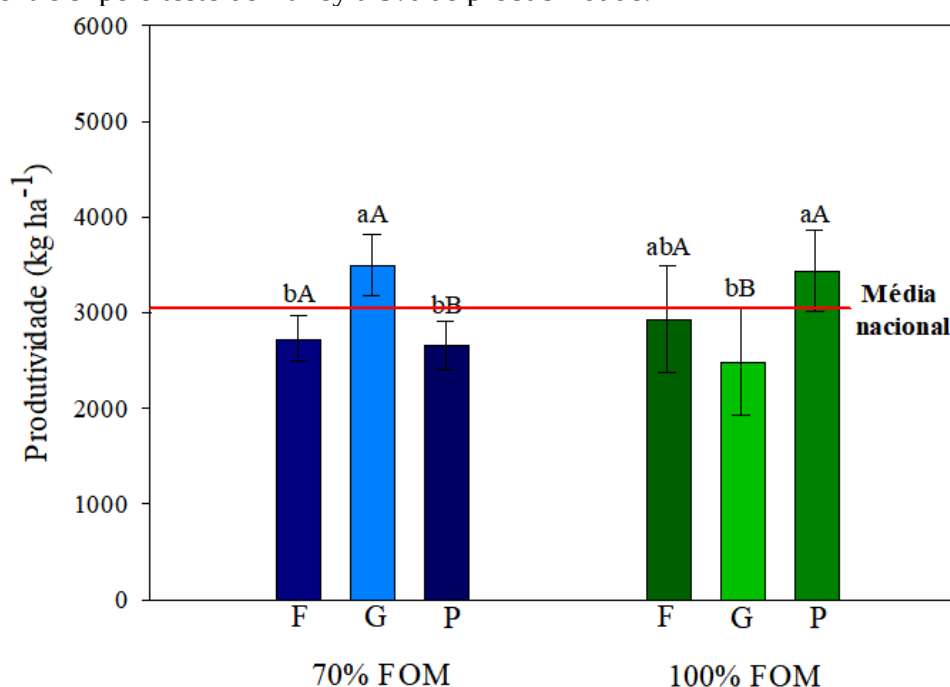
Para a variável população final de plantas (POP), foi observado diferença significativa no 1º ano agrícola em função das formas físicas de FOM, sendo que a maior média foi registrada na forma farelada, (134.720,87 plantas ha⁻¹). De maneira geral, os maiores valores de POP foram observados no 2º ano de cultivo, havendo um incremento em comparação ao 1º ano agrícola. Esse aumento pode ser atribuído às condições climáticas mais favoráveis, com melhor distribuição de chuvas, ausência de reboleiras causadas por nematoides e ao possível efeito residual do FOM aplicado anteriormente.

Os FOM apresentam potencial para melhorar as condições físicas e biológicas do solo, favorecendo o desenvolvimento radicular e o estabelecimento inicial das plântulas (Souza *et*

al., 2019; Mello *et al.*, 2022). Dessa forma, o uso adequado desses insumos, aliado a um ambiente favorável ao desenvolvimento da cultura, pode ter contribuído para o estabelecimento do estande de plantas observado no 2º ciclo.

Para a produtividade da soja, no 1º ano agrícola houve interação entre as formas físicas e as doses do FOM (Tabela 7). As maiores médias de produtividade foram obtidas com a forma peletizada na dose de 100% (3050 kg ha⁻¹) e a granulada na dose de 70% (2992 kg ha⁻¹) do FOM, esses valores superaram a média nacional de produtividade (3026 kg ha⁻¹) para a safra 2021/22 (Figura 8).

Figura 8. Efeito da interação das formas físicas de FOM (F = Farelada; G = Granulada; P = Peletizada) e das duas doses de FOM aplicadas (70% e 100% da dose estabelecida para adubação mineral) na produtividade de grãos de soja do 1º ano agrícola. Média nacional de produtividade (3026 kg ha⁻¹, safra 2021/22). Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores de produtividade das plantas cultivadas nos tratamentos que receberam as doses do FOM, variaram de 2963 a 2951 kg ha⁻¹ (Tabela 7). Entre as diferentes formas do FOM, a forma peletizada promoveu o maior aumento na produtividade em comparação com as outras formas avaliadas (Tabela 7). Além disso, podemos observar que houve diferença entre os tratamentos adicionais e as formas de FOMs, com destaque no tratamento com aplicação do FM (3174 kg ha⁻¹) que obteve as maiores médias (Tabela 7).

