



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROECOSSISTEMAS

BRUNA LABREA FERREIRA DE OLIVEIRA

EFEITO DO USO DO BIOSSÓLIDO NAS PROPRIEDADES QUÍMICAS DO SOLO NO
CULTIVO DA AVEIA PRETA E MILHO

FLORIANÓPOLIS, SC
2026

BRUNA LABREA FERREIRA DE OLIVEIRA

EFEITO DO USO DO BIOSSÓLIDO NAS PROPRIEDADES QUÍMICAS DO SOLO NO
CULTIVO DA AVEIA PRETA E MILHO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Agroecossistemas da
Universidade Federal de Santa Catarina.
Orientador: Prof. Dr. Arcângelo Loss
Co-orientador: Prof. Dr. Jucinei José Comin

FLORIANÓPOLIS, SC
2026

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Labrea Ferreira de Oliveira, Bruna
EFEITO DO USO DO BIOSSÓLIDO NAS PROPRIEDADES QUÍMICAS DO
SOLO NO CULTIVO DA AVEIA PRETA E MILHO / Bruna Labrea
Ferreira de Oliveira ; orientador, Arcângelo Loss,
coorientador, Jucinei Comin, 2025.
97 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós
Graduação em Agroecossistemas, Florianópolis, 2025.

Inclui referências.

1. Agroecossistemas. 2. Biossólido caleado. 3. Acidez de
solo. 4. Solo franco-arenoso e argiloso. 5. Milho e aveia
preta. I. Loss, Arcângelo . II. Comin, Jucinei. III.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós
Graduação em Agroecossistemas. IV. Título.

Bruna Labrea Ferreira de Oliveira

Título: Efeito do uso do biossólido nas propriedades químicas do solo no cultivo da aveia preta e milho

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 29 de agosto de 2025, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:
Prof. Cledimar Rogério Lourenzi, Dr. em Ciências do Solo pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM – RS)

Prof. Lucas Raimundo Rauber, Dr. em Ciências do Solo pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM – RS)

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestra em Agroecossistemas.

Insira neste espaço a
assinatura digital

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Insira neste espaço a
assinatura digital

Prof. Arcângelo Loss Dr. Em Agronomia-Ciência do Solo
Orientador(a)

Florianópolis, 2026.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, antes de tudo, à minha família, pelo apoio incondicional, pelo incentivo diário e pela compreensão nos momentos em que a rotina do mestrado exigiu mais de mim.

Ao Professor Orientador Arcângelo Loss, pela orientação cuidadosa, pela confiança depositada no meu trabalho e pelos ensinamentos que conduziram cada etapa desta dissertação, sempre com atenção, seriedade e apoio constante.

Ao Professor Coorientador Jucinei Comin, pela disponibilidade, pelas contribuições técnicas e científicas e, especialmente, pelo suporte nas análises de revisão textual e na condução dos experimentos, fundamentais para a qualidade do estudo.

Aos membros da banca examinadora, Professores Cledimar Lourenzi, Lucas Rauber e Paulo Emilio Lovato, pelas leituras atentas, pelas sugestões valiosas e pelos apontamentos que enriqueceram significativamente esta dissertação.

Aos membros do NEPEA, pelo auxílio durante a execução dos experimentos e pelo apoio nas atividades desenvolvidas ao longo do trabalho.

Ao amigo e técnico de laboratório Alan, pela dedicação, pela disponibilidade e pela contribuição essencial na realização dos experimentos, sempre solícito, colaborativo e disposto a ajudar.

Aos colegas e membros do Programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas, pela convivência, pelas trocas de experiências e pela construção coletiva do conhecimento. Em especial, agradeço aos colegas Paulo, Cristiane, Elelan e Clarissa, pelo incentivo, parceria e colaboração nos trabalhos técnicos.

Ao Departamento de Química e ao Laboratório LEMA da Universidade Federal de Santa Catarina, pela estrutura disponibilizada e pelo apoio nas avaliações de metais pesados.

À Professora Tatiane de Andrade Maranhão, pelo empenho e dedicação para viabilizar as análises realizadas, e à acadêmica Larissa, pela colaboração nas análises químicas de metais pesados.

Aos membros e professores do Curso de Pós-graduação em Agroecossistemas, pela contribuição na minha formação e na construção do conhecimento ao longo desta jornada acadêmica.

Ao Professor Claudio Roberto Fonseca Sousa Soares, do Departamento de Biologia MIP, pela disponibilização do espaço para o desenvolvimento do experimento.

Ao Centro de Ciências Agrárias, pela disponibilização da estrutura física necessária à realização dos experimentos e pelo suporte nas demandas documentais.

Por agradeço aos amigos que fiz ao longo dessa caminhada. Vocês tornaram o processo mais leve, compartilharam apoio e aprendizados, e ajudaram a construir laços que levarei comigo para toda a vida.

RESUMO

O reaproveitamento agrícola de resíduos oriundos do tratamento de lodo de esgoto pode representar alternativa sustentável de manejo de nutrientes e de melhoria da qualidade do solo, desde que sejam garantidas condições de segurança ambiental. O objetivo desse estudo foi avaliar se o bio sólido calcado (lodo de esgoto tratado) com e sem adição de NPK corrige a acidez do solo franco-arenoso e argiloso e serve como fonte de nutrientes na produção de biomassa de milho e aveia preta em comparação ao tratamento mineral e controle. O experimento foi realizado em casa de vegetação, em fatorial 5x2, sendo cinco tratamentos, dois tipos de solos e quatro repetições. Os solos possuíam textura franco-arenoso e argiloso, ambos com baixa fertilidade química e elevada acidez. Os tratamentos foram: 1) bio sólido calcado (100% da dose recomendada), 2) bio sólido calcado + NPK (100% da dose recomendada + complemento de NPK), 3) mistura NPK e bio sólido calcado (50% de cada); 4) NPK + calagem (100% da dose recomendada); 5) testemunha (Test) sem adubação e sem calagem. As avaliações abrangeram um conjunto amplo de variáveis, incluindo pH do solo, teores de macro e micronutrientes, disponibilidade de elementos potencialmente tóxicos, além de parâmetros relacionados ao crescimento das plantas, estado nutricional e produção de biomassa. A aplicação do bio sólido promoveu alterações significativas na química do solo, principalmente pela elevação do pH e pelo aumento da disponibilidade de nutrientes, refletindo melhoria da fertilidade. Esse efeito corretivo está associado ao caráter alcalinizante do material, que contribuiu para reduzir a acidez e criar condições mais favoráveis ao desenvolvimento das culturas. Em relação à segurança ambiental, as análises indicaram que os teores de metais pesados permaneceram abaixo de níveis considerados críticos, sugerindo que, nas doses estudadas, o uso agrícola do resíduo não implicou risco relevante de contaminação. No desempenho das culturas, observou-se incremento na absorção de nutrientes essenciais e melhoria no crescimento vegetativo, especialmente nas doses intermediárias, indicando que o bio sólido atuou simultaneamente como fonte de nutrientes e corretivo da acidez do solo. A biomassa do milho e aveia apresentou aumento expressivo em comparação ao controle, evidenciando resposta agrônômica positiva à aplicação do resíduo. De forma geral, o bio sólido apresenta elevado potencial de uso na agricultura como alternativa sustentável para reciclagem de nutrientes e melhoria das propriedades químicas do solo, contribuindo para aumento de produtividade e para a valorização de resíduos urbanos.

Palavras-chave: acidez do solo; textura franco-arenosa; textura argilosa, bio sólido, calagem.