Cabe destacar que a produtividade da soja obtida neste estudo está alinhada com a média nacional (3026 kg ha⁻¹, safra 2021/22) (Conab, 2023). Isso sugere que as diferentes formas e

doses de FOM utilizadas tiveram um impacto positivo no rendimento da cultura, mantendo-o em conformidade com a média nacional. No 2º ano agrícola (2022/23), não foi observada interação significativa entre as formas físicas e as doses do FOM na produtividade da soja (Tabela 7). As maiores médias foram registradas com a forma farelada do FOM (5411 kg ha^{-1}) e com o tratamento utilizando LE, que alcançou (5088 kg ha^{-1}). Importante destacar que todos os tratamentos superaram a média nacional de produtividade para a safra 2022/23, estimada em 3507 kg ha^{-1} (58 sc ha^{-1}), segundo dados da Conab (2024). Esses resultados evidenciam o bom desempenho agrônomo da cultura nesse ciclo, mesmo na ausência de interação entre os fatores avaliados.

No 1º ano de cultivo (2021/22), durante a fase de enchimento de grãos, a área experimental foi afetada por déficit hídrico devido à ausência de chuvas e falhas no sistema de irrigação por pivô central, em épocas importantes para a cultura da soja. Além disso, foram observadas reboleiras causadas por *Meloydogine* sp., o que comprometeu o desenvolvimento das plantas nas parcelas do experimento. Esses fatores limitaram o desempenho da cultura e impactaram negativamente os resultados de produtividade. Por outro lado, no 2º ano agrícola (2022/23), as condições climáticas foram mais favoráveis, com maior regularidade nas chuvas e ausência de reboleiras causadas por nematoides, o que contribuiu para o melhor desempenho agrônomo da soja, refletido nos maiores valores de produtividade obtidos nesse ciclo. Destaca-se que o uso dos FOM também apresentou incremento expressivo de produtividade no 2º ciclo, evidenciando o efeito positivo das aplicações sucessivas dos FOM e o potencial agrônomo desses insumos em condições favoráveis de cultivo.

A produtividade da soja está intimamente relacionada à nodulação, que desempenha papel fundamental no processo de FBN (Ferguson *et al.*, 2019; Lyu *et al.*, 2019). Nesse contexto, as maiores produtividades foram obtidas nos tratamentos com maiores valores referentes a nodulação (MSN, NNVP e NNT), demonstrando a importância da matriz orgânica no desenvolvimento e obtenção de boas produtividades na cultura da soja, os quais podem ter sido influenciados pelo melhor desenvolvimento das plantas em função da maior disponibilidade de N por ação da FBN, favorecida por condições mais adequadas ao desenvolvimento e simbiose dos microrganismos, por ação do incremento de material orgânico ao solo, propiciando maior retenção de água e conforto térmico. Tais resultados enfatizam a importância de selecionar cuidadosamente as formas e doses dos FOMs para maximizar a produtividade da cultura.

Esses resultados já foram corroborados por estudos anteriores. Santos *et al.* (2011), observaram aumento na produtividade do feijoeiro ao utilizar LE compostado, derivado do

tratamento de efluentes de uma indústria de bebidas e papel. Além disso, uma pesquisa que avaliou as mudanças no conteúdo de MO e nas formas de N em solos corrigidos com lodo, bem como o crescimento de plantas de milho e feijão-fava (*Vicia faba* L.), também demonstrou que o efeito residual do LE compostado promoveu maior produtividade de grãos de feijão fava (Elsalam *et al.*, 2021).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

1. As variáveis ICF, MSPA, MSR, ANR e ANPA, não foram influenciadas pelas doses e formas físicas do FOM. Todavia, houve um acréscimo numérico quando se utilizou as doses de 70%.
2. Na nodulação da soja, a dose de 100% de FOM foi superior a dose de 70%. Na MSR a forma física farelada promoveu os maiores valores nos dois anos. O NNVP foi superior com o uso do FOM granulado em ambos os anos.
3. A produtividade foi superior com FOM granulado (70%) no 1º ano, e com FOM farelado no 2º ano. Os componentes morfológicos e de produção não tiveram interação entre as doses e formas do FOM.
4. O uso de FOM à base de LE é uma alternativa viável no cultivo da soja. Tal prática poderá contribuir para aumentar a eficiência de fertilizantes minerais em sistemas agrícolas sustentáveis no Cerrado, além de garantir a destinação ambientalmente adequada do LE.
5. Os resultados destacam a importância da escolha correta de fertilizantes, doses e formas físicas para otimizar a nutrição e o desempenho das plantas, reforçando a necessidade de estudos de longo prazo sobre o manejo de FOM na agricultura.