ABSTRACT

The agricultural repurposing of treated sewage sludge (biosolids) represents a sustainable strategy for nutrient management and soil amelioration, provided that environmental safety thresholds are strictly maintained. This study aimed to evaluate the efficacy of limed biosolids—both with and without supplemental NPK—as a soil acidity corrective and nutrient source for corn (*Zea mays*) and black oat (*Avena strigosa*) biomass production in sandy loam and clayey soils, compared to conventional mineral fertilization and an unamended control. A greenhouse experiment was conducted using a 5×2 randomized block factorial design, comprising five treatments, two soil textural classes, and four replicates. The selected soils exhibited sandy loam and clayey textures, both characterized by low baseline chemical fertility and high acidity. Treatments consisted of: (1) limed biosolids (100% of the recommended dose); (2) limed biosolids + NPK (100% recommended dose + NPK supplementation); (3) a 50:50 blend of NPK and limed biosolids; (4) conventional NPK + liming (100% recommended dose); and (5) an absolute control (no fertilization or liming). Comprehensive multiparametric assessments were performed, encompassing soil pH, macro- and micronutrient profiles, bioavailability of potentially toxic elements (PTEs), as well as plant growth metrics, nutritional status, and total biomass yield. Biosolid application induced significant alterations in soil chemical properties, primarily driving pH elevation and enhanced nutrient bioavailability, thereby ameliorating overall soil fertility. This corrective effect is attributed to the alkaline nature of the limed material, which effectively neutralized soil acidity and established a more favorable rhizosphere environment for crop development. Regarding environmental safety, PTE concentrations remained well below critical regulatory thresholds, indicating that agricultural application at the investigated rates poses negligible contamination risks. Crop performance metrics revealed enhanced uptake of essential nutrients and improved vegetative growth, particularly at intermediate application rates, demonstrating the dual efficacy of the biosolids as both a nutrient source and a soil acidity corrective. Both corn and black oat biomass exhibited substantial increases relative to the control, evidencing a highly positive agronomic response. In conclusion, limed biosolids demonstrate significant agricultural potential as a sustainable framework for nutrient cycling and soil chemical amelioration, ultimately driving crop yield optimization while promoting the valorization of urban organic waste.

Keywords: soil acidity; sandy texture; clayey texture; agronomic performance; liming.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1. Tratamento e disposição final do lodo de esgoto	13
2.1.1. Caracterização e tratamento.....	13
2.1.2. Destinação final do lodo de esgoto.....	14
2.2. Uso do lodo de esgoto na agricultura	15
2.2.1. Legislação	15
2.2.2. Fertilização e potencial produtivo do biossólido em solos de textura franco-arenosa e argilosa.....	21
2.2.3. Nutrição mineral de plantas	24
2.2.4. Correção da acidez do solo utilizando Biossólido caleado.....	28
3. HÍPOTESE	31
4. OBJETIVOS.....	31
4.1 Objetivo geral.....	31
4.2 Objetivos específicos.....	31
5. METODOLOGIA	31
5.1. Localização do experimento, tratamentos, culturas e solos utilizados.....	31
5.2. Lodo de esgoto: origem, tratamento e análises realizadas	32
5.3. Montagem do experimento: incubação do solo e semeadura do milho	38
5.3.1. Análises químicas realizadas no solo e no tecido vegetal do milho	40
5.4. Montagem do experimento: incubação do solo e semeadura da aveia preta	41
5.4.1. Análises químicas realizadas no solo e no tecido vegetal da aveia preta	42
5.5. Análise estatística dos dados	43
6. RESULTADOS	44
6.1 Experimento com a cultura do milho	44
6.1.1. Diâmetro do colmo, altura, número de folhas, massa seca e índice Spad das plantas de milho	44
6.1.2. Análises químicas na parte aérea das plantas de milho	46
6.1.3. Análises químicas no solo cultivado com o milho	51
6.2. Experimento com a cultura da aveia preta 6.2.1 Número de perfilhos, altura, massa seca e índice Spad das plantas de aveia preta.....	57
6.2.2. Análises químicas na parte aérea das plantas de aveia preta	59

6.2.3. Análises químicas no solo cultivado com a aveia preta	63
7 DISCUSSÃO	67
7.2 Acidez do solo e desempenho do milho e aveia preta.....	68
7.3 Dinâmica de Disponibilidade e Absorção de Nutrientes	71
7.4 Metais pesados	75
7.5 Estudos subsequentes	77
8. CONCLUSÕES	78
9. REFERÊNCIAS	80
12. ANEXO	91

1. INTRODUÇÃO

Com o crescimento da população, o Brasil vem investindo economicamente no saneamento básico, otimizando a coleta, tratamento e gerenciamento dos resíduos sólidos e líquidos para atender a determinação das normas e leis ambientais. Um exemplo é o lodo proveniente de águas residuais das estações de tratamento de esgoto (ETE), em que a sua produção mundial anual estimada é de 380 bilhões m³ (Mbasabire et al., 2024).

Em se tratando da destinação desse rejeito no Brasil, por ser um resíduo perigoso, o lodo de esgoto é destinado ao aterro sanitário, sendo essa uma opção não sustentável para a destinação deste resíduo (Andreoli et al., 2001; Martins et al., 2015). Esses aterros ocupam extensas áreas e não há conformidade com os princípios da Política Nacional de Resíduos Sólidos, que reforça a redução de resíduos nesses aterros para que possam ser reaproveitados para outros usos (ABNT, 2024; Brasil, 2010; Godoy, 2013). Diante disso, o aprimoramento nos sistemas de tratamento de esgoto está tendo destaque quanto a destinação do lodo, que é o subproduto sólido das etapas do tratamento (Martins et al., 2013).

A disposição final do lodo das ETE é uma preocupação mundial em razão do crescente volume produzido. A necessidade de tratamento dos resíduos gerados na agroindústria ou nas estações de tratamento de água e de esgoto tem como um dos caminhos o aproveitamento desse resíduo na agricultura, de forma a diminuir a poluição ambiental, e por consequência melhorar a saúde pública e ainda reduzir a dependência de fertilizantes químicos, os quais são altamente dependentes de importações, dando um passo para tornar o crescimento do sistema agrícola mais sustentável (Schneider et al., 2012). Estudos realizados desde a década de 80, segundo análise cienciométrica de Guimarães et al. (2018), demonstram que o aproveitamento mais nobre do lodo de esgoto das ETEs está na agricultura.

A partir de processos biológicos nos sistemas de tratamento de esgoto, o termo “lodo” é definido como *Biossólido*, a fim de destacar as características proveitosas deste produto. A utilização do biossólido como adubo orgânico possui caráter duplo em questões de beneficiamento ambiental, sendo o primeiro decorrente do destino com critério de um material considerado nocivo ao meio ambiente; e o segundo, devido à quantidade de matéria orgânica e nutrientes que o material apresenta, podendo contribuir de forma positiva para aumentar a produtividade das culturas, assim como para a melhoria das propriedades edáficas do solo (Martins et al., 2015). A valorização agrícola do biossólido é uma necessidade presente diante da crescente geração global deste resíduo, que se apresenta como um recurso valioso para a

fertilidade, mas que exige manejo rigoroso para evitar riscos latentes ao ecossistema (Kanteraki et al., 2022). Contudo, a aplicação desse produto deve ser realizada de forma controlada, independentemente do tipo de solo, para evitar impactos ambientais negativos, como a contaminação do solo e das águas subterrâneas (Santos, 2014).

Além de fertilizante, a aplicação do biofóssido pode trazer possíveis melhorias em serviços ambientais prestados pelo solo como, por exemplo, aumentar o armazenamento de água com a melhoria dos atributos físicos do solo, aumentar as reservas C no solo com o sequestro de carbono da atmosfera e, conseqüentemente, mitigar as emissões de gases de efeito estufa pelo sequestro de carbono perdido em práticas agrícolas convencionais no solo ao longo de anos (Desjardins et al., 2025; Lu et al., 2023; Wijesekara et al., 2021; Tian et al., 2015; Torri, Corrêa e Renella, 2014).