REFERÊNCIAS

- ALCARDE, J. C. **Manual de Análise de Fertilizantes**. Piracicaba: FEALQ, p. 162, 2009.
- ALMEIDA, A. A.; ALMEIDA, F. F. Produção de fertilizante organomineral a partir de resíduos orgânicos. **Universidade de Uberaba-Uniube**. 2018.
- ALMEIDA, E.; SILVA, F. J. P. S. Transição agroecológica de sistemas produtivos familiares no Sul Do Paraná e Planalto Norte Catarinense – O Relato da experiência com o pó de basalto. In: I CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM, 2009, Brasília. **Anais CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM**. Brasília: Fundação Sonia Ivar., v.1. p.167–181, 2009.
- BARBOSA, J.C.; MALDONADO, JUNIOR, W. **AgroEstat - sistema para análises estatísticas de ensaios agrônômicos**. Jaboticabal: FCAV/UNESP, 2015. 396 p.
- BARCELOS, M.; CAMARGO, R.; LANA, R.; AMARAL, U.; ARAÚJO, L.; TEIXEIRA FILHO, M.C. Use of organo-mineral fertilizers in grain sorghum as reverse logistics of organic residues. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, p. 435, 2019.
- BARBIERI JUNIOR, E.; ROSSIELLO, R. O. P.; SILVA, R. V. M. M.; RIBEIRO, R. C.; MORENZ, M. J. F. Um novo clorofilômetro para estimar os teores de clorofila em folhas do capim Tifton 85. **Ciência Rural**, v. 42, n. 12, p. 2242–2245, 2012.
- BERTON, R. S.; NOGUEIRA, T. A. R. Uso de lodo de esgoto na agricultura. In: COSCIONE, A. R.; NOGUEIRA, T. A. R.; PIRES, A. M. M. **Uso agrícola de lodo de esgoto: avaliação após a resolução nº 375 do Conama**. FEPAF: Botucatu, 2010. p. 31–50.
- BLOEM, E.; ALBIHN, A.; ELVING, J.; HERMANN, L.; LEHMANN, L.; SARVI, M.; SCHAAF, T.; SCHICK, J.; TURTOLA, E.; YLIVAINIO, K. Contamination of organic nutrient sources with potentially toxic elements, antibiotics and pathogen microorganisms in relation to P fertilizer potential and treatment options for the production of sustainable fertilizers: a review. **Science of the Total Environment**, v. 607, p. 225–242, 2017.
- BORSARI, F. Fertilizantes inteligentes. **Revista AgroDBO**, v. 45, p. 54–57, 2013.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº 61**. 2020. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/instrucao-normativa-n-61-de-8-de-julho-de-2020-266802148>. Acesso em: 15 de mar. de 2025.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes e corretivos** / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. – Brasília: MAPA, 2017. 240 p. ISBN 978-85-7991-109-5. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/manual-de-metodos_2017_isbn-978-85-7991-109-5.pdf. Acesso em: 13 mar. 2025.
- BONINI, C. S. B.; DÍAS, R. S.; ALVES, M. C.; ABREU, C. A.; VÁZQUEZ, E. V.; PAZ-FERREIRO, J. Micronutrient contents of a revegetated saprolite exposed by excavation of an Oxisol. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 46, n. 1, p. 283–295, 2015.

CATÓLICO, F. A.; SOUZA, T. A.; SILVA, C. A. Potencial agrônômico do lodo de esgoto na agricultura. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 19, n. 6, p. 573–578, 2015.

CALEGARI, A. Sustentabilidade e manejo do solo na agricultura tropical. **Piracicaba: IAC**, 2013.

CHAGAS, J. K. M.; FIGUEIREDO, C. C.; SILVA, J.; PAZ-FERREIRO, J. The residual effect of sewage sludge biochar on soil availability and bioaccumulation of heavy metals: Evidence from a three-year field experiment. *Journal of Environmental Management*, v. 279, p. 111824, 2021.

CHEN, SPJ, LI, MW, WONG, HY, WONG, FL, WU, T., GAI, J., LAM, HM. The Seed Quality Assurance Regulations and Certification System in Soybean Production – A Chinese and International Perspective. *Agriculture*, v. 12, n. 5, p. 624, 2022.

Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada da Escola Superior “Luiz de Queiroz” – CEPEA. ESALQ/USP. PIB do agronegócio 2023. Disponível em: [://www.cepea.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/PIB DO- AGRONEGOCIO-2023.04MAR2024.pdf](http://www.cepea.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/PIB%20DO%20AGRONEGOCIO-2023.04MAR2024.pdf). Acesso em: ?? 202?.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira: Grãos**. v. 11. Safra 2023/24 sétimo levantamento. Brasília DF. 202. Disponível em: <http://conab.gov.br/>. Acesso em: 12 março 2025.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL – CETESB. Critério para aplicação de biossólidos em áreas agrícolas: critérios para projeto e operação. Norma P 4.230. São Paulo, CETESB, 1999. 32 p. (Manual Técnico).

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Séries históricas: Brasil** – por unidades de Federação. Disponível em: <http://conab.gov.br/> . Acesso em: 14 fev. 2025.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Boletim Logístico – Junho/2023**. Disponível em: [https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado- agropecuario-e-extrativista/boletim-logistico/](https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuário-e-extrativista/boletim-logístico/). Acesso em: 12 fev. 2025.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira**. Brasília: CONAB, v. 9, jul. 2021. Safra 2022/23, quinto levantamento <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graoCONAB>, Colheita de grãos brasileira. Brasília: CONAB, 2023. Acesso em: 2 abr. 2024.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Boletim da Safra de Grãos 23/24**. Disponível em: [https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de- graos](https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos). Acesso em: 02 abr. 2024.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**, Brasília: CONAB, v. 12, safra 2024/25, n. 4, quarto levantamento, 2025.

CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL – CNA. **Fertilizantes: estratégias para o Brasil**. Brasília, DF: CNA, 2022. Disponível em: <https://www.cnabrazil.org.br>. Acesso em: 24 fev. 2025.

COSTA, A. L. da; CUNHA, M. A. da; SILVA, J. F. da. Impacto dos fertilizantes organominerais à base de lodo de esgoto na microbiota do solo e na produtividade agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 46, e0210056, 2022.

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; GAMEIRO, R. A.; PARIZ, C. M.; BUZETTI, S.; LOPES, K. S. M. Adubação nitrogenada no consórcio de milho com duas espécies de braquiária em sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, n.8, p.1038-1047, 2012.

CUNHA, M. A.; COSTA, A. L.; SILVA, J. F. da. Efeitos dos fertilizantes organominerais de lodo de esgoto na eficiência do uso de nutrientes pelas plantas. **Revista de Agricultura Sustentável**, v. 38, n. 2, p. 123–130, 2023.

CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL – CNA. **Panorama do Agro**. Brasília: 2020. Disponível em: <https://www.cnabrazil.org.br/cna/panorama-do-agro>. Acesso: 08 mar. 2022.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020**. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-n-498-de-19-de-agosto-de-2020-273467970>. Acesso em: 18 mar. 2022.

COSTA, T. G. A.; CUNHA, L. M.; IWATA, B. F.; COELHO, J. V.; SANTOS, J. G. P., CLEMENTINO, G. E. S. Tratamento alcalino de lodo de esgoto no preparo do biossólido como alternativa de adubo orgânico. **Multi-Science Journal**, v. 1, n. 13, p. 374–377. 2018.

DIAS, B. O.; SILVA, C. A.; HIGASHIKAWA, F. S.; ROCHA, S. A.; SILVA, M. S. Uso de resíduos orgânicos na agricultura: produção de compostos e efeitos no solo e nas culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 6, p. 1391–1403, 2007.

DEMATTE, J.L.I. **Levantamento detalhado dos solos do “Campus Experimental de Ilha Solteira”**, Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. 1980, p. 11–31.

DUARTE, A. P.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. Soja. In: CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; MATTOS JR.; D.; BOARETTO, R. M.; RAIJ, B. van **Boletim 100: Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2022. p. 199–208.

DOMINGOS, J. L.; VIEIRA, C.; MENDES, F. L. Manejo da adubação nitrogenada na cultura da soja. **Revista Campo & Pesquisa: Agrárias**, v. 10, n. 1, p. 73–81, 2015.