Nos últimos 20 anos, a legislação para o biofóssido, seja como matéria-prima para fabricar fertilizantes orgânicos e condicionadores de solo, ou para uso direto no solo como resíduo, muito avançou. Como matéria-prima, as regras foram atualizadas pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), por meio da Instrução Normativa SDA Nº 61 de 08/07/2020, e como resíduo, o seu uso direto no solo segue os critérios da resolução CONAMA Nº 498 de 19/08/2020, versão atualizada da Resolução CONAMA Nº 375 de 29/08/2006.

O sistema de coleta e tratamento de esgotos domésticos é um dos pressupostos básicos para um ambiente saudável, garantindo qualidade de vida e preservação do meio ambiente. Para a reciclagem agrícola do lodo de uma ETE é necessário o conhecimento do impacto causado no meio biótico e abiótico pela sua utilização, bem como o estudo e aprimoramento de tecnologias que permitam a sua inserção nos sistemas agrícolas (Andreoli et al., 1997; Lopes et al., 2005).

Segundo a resolução Conama (2020), a caracterização do biofóssido a ser aplicado deve incluir os seguintes aspectos: potencial agrônômico; redução de atratividade de vetores (animais atraídos pelos odores da decomposição de matéria orgânica); redução de substâncias inorgânicas e orgânicas potencialmente tóxicas; e qualidade microbiológica. Para a caracterização do potencial agrônômico do biofóssido, normalmente são caracterizados os seguintes parâmetros: carbono orgânico; fósforo total; nitrogênio total (digestão Kjeldahl); nitrogênio amoniacal, nitrato/nitrito; pH em água (1:10); potássio total; sódio total; enxofre total; cálcio total; magnésio total; umidade; e sólidos voláteis e totais, além de metais pesados.

Em geral, muitos estudos demonstram que a aplicação do biofóssido na agricultura é benéfica (Guimarães et al., 2018; D'Imporzano e Fabrizio Adani, 2023; Lin et al., 2023). No

trabalho de Guimarães et al. (2018) foram avaliados principalmente atributos químicos do solo e resposta de culturas agrícolas após a aplicação de bio sólido tratado. Os autores analisaram variáveis como pH, carbono orgânico, disponibilidade de fósforo, nitrogênio e cátions trocáveis, além do crescimento e rendimento das plantas. Os resultados mostraram que o bio sólido atuou como fonte de nutrientes e condicionador do solo, promovendo aumento do teor de matéria orgânica, melhoria da capacidade de troca catiônica e incremento de produtividade em comparação ao manejo convencional. Também observaram que, quando aplicadas dentro de limites agrônômicos, as doses não elevaram metais pesados a níveis críticos, reforçando a viabilidade do uso agrícola.

Já o estudo de D'Imporzano e Fabrizio Adani (2023) teve enfoque mais amplo em aspectos de economia circular e sustentabilidade, avaliando o papel do bio sólido e de produtos derivados (como compostos e digestatos) na substituição parcial de fertilizantes minerais. Os autores examinaram indicadores de eficiência no uso de nutrientes, emissões de carbono e impactos ambientais. Os resultados evidenciaram que o bio sólido pode reduzir a dependência de fertilizantes sintéticos, melhorar o balanço de carbono do sistema e manter níveis produtivos semelhantes ou superiores, especialmente em sistemas de manejo integrado. O estudo também destacou a importância do tratamento prévio e do monitoramento para atender às normas sanitárias e ambientais.

Por sua vez, Lin et al. (2023) focaram em processos biogeoquímicos e dinâmica de nutrientes, incluindo efeitos sobre microbiota do solo e disponibilidade de nitrogênio e fósforo ao longo do tempo. O trabalho avaliou tanto respostas imediatas quanto efeitos residuais, utilizando análises químicas e biológicas. Os autores observaram que o bio sólido promoveu aumento da atividade microbiana, maior mineralização de nutrientes e melhoria da estrutura do solo, fatores que contribuíram para maior eficiência de absorção pelas plantas. Também ressaltaram que o manejo adequado reduz riscos ambientais, como lixiviação de nutrientes ou acúmulo de contaminantes.

Entretanto, os estudos envolvendo aplicação de bio sólido no solo e nas culturas devem ser mais explorados, perante as legislações e ao desenvolvimento de técnicas de baixo custo, alta qualidade nutricional e efeito corretivo que trazem benefícios a agricultura.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Tratamento e disposição final do lodo de esgoto

A urbanização e a expansão industrial ao longo das últimas décadas vêm resultando na geração de resíduos sólidos, líquidos e gasosos em quantidade expressiva. Os resíduos líquidos são constituídos principalmente por águas residuárias provenientes de esgoto urbano e efluentes industriais (Mabrouk et al., 2023). Para que as águas residuárias possam ser lançadas aos cursos receptores é exigido que passem por tratamentos sanitários nas ETEs (Estação de Tratamento de Esgoto ou Estação de Tratamento de Efluentes), a fim de atender os padrões estabelecidos pela CONAMA N° 430 de 13/05/2011 (BRASIL, 2011). Após o tratamento das águas residuárias nas ETEs, são obtidos dois produtos: o efluente (despejo líquido proveniente dos processos) e o lodo de esgoto (subproduto sólido gerado nos processos de tratamento de esgoto sanitário) (Andreoli et al., 2014).

2.1.1. Caracterização e tratamento

O lodo é produzido durante o tratamento de esgoto, porém não inclui resíduos sólidos removidos de desarenadores, de gradeamento e peneiramento. A formação do sólido está na etapa de tratamento biológico de esgoto e pode variar conforme o sistema de tratamento utilizado, podendo ser lodo primário, composto por sólidos que sedimentam a partir do esgoto bruto; lodo biológico ou secundário, que consiste em biomassa microbiana aeróbica formada durante a remoção de matéria orgânica; lodo misto, uma combinação dos lodos primário e secundário; e lodo químico, originado durante o tratamento físico-químico da fase líquida do efluente (Andreoli et al., 2014).

A decantação do lodo após tratamento biológico gera materiais com diferentes teores de umidade (Van Haandel e Lettinga, 1994):

- 100% a 75% de umidade: lodo em estado líquido;
- 75% a 65% de umidade: material semi-sólido;
- 65% a 40% de umidade: sólido compacto;
- 40% a 15% de umidade: lodo granulado;
- 15% a 0% de umidade: lodo em forma de pó desidratado.

Quanto às frações de sólidos contidas no lodo, elas podem ser categorizadas em sólidos totais (em suspensão ou dissolvidos), sólidos fixos ou inorgânicos e, voláteis ou orgânicos. O teor do sólido no lodo é constituído por compostos orgânicos e minerais, microrganismos

patogênicos e metais pesados; a proporção de cada constituinte influencia as propriedades do material e na escolha do método de tratamento mais adequado (Andreoli et al., 2014).

Visando diminuir a presença de patógenos presentes no lodo ao ponto de não oferecer risco para a saúde pública, é necessário realizar um processo de higienização. Os mecanismos para a higienização do lodo podem ser realizados em via térmica, química, biológica ou por radiação. Cada uma dessas abordagens possui processos específicos para ajustar as variáveis de acordo com o uso pretendido do lodo. Segundo Andreoli et al. (2014), as principais técnicas utilizadas no Brasil para possibilitar a aplicação do biossólido na agricultura incluem a calagem, a compostagem e a secagem térmica. Apesar do tratamento térmico ser eficiente, por concentrar matéria orgânica e nutrientes presentes e eliminar os patógenos (Lara et al., 1999), requer um alto custo de investimento, além de demandar elevada energia para a devida eficiência na remoção de umidade (Andreoli et al., 2014). Diante disso, a compostagem e a caleação para obtenção de biossólido, são técnicas mais simples e são economicamente viáveis.

A caleação é um método de estabilização alcalina aplicável ao tratamento de lodos primários, secundários ou digeridos (tratamento preliminar), sejam eles líquidos ou sólidos. É adicionada uma quantidade adequada de cal ao lodo para elevar o pH a 12, resultando na diminuição da presença de microrganismos patogênicos e na redução potencial de odores. Ao lodo em estado líquido recomenda-se o uso de cal hidratada (Ca(OH)_2) para facilitar a mistura e permitir que os sólidos e a cal se mantenham em suspensão no recipiente de contato. Já no estado sólido, a aplicação de cal virgem tem a propriedade de interagir com a umidade do lodo, liberando calor no processo (Andreoli et al., 2014).

2.1.2. Destinação final do lodo de esgoto

A destinação final deste resíduo é complexa devido aos potenciais de contaminação que pode causar no solo e nas águas subterrâneas (Martins et al., 2021). Diferentes alternativas para a disposição final do lodo de esgoto podem ser dadas pelos seguintes tipos: incineração, landfarming, aproveitamento energético, insumo para indústria cerâmica e da construção civil, aproveitamento energético, disposição em aterros sanitários, agricultura, entre outros. No Brasil, a alternativa mais utilizada para o descarte está disposta para aterros sanitários, devido ao menor custo envolvido em relação às demais disposições (Rigo et al., 2014; Bringhenti et al., 2018). O uso mais nobre do aproveitamento do lodo é como biossólido na agricultura. Porém, requer mais estudos e estruturação para o devido entendimento do potencial de uso desses resíduos na agricultura. Embora o potencial como fonte de nutrientes e de compostos

orgânicos, estes resíduos podem aportar níveis críticos de metais pesados no ambiente, além de microrganismos patogênicos (Andreoli et al., 2014, Gubel, 2024).

2.2. Uso do lodo de esgoto na agricultura

A alternativa sustentável de reciclagem do lodo em solos cultivados pode favorecer a liberação dos principais nutrientes para a planta e colaborar para a redução da extração das reservas naturais que possuem grande demanda para o uso de fertilizantes na agricultura (Anda, 2023; Guimarães et al., 2018; Embrapa, 2018).

2.2.1. Legislação

Segundo a resolução 498/2020 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), o lodo de esgoto pode ser aplicado no solo desde que passe pelos critérios microbiológicos e químicos estabelecidos nesta resolução. Sendo assim, após o tratamento, o termo mais apropriado para denominar o produto é *Biossólido*.

Com a finalidade de reduzir os patógenos e atender valores máximos de metais pesados concentrados no biossólido, a resolução emite critérios rigorosos para que não haja riscos de contaminação ambiental e à saúde humana. O biossólido pode ser classificado em Classe A ou Classe B, a fim de ser destinado para o uso em solos. Os processos para a obtenção do biossólido com suas respectivas classes podem ser observados no Anexo 01 da respectiva resolução (Brasil, 2020). Esses critérios trata-se de processos físicos, químicos ou biológicos de tratamentos do lodo de esgoto para redução de atratividade de vetores em solos (animais atraídos pelo odor da matéria orgânica). A depender do tipo de tratamento, o critério será de redução de sólidos totais, sólidos voláteis, aumento de pH e temperatura, aplicação e incorporação no solo. Também se referem ao valor máximo de alguns metais permitidos no biossólido, além da taxa máxima anual e carga máxima acumulada dessas substâncias químicas em solos quando for do uso de biossólido (Brasil, 2020).

Para determinação da dose de aplicação do biossólido, em toneladas de sólidos totais por hectare ($t\ ha^{-1}$ de ST), por exemplo, alguns critérios podem ser utilizados. Por exemplo, aportar a quantidade de resíduo que atenda a exigência nutricional da cultura conforme a demanda de nitrogênio ou que seja suficiente para corrigir a acidez do solo conforme o pH da ideal para a cultura. Outros critérios podem ser: quociente entre a dose de matéria orgânica (em $kg\ ha^{-1}$ de MO) a ser incorporada ao solo (MOinc) via aplicação do biossólido e o teor de MO no biossólido (Classe 1 ou Classe 2); não exceder a dose de aplicação do valor mais limitante para os metais pesados (Classe 2) (Brasil, 2020).

De maneira geral, os bio sólidos classificados em Classe A ou Classe B possuem limitações quanto ao seu uso em culturas e algumas restrições em relação às suas aplicações na agricultura, sendo elas (Tabela 1 e Tabela 2):

Tabela 1. Usos permitidos e respectivas restrições para bio sólido da Classe A.

Uso	Restrição
Não aplicar o bio sólido 1 mês antes do período de colheita.	Não aplicar o bio sólido 1 mês antes do período de colheita.
Pastagens e Forrageiras	Não aplicar o bio sólido 1 mês antes do período de colheita de forrageiras e do pastejo.

Fonte: Brasil (2020).

Tabela 2. Usos permitidos e respectivas restrições para bio sólido da Classe B.

Uso	Restrição
Cultivo de produtos alimentícios que não sejam consumidos crus e produtos não alimentícios.	Não aplicar o bio sólido 4 meses antes do período de colheita.
Pastagens e forrageiras	Não aplicar o bio sólido 2 meses antes do pastejo. Não aplicar o bio sólido 4 meses antes do período de colheita de forrageiras.
Árvores frutíferas	A aplicação deve ser realizada após a colheita.

Fonte: Brasil (2020).

2.2.1.1. Patógenos

A preocupação com patógenos no solo é relevante, uma vez que alguns organismos são causadores de doenças e resistentes a diversas condições ambientais. Ao se considerar o lodo de esgoto como adubo ou corretivo de acidez do solo é necessário conhecer quais são os patógenos presentes no lodo que podem afetar o desenvolvimento das plantas e/ou colocar em risco a saúde humana. Segundo a análise cienciométrica de Guimarães et al. (2018), os principais patógenos encontrados nos bio sólidos foram vírus, protozoários, nematoides e bactérias. Das bactérias citadas na pesquisa, estão a *Escherichia coli*, *Salmonella* spp., *Shigella* spp., sendo a primeira encontrada em fezes humanas e animais, e as outras duas no esgoto doméstico (Andreoli et al., 2014; Nuvolari, 2009). As principais doenças causadas por essas bactérias são: salmonelose (*Salmonella* spp.), disenteria ou shigelose (*Shigella* spp.), colite hemorrágica e síndrome hemolítica urêmica (*Escherichia coli*) (Do Nascimento, 2008).

Os ovos de helmintos requerem uma considerável atenção, pois o patógeno é o mais resistente no solo e na vegetação, uma vez que somente um ovo viável é suficiente para desencadear algum tipo de infecção em um hospedeiro. A cisticercose, por exemplo, pode gerar um cisticerco por meio de um único ovo viável e ocasionar danos permanentes ou fatais ao cérebro ou aos olhos de um indivíduo, podendo muitas vezes se manifestar depois de anos após ser ingerido no corpo humano (Brasil, 2010; Andreoli et al., 2014).

A CONAMA 498/2020 determina que para o biossólido ser classificado como Classe A, deverá atender ao limite máximo de 10^3 *Escherichia coli* por grama de sólidos totais (g^{-1} de ST) e ser proveniente de um dos processos de redução de patógenos descritos na Tabela 3, com a devida demonstração de atendimento dos respectivos parâmetros operacionais.

Tabela 3. Processos para obtenção de biossólido Classe A.