ELSALAM, H. E. A.; EL-SHARNOUBY, M. E.; MOHAMED, A. E.; RAAFAT, B. M.; EL-GAMAL, E. H. Effect of sewage sludge sompost usage on corn and faba bean growth, carbon and nitrogen forms in plants and soil. **Agronomy**, Basel, v. 11, p. 1–20, 2021.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sustentabilidade e manejo do solo no agronegócio brasileiro**. Brasília, DF: Embrapa, 202.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa do Solo. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, CNPS, 1997. 212 p.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Importância do Cerrado para o agronegócio brasileiro**. Brasília, DF: Embrapa, 2024. Disponível em: <https://www.embrapa.br>. Acesso em: 30 abril 2025.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA – EMBRAPA. **Soja: produção, mercado e sustentabilidade**. Brasília, DF: Embrapa, 2024. Disponível em: <https://www.embrapa.br>. Acesso em: 03 maio 2025.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **FAOSTAT – production: crops**. Acesso em: 20 dez. 2024.

FALKER AUTOMAÇÃO AGRÍCOLA LTDA. **Manual do medidor eletrônico de clorofila ClorofiLOG CFL 1030**, Porto Alegre, 2008. 4 p.

FERGUSON, B. J. et al. Legume nodulation: The host controls the party. *Plant Cell and Environment*, v. 42, n. 1, p. 41–51, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/pce.13348>. Acesso em: 01 mai. 2025.

FERREIRA, E. M.; CASTRO, I. V. nodulation and growth of subterranean clover (*Trifolium subterraneum* L.) in soils previously treated with sewage sludge. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 27, n. 1, p. 1177–1183, 1995.

FEHR, W.R.; CAVINESS, C.E. Stages of soybean development. Iowa, Ames: Iowa State University of Science and Technology, 1977. 12 p. (Special Report, 80).

FPA – Frente Parlamentar da Agropecuária. **Crescimento da soja e sustentabilidade no Cerrado brasileiro**. Brasília, DF: FPA, 2021. Disponível em: <https://www.fpagropecuaria.org.br>. Acesso em: 05 fev. 2025.

FILLA, V.A., COELHO, A.P., LEAL, F.T., BETTIOL, J.V.T., LEMOS, L.B., 2020. Portable chlorophyll meter in monitoring and management of nitrogen in common bean cultivars. **Revista FCA**, v. 52, p. 64–77, 2020.

GROBELAK, A.; GROSSER, A.; KACPRZAK, M.; KAMIZELA, T. Processamento e gestão de lodo de esgoto em estação de tratamento de esgoto municipal de pequeno e médio porte - nova solução técnica. **Revista de gestão ambiental**, v. 234, p. 90–96, (2019).

GOMES, F. C.; OLIVEIRA, J. M.; SANTOS, A. B.; LIMA, R. H. História e evolução da cultura da soja: da Ásia ao Brasil. **Revista Brasileira de Agronegócio**, v. 15, n. 2, p. 45–59, 2020.

GOMES, W. F.; FERREIRA, T. O.; SILVA, Y. J. A. B.; DIAS, N. S.; FONTES, M. P. F. Fertilizantes organominerais como estratégia para mitigação das emissões de gases de efeito estufa na agricultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 44, e0190050, 2020. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20190050>.

MOREIRA, J. P.; SOUSA, D. M.; CARDOSO, F. A.; NASCIMENTO, C. R. Soja no mundo: expansão histórica e papel estratégico no agronegócio. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, v. 60, n. 3, p. 457–474, 2022.

HIGASHIKAWA, F. S.; CANTÚ, R. R.; KURTZ, C.; GONÇALVES, P. A. de S.; VIEIRANETO, J. Aplicações anuais de adubação mineral e orgânica em plantio direto de cebola: efeito no rendimento e na fertilidade do solo. **Revista Thema**, [S. l.], v. 21, n. 1, p. 130–153, 2022. Disponível em: <https://periodicos.ifsul.edu.br/index.php/thema/article/view/2490>. Acesso em: 16 fev. 2025.

KACPRZAK, M. et al. Sewage sludge disposal strategies for sustainable development. *Environmental Research*, v. 156, p. 39–46, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.03.010>.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Handbuch der klimatologie**. vol. 1, Part C, Berlin: Gerbruder Borntraeger. 1936.

KESSTRA, S. et al. Soil as a key resource for sustainable development and food security. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, v. 15, p. 1-6, 2016.

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A. **Fixação biológica de nitrogênio**. Londrina: Embrapa Soja, 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Biomass e sistema costeiro-marinho do Brasil: compatível com a escala 1:250.000**. Rio de Janeiro: IBGE, 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/vegetacao/32717-biomass.html>. Acesso em: 30 maio 2025.