PROCESSO	REQUISITOS			
	Regime	Aplicação	Requisitos	Tempo x Temperatura
Alternativa 1: Lodo tratado por um dos quatro regimes (A, B, C e D apresentados ao lado) de tempo (D em dias) e temperatura (t em °C). O período de tempo associado a determinado valor de temperatura deve ser determinado por meio das equações para cada regime apresentadas, na última coluna dessa tabela, devendo-se respeitar os requisitos mínimos de tempo e temperatura para cada regime especificados na quarta coluna desta tabela.	A	Lodo com teor de ST igual ou maior que 7% (exceto aqueles atendidos pelo regime B)	A temperatura do lodo deve ser mantida igual ou acima de 50°C por no mínimo 20 minutos.	$D = \frac{131700000}{10^{0,14t}}$
	B	Lodo com ST igual ou maior que 7%, na forma de pequenas partículas, aquecido por meio do contato entre gases ou líquidos imiscíveis.	A temperatura do lodo deve ser mantida igual ou acima de 50°C por no mínimo 15 segundos.	$D = \frac{131700000}{10^{0,14t}}$
	C	Lodo com teor de ST menor que 7%	Aquecido de, no mínimo, 15 segundos até 30 minutos.	$D = \frac{131700000}{10^{0,14t}}$
	D	Lodo com teor de ST menor que 7%	A temperatura do lodo deve ser mantida igual ou acima de 50°C por no mínimo 30 minutos de tempo de contato.	$D = \frac{50070000}{10^{0,14t}}$
Alternativa 2: Lodo tratado por processos que proporcionem valores elevados de pH e temperatura.	Processos que proporcionem elevação do pH (valores acima de 12, por pelo menos 72 horas) e da temperatura (mantida acima de 50°C, por pelo menos 12 horas durante o período em que o pH estiver acima de 12) e secagem do lodo de esgoto sanitário por exposição ao ar, no caso de materiais que permaneçam com teor de ST maior que 50%, após o período de 72 horas da mistura do material alcalino.			
Alternativa 3: Lodo tratado em processos de regime de Tempo X Temperatura ou de pH e temperatura elevados que não	Esta alternativa depende da validação do processo de tratamento, deve-se documentar as condições de operação que garantam a obtenção de biossólido com menos de 1 ovo viável de helminto g^{-1} de ST. Demonstrada essa condição, os parâmetros de controle operacional do			

atendem os requisitos descritos nas alternativas 1 e 2.	processo de tratamento podem ser utilizados como indicadores da produção de bio sólido classe A, não sendo mais necessário caracterizar o lodo tratado em termos de ovos de helmintos. Para validação dessa alternativa um plano de amostragem detalhado deve ser submetido ao órgão ambiental competente.
Alternativa 4: Lodo tratado em processos não especificado	Esta alternativa é aplicada somente a bio sólido a ser destinado em lotes. A caracterização de ovos viáveis de helmintos deve ser realizada no momento da formação do lote de bio sólido e sua presença deverá ser menor que 1 (um) ovo viável de helmintos (nematoides intestinais humanos) por grama de sólido total (g-1 de ST).
Alternativa 5: Lodo tratado em um dos processos de redução adicional de patógenos, listados na coluna ao lado	Atendimento dos requisitos de <i>Escherichia coli</i> de Classe A e atendimento dos seguintes critérios, de acordo com cada processo de redução adicional de patógenos: a) compostagem confinada ou em leiras aeradas (3 dias a 55°C no mínimo) ou com revolvimento das leiras (15 dias a 55°C no mínimo, com revolvimento mecânico da leira durante pelo menos 5 dias, ao longo dos 15 do processamento); b) secagem térmica direta ou indireta para reduzir o teor de água no lodo de esgoto a 10% ou menos, devendo a temperatura das partículas de lodo superar 80°C ou a temperatura de bulbo úmido de gás, em contato com o lodo de esgoto, no momento da descarga do secador, ser superior a 80°C; c) tratamento térmico pelo aquecimento do lodo de esgoto sanitário, na forma líquida, a 180°C, no mínimo, durante um período de 30 minutos; d) digestão aeróbia termofílica a ar ou oxigênio, com tempos de residência de 10 dias, sob temperaturas de 55 a 60°C; e) processos de irradiação com raios beta a dosagens mínimas de 1 megarad a 20°C, ou com raios gama na mesma intensidade e temperatura, a partir de isótopos de Cobalto 60 ou Césio 137; f) processos de pasteurização, pela manutenção do lodo de esgoto a uma temperatura mínima de 70°C, por um período de pelo menos 30 minutos.
Alternativa 6: Lodo tratado em um processo equivalente a um processo de redução adicional de patógenos.	O lodo de esgoto sanitário é tratado por um outro processo, comprovadamente equivalente a um processo de redução adicional de patógenos e aceito pelo órgão ambiental competente.

Fonte: Brasil (2020).

Já para que o bio sólido seja classificado como Classe B (Tabela 4), deverá atender ao limite máximo de 10^6 *Escherichia coli* por grama de sólidos totais (g^{-1} de ST) ou ser proveniente de um dos processos de redução de patógenos descritos na Tabela 04, com a devida demonstração de atendimento dos respectivos parâmetros operacionais (BRASIL, 2020).

Tabela 4. Processos para obtenção de biossólido Classe B.

PROCESSO	REQUISITOS
Alternativa 1: Lodo tratado em um processo de redução significativa de patógenos.	a) digestão aeróbia - a ar ou oxigênio, com retenções mínimas de 40 dias, sob temperatura de 20°C ou por 60 dias, sob temperatura de 15°C;
	b) secagem em leitos de areia ou em bacias (solarização), pavimentadas ou não, cobertas ou não, até atingir teor de sólidos mínimo de 60%;
	c) digestão anaeróbia por um período mínimo de 15 dias a 35- 55°C ou de 60 dias a 20°C;
	d) compostagem por qualquer um dos métodos citados anteriormente, desde que a biomassa atinja uma temperatura mínima de 40°C, durante pelo menos cinco dias, com a ocorrência de um pico de 55°C, ao longo de quatro horas sucessivas durante este período;
	e) estabilização com cal, mediante adição de quantidade suficiente para que o pH seja elevado até pelo menos 12, por um período mínimo de duas horas.
Alternativa 2: Lodo tratado em um processo equivalente aos de redução significativa de patógenos.	O lodo de esgoto sanitário é tratado por um outro processo, comprovadamente equivalente a um processo de redução significativa de patógenos e aceito pelo órgão ambiental competente.

Fonte: Brasil (2020).

2.2.1.2. Metais pesados

A presença de metais pesados no lodo de esgoto pode limitar seu uso na agricultura, pois pode ocasionar acúmulo desses metais no solo, provocando a suspensão do metabolismo fisiológico e bioquímico das plantas, afetando o seu desenvolvimento e conseqüentemente sua produtividade. Porém, os efeitos dependerão da concentração dos metais pesados no lodo de esgoto e das doses aplicadas no solo (Junior et al., 2011; Kahan et al., 2022) e, possivelmente, da periodicidade da aplicação. As aplicações descontrolados de lodo no solo são preocupantes, pois podem causar danos em curto e a longo prazo no meio ambiente (Nascimento et al., 2004; Gomes et al., 2006).

Com o objetivo de avaliar áreas contaminadas, o Conselho Nacional do Meio Ambiente publicou, em 2009, a resolução 420/2009, que dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas. As concentrações máximas permitidas de substâncias inorgânicas no solo devem ser consideradas para aplicar biossólido na agricultura (Tsutiya et al., 2002). A resolução CONAMA 498/2020 estabelece valores máximos permitidos de substâncias químicas no biossólido a ser destinado para uso, em solos tanto da Classe 1 quanto da Classe 2, como podem ser observados na Tabela 5. Já o biossólido de Classe 2 poderá ser aplicado somente se a taxa máxima anual e a carga máxima acumulada de substâncias químicas não exceder os limites apresentados na resolução, como podem ser observados na Tabela 6 (Brasil, 2020).

Tabela 5. Valores máximos permitidos de substâncias químicas no bioestabilizado a ser destinado para uso, em solos.

Substâncias Químicas	Valor Máximo permitido no bioestabilizado (mg/kg ⁻¹ ST)	
	Classe 1	Classe 2
Arsênio	41	75
Bário	1300	1300
Cádmio	39	85
Chumbo	300	840
Cobre	1.500	4.300
Cromo	1.000	3.000
Mercúrio	17	57
Molibdênio	50	75
Níquel	420	420
Selênio	36	100
Zinco	2.800	7.500

Fonte: Brasil (2020).

Tabela 6. Taxa máxima anual e carga máxima acumulada de substâncias químicas em solos quando do uso de bioestabilizado Classe 2.

Substâncias químicas	Taxa máxima anual (kg ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Carga máxima acumulada (kg ha ⁻¹)	
		Solos de áreas degradadas	Solos de áreas não degradadas
Arsênio	2	20	41
Bário	13	130	260
Cádmio	1,9	19	39
Chumbo	150	1500	3000
Cobre	75	750	1500
Cromo	15	1.500	300
Mercúrio	0,85	8,5	17
Molibdênio	0,65	6,5	13
Níquel	21	210	420
Selênio	5	50	100
Zinco	140	1.400	2800

Fonte: Brasil (2020)

Um estudo feito com o cultivo do manjeriço adubado com lodo de esgoto verificou-se um aumento dos teores de metais pesados na parte aérea e na raiz da planta (Lajayer et al., 2019). A pesquisa realizada por Jarausch-Wehuheim et al. (1999) detectaram um aumento de Zn em diversas partes das plantas de milho quando este foi adubado com lodo de esgoto, porém a concentração foi baixa nos grãos. Quanto à lixiviação, Campos (2017) constatou que não houve lixiviação de metais pesados que estavam no bioestabilizado tanto em solo arenoso quanto argiloso, possivelmente por conta do elevado teor de matéria orgânica presente no bioestabilizado.

Observou-se aumento dos teores de Cu e Zn na cultura do milho com a aplicação do bioestabilizado no solo até um ano após o plantio do milho. As aplicações foram bimestrais e na

camada de 0-20 cm totalizando 388 Mg ha⁻¹ em base seca. Esta dosagem não proporcionou aumento da produtividade do milho. Mas também não alterou a disponibilidade dos metais Cd, Cr, Mn, Ni e Pb para as plantas (Anjos e Matiazzo, 2000). Utilizando fertilizantes organominerais a base de lodo de esgoto nas culturas de canola, milho e girassol, Kominko et al. (2022) relataram que as doses crescentes podem levar ao acúmulo de metais pesados, principalmente Cd e Ni, na biomassa vegetal.

As formas hidratadas dos óxidos de ferro, a matéria orgânica (MO) e os argilominerais do solo contribuem para a retenção de metais pesados presentes nos bio sólidos incorporados ao solo, onde os óxidos de ferro possuem superfícies reativas e trocam íons metálicos, assim absorvendo e diminuindo a quantidade de metais dissolvidos na solução do solo. Já a matéria orgânica contém grupos funcionais, como grupos carboxila e hidroxila, que podem formar complexos derivados com metais pesados, além de seus colóides apresentarem grande área de superfície específica proporcionando locais de troca para reter íons assim como os argilominerais, que também atuam nesse processo podem além disso reter íons metálicos positivos impedindo que se movam livremente no solo (Kabata-Pendias e Pendias, 1987).

2.2.2. Fertilização e potencial produtivo do bio sólido em solos de textura franco-arenosa e argilosa

A utilização do bio sólido, de modo geral, é fonte de nutrientes essenciais para o crescimento e desenvolvimento das plantas. Além disso, pode aumentar o teor de MO e melhorar a estrutura e as propriedades químicas do solo. Por exemplo, alguns autores (Malta, 2001; Bettiol e Camargo, 2006; Espinoza, 2023) verificaram que o uso do bio sólido elevou o pH do solo e diminuiu o teor de alumínio trocável. Ainda, o bio sólido promove o aumento da fertilidade do solo, com reflexos no aumento da capacidade de troca catiônica - CTC (Malta, 2001; Bettiol e Camargo, 2006; Espinoza, 2023).

A aplicação do lodo no solo é benéfica para melhorar os atributos químicos, físicos e biológicos de solos argilosos e solos arenosos. Por exemplo, em solos de textura argilosa verificou-se aumento na retenção de água no solo (Bettiol e Camargo, 2006). Em solos argilosos, a maior quantidade de matéria orgânica no solo conduz a uma maior adsorção de cátions, o que possibilita a utilização de doses mais elevadas de bio sólidos em comparação com solos arenosos. Essa adsorção possibilita reduzir a lixiviação de substâncias poluentes (Conte et al., 2016).

Solos de textura argilosa em comparação aos solos de textura franco-arenosa, normalmente, apresentam maior CTC em razão da maior superfície específica, isso porque as

partículas da argila são muito pequenas e composta por camadas finas empilhadas, proporcionando muitos locais para a adsorção de íons catiônicos. Isso impacta diretamente nas propriedades do solo. A sua maior CTC atua na retenção de nutrientes na adsorção pelas partículas de argila (Silva e Araújo, 2005; Aegro, 2023). É possível relatar que ele é mais resistente à mudança de pH (maior poder de tamponamento) devido a sua maior CTC que possui mais grupos funcionais de hidroxila do que solos arenosos, assim para que ocorra neutralização as quantidades de calcário no solo serão maiores (Ribeiro, 2022).

Freiberg et al. (2022) demonstraram que em sete anos de utilização de biossólido em solo argiloso, a capacidade máxima de adsorção de fósforo aumentou em 25%. Esse aumento pode ser atribuído à estabilidade do fósforo que interagiu com as pontes de ligação de cálcio, nutrientes encontrados no biossólido.

Solos com textura franco-arenosa, pobres em colóides argilosos e orgânicos, apresentam baixa fertilidade e baixa capacidade de reter água. Isso reflete na acessibilidade das plantas em absorver os nutrientes, pois o maior teor de MO reflete em aumento da CTC (Donaggema et al., 2016; Sciubba et al., 2014; Netto-Ferreira, 2020). Por apresentarem predomínio de macroporos e baixos teores de MO, os solos arenosos favorecem uma drenagem mais rápida, tendo como consequência menores condições de reter água, o que pode favorecer a lixiviação de nutrientes (Spera et al., 1998).

Todavia, o uso de biossólidos pode proporcionar o aumento de MO em solos arenosos, favorecendo a retenção de umidade e melhorando a estrutura e estabilidade dos agregados na camada superficial (Paredes Filho, 2011; Júnior et al., 2021). A aplicação de biossólido em solos arenosos favorece o aumento da fertilidade com reflexos na CTC, onde logo após a primeira aplicação anual de biossólido, as propriedades químicas do solo começam a aumentar (Cooper e Demarco, 2023; Júnior et al., 2021).

Conte et al. (2017) verificaram em seu experimento de 60 dias conduzido em casa de vegetação utilizando biossólido no solo, o aumento da lixiviação de Ca e K em solo arenoso quando foram aplicadas doses superiores a 15 Mg ha^{-1} , enquanto para o Mg esse aumento foi observado com doses acima de 30 Mg ha^{-1} . Apesar deste fato, o estudo de Campos (2017) que visou determinar a lixiviação de elementos químicos no solo arenoso e argiloso a partir de diferentes doses de biossólido mostrou que a lixiviação do Ca e Mg adubado com biossólido foi menor que a lixiviação dos nutrientes no solo argiloso quando comparados aos solos sem adição do biossólido (tratamento testemunha).