ICMBIO – Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Relatório do bioma Cerrado: área e características**. Brasília, DF: ICMBio, 2024. Disponível em: <https://www.icmbio.gov.br>. Acesso em: 30 abril 2025.

IPAM – Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia. **Produção agrícola no Cerrado brasileiro**. Brasília, DF: IPAM, 2024. Disponível em: <https://www.ipam.org.br>. Acesso em: 30 maio 2025.

LIAO, Z.; ZHANG, K.; FAN, J.; LI, Z.; ZHANG, F.; WANG, X.; CHENG, M.; ZOU, Y. Ridge-furrow plastic mulching and dense planting with reduced nitrogen improve soil hydrothermal conditions, rainfed soybean yield and economic return in a semi-humid drought-prone region of China. **Soil and Tillage Research**, v. 217, 105291, 2022.

LI, J.; LUO, G.; SHAIBU, A. S.; LI, B.; ZHANG, S.; SUN, J. optimal fertilization level for yield, biological and quality traits of soybean under drip irrigation system in the arid region of northwest China. **Agronomy**, v. 12, n. 2, 291, 2022.

LOMBARDI NETO, F.; DRUGOWICH, M. **Manual técnico de manejo conservação de solo e água**. Campinas: CATI, v. 2, 1994. 168 p.

MAGELA, M. L. M.; CAMARGO, R.; LANA, R. M. Q.; MIRANDA, M. C. C.; MOTA, R. P. Eficácia de fertilizantes organominerais derivados de biossólido ou torta de filtro no

desenvolvimento inicial do milho. **Australian Journal of Crop Science**, v. 13, n. 5, p. 662–670, 2019.

MALAVOLTA, E. ABC da adubação. 5. Ed. São Paulo. **Revista Agronômica Ceres**, 255p. 1979.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO – MAPA. **Plano Nacional de Fertilizantes 2022–2050**. Brasília, DF: MAPA, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/fertilizantes/plano-nacional-de-fertilizantes>. Acesso em: 02 maio 2025.

MATOSO, S. C. G.; KUSDRA, J. F. Nodulação e crescimento do feijoeiro em resposta à aplicação de molibdênio e inoculante rizobiano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 6, p. 567–573, 2014.

MASCARENHAS, H. A. A.; TANAKA, R. T.; Soja. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 1997b. p. 202–203.

MEDINA, P.F. Produção de sementes de cultivares precoces de soja, em diferentes épocas e locais do Estado de São Paulo. 1994. 173f. Tese (Doutorado em Agronomia/ Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

MORAES, E. R. **Aplicação de fertilizante organomineral de lodo de esgoto e bioestimulante na cana-de-açúcar**. 84f. Tese de Doutorado em Agronomia. Universidade Federal de Uberlândia – UFU. 2017.

NASCIMENTO, C. W. A., BARROS, D. A. S., MELO, E. E. C., OLIVEIRA, A. B. Alterações químicas em solos e crescimento de milho e feijoeiro após aplicação de lodo de esgoto. **Rev. Ciênc. Agron.**, 28, 385–392. 2004.

NAKAO, A. H. **Composto orgânico de agroindústrias na produção de feijão de inverno e milho no sistema plantio direto**. 63 f. 2015. Dissertação (mestrado): Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2015.

NEPOMUCENO, A. L. Tecnologias e manejo no crescimento da produtividade da soja no Brasil. **Revista Brasileira de Agricultura Sustentável**, v. 13, n. 1, p. 22–31, 2023. DOI: <https://doi.org/10.xxxx/rbas.2023.001>

NASCIMENTO, A. L.; SOUZA, A. J.; OLIVEIRA, F. C.; COSCIONE, A. R.; VIANA, D. G.; REGITANO, J. B. Chemical attributes of sewage sludges: Relationships to sources and treatments, and implications for sludge usage in agriculture. **Journal of Cleaner Production, Amsterdam**, v. 258, p. 120746, 2020.

OLIVEIRA, F.C.; MATTIAZZO, M.E. Metais pesados em Latossolo tratado com lodo de esgoto e em plantas de cana-de-açúcar. **Scientia Agrícola**, v. 58, n. 3, p. 581–593. 2001.

OLIVEIRA, R. S. et al. Fertilidade e acidez dos solos tropicais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 43, n. 1, p. 1-12, 2019.

OLIVEIRA, L. F. Gestão e aproveitamento agrícola do lodo de esgoto: potencialidades e desafios. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 26, n. 1, p. e14, 2021. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.262120200131>.

PEREIRA, D. S. Atributos físico-hídricos, químicos e estoque de carbono em um latossolo vermelho tratado com composto de lodo de esgoto cultivado em sucessão de soja e milho no cerrado. 2021. 136f. Dissertação (Doutorado em Agronomia), Faculdade de Engenharia – Unesp – Campus de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2021.

PEDROSA, M. V. B.; LIMA, W. L.; AMARAL, A. A.; CARVALHO, A. H. O. Biossólido de lodo de esgoto na agricultura: desafios e perspectivas. *Revista Agrogeoambiental*, v. 9, n. 4, 2017.

PRATES, A. R. Atributos químicos do solo, estado nutricional e desempenho agrônomo na sucessão soja-milho adubados com composto de lodo de esgoto na região do Cerrado. 2020. 175 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Faculdade de Engenharia – Unesp – Campus de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2020.

PNF – Produção Nacional de Fertilizantes. Disponível em: https://www.gov.br/planalto/pt-br/assuntos/assuntosestrategicos/documentos/estudosestrategicos/sae_publicacao_fertilizantes_v10.pdf. Acesso em: 30 abr. 2025.

QUEIROZ, E.F.; NEUMAIER, N.; TORRES, E.; PEREIRA, L.A.G.; BIANCHETTI, A.; TERAZAWA, F.; PALHANO, J.B.; YAMASHITA, J. Recomendações técnicas para a colheita mecânica. In: MIYASAKA, S., MEDINA, J.C. (Ed.). *A soja no Brasil*. Campinas: ITAL, 1981. p.701-10.

RASTETTER, N.; GERHARDT, A. Toxic potential of different types of sewage sludge as fertiliser in agriculture: ecotoxicological effects on aquatic, sediment and soil indicator species. *Journal of Soils and Sediments*, v. 17, p. 106–121, 2017.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, 1997. 285 p.

REGITANO, J. B.; RODRIGUES, M. M.; MARTINS, G. L. Vantagens do uso de fertilizantes organominerais a base de lodo de esgoto em condições tropicais. In: **Anuário Brasileiro de Tecnologia em Nutrição Vegetal**. [S. l.: s. n.], 2021.

REBAH, F. B.; PRÉVOST, D.; YEZZA, A.; TYAGI, R. D. Agroindustrial waste materials and wastewater sludge for rhizobial inoculant production: A review. *Bioresource Technology*, Essex, v. 98, p. 3535–3546, 2007.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H. Milho. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, p. 56–59, 1997.

RAIJ, B. van; ANDRANDE, J. C.; CANTARELLA, H.; GUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. 1.ed. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285 p.

RStudio Team. **RStudio: Integrated Development Environment for R**; RStudio: Boston, MA, USA, 2021; Available online: <https://www.rstudio.com/> (accessed on 10 April 2021).

RODRIGUES, M. M. **Lodo de esgoto como matriz orgânica na formulação de fertilizante organomineral para a cultura da soja**. 2019. 71f, Tese de Mestrado em Ciência do Solos e Nutrição de Plantas. Universidade de São Paulo. Piracicaba – USP. 2019.

ROMANO, E.; BRAMBILLA, M.; BISAGLIA, C.; PAMPURO, N.; PEDRETTI E. F.; CAVALLO, E. Pelletization of composted swine manure solid fraction with different organic co-formulates: effect of pellet physical properties on rotating spreader distribution patterns. **International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture**, v. 3, n. 4, p. 101– 111, 2014.

SAMPAIO, T. F. GUERRINI, I. A. BACKES, C. HELIODORO, J. C. A. RONCHI, H. S. TANGANELLI, K. M.; OLIVEIRA, F. C. Lodo de esgoto na recuperação de áreas degradadas: efeito nas características físicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 5, p. 1637–1645, 2012.

SAMPAIO, A. O. Afinal, queremos ou não viabilizar o uso agrícola do lodo produzido em estações de esgoto sanitário? Uma avaliação crítica da Resolução CONAMA 375. **Revista DAE**, n. 193, p. 16–27, 2013.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2018.

SILVA, R. D. S.; JALAL, A.; NASCIMENTO, R. E. N.; ELIAS, N. C.; KAWAKAMI, K. C.; BREU-JUNIOR, C. H.; OLIVEIRA, F. C.; JANI, A. D.; HE, Z.; ZHAO, F.; FILHO, M. C. M. T.; ROSSETTO, R.; CAPRA, G. F.; NOGUEIRA, T. A. R. Composted sewage sludge application reduces mineral fertilization requirements and improves soil fertility in sugarcane seedling nurseries. **Sustainability**, v. 14, n. 8, p. 4684, 2022.