Fidalski e Chaves (2010) verificaram aumento nos teores de Ca e Mg na camada de 0-40 cm com a aplicação de biossólido caleado na cultura de *Coffea arabica* L. A incorporação

e o aumento desses nutrientes no fertilizante podem ser promovidos através da adição de cal virgem (CaO), por essa conter os elementos em sua composição (Pedrosa et al., 2017). Contudo, Anjos (1999), que utilizou biossólido caleado em seu experimento, alerta que, a depender da dosagem de aplicação, o biossólido pode alterar as propriedades químicas do seu meio em relação ao alto teor de sais que contém o sólido total, assim podendo aumentar a condutividade elétrica no solo em dosagens a partir de 83,03 Mg ha⁻¹.

Perante o esperado ganho produtivo decorrente nas áreas agrícolas, a Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar) destinou gratuitamente, em 2021, 14.370 toneladas de lodo de esgoto tratado para 89 produtores de 52 municípios do estado; isso correspondeu uma área potencial para aplicação do resíduo de 2.655 hectares. No Rio Grande do Sul, a companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN) estabeleceu, juntamente com a Embrapa, critérios para a utilização do lodo das Estações de Tratamento de Água (ETAs) para uso agrícola, e a partir disso, a Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura criou a Resolução CONSEMA 461/2022 que define critérios e procedimentos para o uso de lodos e seus produtos derivados em solos, e dá outras providências.

Estudos de análise produtiva do uso de lodo de esgoto como fertilizante vêm sendo realizados nas últimas décadas. Vieira et al. (2005) compararam diferentes doses de biossólido (0; 1,5; 3; 6 t ha⁻¹) como fertilizante do solo na produção de 2 anos de safra de soja, onde o lodo de esgoto digerido anaerobicamente foi aplicado somente no primeiro ano e continha as seguintes características químicas: N, 40,7 g kg⁻¹; P, 11,5 g kg⁻¹; K, 8,3 g kg⁻¹; Ca, 17 g kg⁻¹; Mg, 2,5 g kg⁻¹; S, 11,7 g kg⁻¹; B, 9 mg kg⁻¹; Cu, 707 mg kg⁻¹; Fe, 22,9 g kg⁻¹; Mn, 168 mg kg⁻¹; Zn, 2.314 mg kg⁻¹; Al, 9,51 g kg⁻¹; Cd, 9,2 mg kg⁻¹; Pb, 151 mg kg⁻¹; Cr, 597 mg kg⁻¹; Ni, 268 mg kg⁻¹; Na, 4 g kg⁻¹; umidade, 767 g kg⁻¹. O solo utilizado foi classificado como Latossolo Vermelho Distroférico textura argilosa com a seguinte composição química: pH (CaCl₂), 4,4; P, 8 mg dm⁻³ (método da resina); K, 1,2 mmolc dm⁻³; Ca, 11 mmolc dm⁻³; Mg, 6 mmolc dm⁻³; H+Al, 58 mmolc dm⁻³; CTC, 76,2 mmolc dm⁻³; V, 24 (%) e MO, 28 g dm⁻³. Os resultados das maiores produções de soja foram com as doses de 3 Mg ha⁻¹ (2,074 e 2,002 kg ha⁻¹ no 1º e 2º ano, respectivamente) e 6 Mg ha⁻¹ (3,099 e 3,118 kg ha⁻¹ no 1º e 2º ano, respectivamente). Em outro estudo com diferentes doses de lodo, verificou-se que a partir de 7,7 Mg ha⁻¹ de lodo para a adubação da cultura do milho ocorreu decréscimo na produtividade dos grãos (Gomes et al., 2007) provavelmente por conta de efeitos tóxicos dos metais pesados presentes no lodo, como As, Co, Cr, Se, Zn, Fe e Cu, os quais estão relacionados com as doses aplicadas (Coscione et al., 2010).

Algumas pesquisas indicam que a adubação com biofóssido em culturas agrícolas apresenta desempenho igual ou superior ao uso de outros tipos de fertilizantes, sendo este efeito decorrente da interação entre o biofóssido e a textura do solo, que interfere na disponibilidade dos nutrientes. Afáz et al. (2017) compararam o efeito do uso lodo de esgoto com fertilizante mineral e verificaram que o lodo propiciou maior quantidade de massa seca das mudas de eucalipto. Já Sofiatti et al. (2007) compararam a produção de algodão com a fertilização de lodo de esgoto e com cinzas de madeira e constataram maior produção e desenvolvimento das plantas com o uso do lodo.

A associação do biofóssido com outros compostos demonstram maiores produtividades das culturas do que o seu uso sozinho. Na cultura do trigo, Tsadilas et al. (2014) demonstraram que o lodo de esgoto calcado aplicado juntamente com as cinzas volantes de carvão de uma termelétrica causaram aumento significativo do rendimento de grãos e a biomassa vegetal quando comparado com outros tratamentos. Em outro estudo, foi observado que o lodo de esgoto pirolisado à 300°C com NPK foi o tratamento que mais aumentou a produtividade do milho, comparado com somente o lodo de esgoto (20% de umidade) e lodo de esgoto pirolisado 500°C (SSB500) (Chagas et al., 2021). Isso ocorreu devido a liberação lenta de fósforo e nitrogênio do lodo de esgoto pirolisado com a rápida absorção de N e K do fertilizante mineral (Guo, Song, Kazda, 2012).

2.2.3. Nutrição mineral de plantas

As plantas necessitam de componentes nutricionais específicos para sustentar seu crescimento e desenvolvimento. Esses componentes se referem a elementos que desempenham funções específicas e fundamentais no metabolismo vegetal. Os elementos são classificados em dois grupos: macronutrientes e micronutrientes (Kirkby e Römheld, 2007). Os macronutrientes consistem nos elementos necessários em quantidades substanciais para o crescimento das plantas, sendo eles o nitrogênio, potássio e fósforo, juntamente com cálcio, magnésio e enxofre. Enquanto os micronutrientes são aqueles exigidos em quantidades menores, como boro, cloro, molibdênio, cobre, ferro, zinco e manganês. Quando o solo não apresenta as quantidades mínimas desses nutrientes, é fundamental a aplicação de adubos para suprir a demanda das plantas (Embrapa, 2023). Nesse sentido, destaca-se o possível potencial fertilizante do biofóssido, que é constituído tanto por macro como por micronutrientes. Possivelmente, o mesmo supre a necessidade nutricional das plantas com liberação lenta dos nutrientes e proporcional à taxa de demanda pelas plantas, além de beneficiar microrganismos benéficos no solo (Bremm, 2005; Andreoli et al., 2014).

Os biossólidos são ricos em nutrientes, incluindo fósforo, nitrogênio, potássio, cálcio, magnésio e enxofre (Sharma et al., 2017; Gherghel et al., 2019). O nitrogênio é o elemento mais abundante no lodo de esgoto, origina-se tanto dos resíduos presentes no esgoto quanto da biomassa no lodo, ocorrendo em formas inorgânicas, tais como nitrogênio amoniacal, nitrato e nitrito, bem como na forma orgânica, como aminoácidos, proteínas e outros compostos (Andreoli et al., 2014).

O biossólido na agricultura contribui de duas maneiras na otimização do uso de P: de uma maneira ele libera o nutriente de forma lenta e contínua, e quando ocorre a decomposição da matéria orgânica do biossólido, é liberado ácidos que ajudam na solubilização de uma parte do P, e em outra maneira, complexando esse elemento na solução do solo para ser liberado mais tarde (Andreoli et al., 2014). Além disso, em solos enriquecidos com biossólidos, o P pode interagir com outros elementos químicos, como carbono (C) e nitrogênio (N), podendo melhorar a fertilidade beneficiado pelos processos biológicos, além de promover um controle na liberação desses nutrientes para as plantas (Torri et al., 2017).