SILVA, R.D.S.; JALAL, A.; NASCIMENTO, R.E.N.D.; ELIAS, N.C.; KAWAKAMI, K.C.; ABREU-JUNIOR, C.H.; OLIVEIRA, F.C.; JANI, A.D.; HE, Z.; ZHAO, F.; TEIXEIRA FILHO, M.C.M.; ROSSETTO, R.; CAPRA, G.F.; NOGUEIRA, T.A.R. Composted Sewage Sludge Application in a Sugarcane Seedling Nursery: Crop Nutritional Status, Productivity, and Technological Quality Implications. **Sustainability**, v. 14, 4682, 2022b.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2018.

SANTOS, L. Z. H.; MYRNA, S. O.; WENNDY, L. W.; ANDREA, V. R.; MANUEL, G. P. J. Effects of compost made with sludge and organic residues on bean (*Phaseolus vulgaris* L.) crop and arbuscular mycorrhizal fungi density. **African Journal of Agricultural Research**, Sapele, v. 6, n. 6, p. 1580–1585, 2011.

SILVA, J. R.; SOUZA, L. M.; PEREIRA, F. A. Crescimento da área agrícola no Cerrado entre 1985 e 2020. *Revista Brasileira de Geografia Agrária*, v. 17, n. 3, p. 45–59, 2021. DOI: <https://doi.org/10.xxxx/rbga.2021.017>

SILVA, J. A. da. Uso de fertilizantes organominerais na agricultura sustentável: uma abordagem prática. 2021. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Uberlândia - UFU, 2021.

SILVEIRA, L. A.; PEREIRA, M. T. A origem da soja e sua importância econômica. *Cadernos de Agroecologia*, v. 16, n. 1, p. 112–121, 2021.

SOUZA, W. S. **Uso da rochagem para remineralização de solos de baixa fertilidade**. 2019. 54 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

SOUZA, M. T.; FERREIRA, S. R.; MENEZES, F. G.; RIBEIRO, L. S.; SOUSA, I. M.; PEIXOTO, J. V. M.; SILVA, R. V. da; MORAES, E. R. Altura de planta e diâmetro de colmo em cana-de-açúcar de segundo corte fertilizada com organomineral de lodo de esgoto e bioestimulante / Height of plant and thermal diameter in second cut sugar fertilized with organomineral of sewage sludge and bioestimulant. **Brazilian Journal of Development**, [S. l.], v. 6, n. 1, p. 1988–1994, 2020. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/6103>. Acesso em: 16 feb. 2025.

SOUZA, C. M. *Manejo da fertilidade do solo em áreas agrícolas no Cerrado*. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2019.

TEIXEIRA, M. B.; LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; PIMENTEL, C. Decomposição e liberação de nutrientes da parte aérea de plantas de milho e sorgo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 867–876, 2011.

TIRITAN, C. S.; SANTOS, D. H. Resposta do milho safrinha a adubação organomineral no município de Maracaju-MS. **Colloquium Agrariae**, v. 8, n. 1, p. 24–31, 2012.

WRB (WORLD REFERENCE BASE FOR SOIL RESOURCES). A framework for international classification, correlation and communication. Rome, Italy: FAO, 2006. (World Soil Resources Reports No. 103).

WU, T.; LIU, W.; WANG, D.; ZOU, Y.; LIN, R.; YNAG, Q.; GBOKIE, T.; BUGHIO, M.A.; LI, Q.; WANG, J. Organic management improves soil phosphorus availability and microbial properties in a tea plantation after land conversion from longan (*Dimocarpus longan*). **Applied Soil Ecology**, v. 154, p. 103642, 2020.

LYU, X.; XIA, X.; WANG, C.; MA, C.; DONG, S.; GONG, Z. Effects of changes in applied

nitrogen concentrations on nodulation, nitrogen fixation and nitrogen accumulation during the soybean growth period. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 65, p. 1–11, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00380768.2019.1667213>.

YU, W.; DING, X.; XUE, S.; LI, S.; LIAO, X.; WANG, R. Effects of organic-matter application on phosphorus adsorption of three soil parent materials. **Journal of soil science and plant nutrition**, v. 13, p. 1003–1017, 2013.

ZUFFO, Alan Mario et al. Quality of soybean seeds in response to nitrogen fertilization and inoculation with *Bradyrhizobium japonicum*. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 48, p. 261–270, 2018.