As quantidades de fósforo no biossólido são menores que as do nitrogênio, ainda sim, a potencialidade deste nutriente no biossólido em favorecer a melhoria na biodisponibilidade no solo para a nutrição das plantas foi evidenciada em alguns estudos (Rambo, 2005; Junior et al., 2019). Corrêa et al. (2008) avaliaram a aplicação superficial de diferentes corretivos para demonstrar os efeitos no crescimento radicular e produtividade da aveia preta. Os autores verificaram maior disponibilidade de P na camada de 0-5 até 20-40 cm, onde foi aplicado somente lodo de esgoto na dose de $2,6 \text{ t ha}^{-1}$ comparando com calcário dolomítico ($2,3 \text{ t ha}^{-1}$), lodo de esgoto caleado ($1,7 \text{ t ha}^{-1}$) e escória de aciaria ($3,5 \text{ t ha}^{-1}$).

O teor de potássio nos biossólidos é geralmente baixo, dado pela perda de K no efluente durante o tratamento de esgoto (Bittencourt et al., 2014). Portanto, a maior parte do potássio acaba concentrada no efluente líquido (Rambo, 2005). Dessa forma, diversas pesquisas indicam que a adição de potássio ao biossólido é crucial para atender à demanda nutricional das culturas (Poggiani et al., 2004; Alonso, 2018).

Em relação ao Ca, Mg e S nos biossólidos, esses nutrientes são majoritariamente encontrados na forma mineral, e mesmo com aplicações mínimas, podem atender às demandas de grande parte das culturas agrícolas. Geralmente, o Ca e o Mg são adicionados em lodos estabilizados através da caleação, porém o Ca destaca-se em maior quantidade devido à adição desse elemento no processo de higienização (Alcântara, 2003; Rambo, 2005).

O biossólido promove o aumento dos teores dos micronutrientes no solo como o Ferro (Fe), Cobre (Cu), Manganês (Mn) e Zinco (Zn), que geralmente são fornecidos de forma insuficiente por adubos químicos convencionais. Os biossólidos, ao serem aplicados em quantidades adequadas para suprir a demanda de nitrogênio, geralmente satisfazem às recomendações de micronutrientes como Cu e Zn das culturas (Marques e Melo, 2001; Rambo, 2005; Sun et al., 2016).

O zinco é assimilado pelas plantas na forma catiônica, contribuindo para o crescimento e para os sistemas enzimáticos. O cobre é crucial para a formação de clorofila e execução da fotossíntese nas plantas, formando, junto à matéria orgânica, complexos mais estáveis. O boro é vital na germinação dos grãos e significativo na formação de proteínas. Já o Mn é absorvido pelas plantas como Mn^{2+} ; influencia na absorção, transporte e utilização de diversos nutrientes essenciais como Cu, Zn e Fe (Camargo et al., 2013).

No estudo de Pogozzo et al. (2002) em que foi utilizado lodo de esgoto neutralizado com uma mistura de CaO + MgO em 60% de seu peso seco, em um Latossolo Vermelho de textura argilosa com a cultura de milho, com uma dose de 19 Mg ha^{-1} , constatou-se que o milho absorveu em maiores quantidades os micronutrientes Cu, Fe, Mn e Zn do que no tratamento testemunha. Foi observado que o biossólido tinha concentrações elevadas de Cu ($7,0 \text{ mg kg}^{-1}$), Fe ($209,0 \text{ mg kg}^{-1}$) e Zn ($52,0 \text{ mg kg}^{-1}$), que inclusive poderiam ser fitotóxicos, mas esse fato não foi constatado. Já para Mn, a contribuição pelo biossólido no solo foi pequena comparado com o teor natural.

Analisando a concentração dos micronutrientes em biossólido, Guerrini e Trigueiro (2004) encontraram teores mais elevados de Zn, Cu, Fe e Mn (mg kg^{-1}) em misturas de biossólido (BIO) com casca de arroz (CAC) com as concentrações 0 a 100 % (kg) de biossólido. Cada mistura (% BIO / % CAC) compôs um tratamento: T1-100/ 0; T2-90/10; T3-80/20; T4-70/30; T5-60/40; T6-50/50; T7-40/60; T8-30/70; T9-20/80; T10-10/90; T11-0/100. As concentrações proporcionaram para Zn ($911,63$ e $105,60 \text{ mg kg}^{-1}$ com 0 e 100%, respectivamente), Cu ($240,90$ e $11,55 \text{ mg.kg}^{-1}$ com 0 e 100%, respectivamente), Fe ($205,15$ e 440 mg kg^{-1} com 0 e 100%, respectivamente) e Mn ($160,88$ e $546,98 \text{ mg kg}^{-1}$ com 0 e 100%, respectivamente), evidenciando que as menores dosagens de biossólido apresentaram os menores teores desses micronutrientes. Camargo et al. (2013) encontraram efeitos semelhantes àqueles dos estudos citados anteriormente, aplicando o biossólido com esterco bovino e vermiculita para produção de pinhão manso. Os substratos (tratamentos) foram feitos com as seguintes concentrações (kg): T1-10% de biossólido + 40% esterco bovino + 50% vermiculita; T2-20% de biossólido + 40% esterco bovino + 40% vermiculita; T3-30% de biossólido + 40%

esterco bovino + 30% vermiculita; T4-40% de biossólido + 40% esterco bovino + 20% vermiculita. De acordo com as doses de 10, 20, 30 e 40% de biossólido no pinhão-manso, verificou-se um aumento significativo de micronutrientes apenas nos tratamentos T1 (10%) e T4 (40%) biossólido para B (21,83 a 46,66 mg kg⁻¹), Cu (6,83 a 13,66 mg. kg⁻¹), Mn (79,20 a 115 mg kg⁻¹) e Zn (21,83 a 83,20 mg kg⁻¹) e os maiores teores de Fe (180,20 a 304,83 mg kg⁻¹).

2.2.3.1. Biossólido nas culturas do milho e da aveia preta

De acordo com Mota (2006), milho, feijão, soja, sorgo, canola, trigo, aveia, cevada e plantas forrageiras para adubação verde, são as culturas mais indicadas para serem adubadas com o biossólido tendo em vista a minimização de problemas de saúde pública. Os produtos dessas culturas são consumidos somente após processo industrial, à exceção das forrageiras que são incorporadas ou permanecem como cobertura do solo. As culturas do milho, trigo, cana e sorgo se destacam no uso do biossólido, apresentando resultados promissores em termos de ganhos de produtividade, além de que o milho e trigo predominam em extensões agrícolas globais (Guimarães et al., 2018).

Com a aplicação da dosagem de 75 Mg ha⁻¹, em base seca de lodo de esgoto compostado, Junior et al. (2013) verificaram maior rendimento do milho, aumentos dos teores de N, P e P nas folhas e de N, P, K, Ca e S no solo. Além de constatarem o aumento das concentrações de P na biomassa da parte aérea do milho, Gonzaga et al. (2017) também verificaram o aumento de N após adubação com biossólido a partir da pirólise, sendo verificados que a aplicação de 60 Mg ha⁻¹ aumentou o teor de N do milho quase cinco vezes em relação à testemunha.

Martins et al. (2018) verificaram que apesar do biossólido compostado aumentar os teores de N, P, K, Mg e Zn nos grãos de milho, o mesmo não influenciou os teores de Ca, S, Cu, Ni e Pb. O tratamento que mais teve retorno quanto ao aumento de nutrientes e na produtividade de milho foi a proporção de 2:1 de biossólido compostado mais resíduos de poda urbana, quando comparado aos demais tratamentos (substrato comercial - 0:1; 1 parte de composto de lodo de esgoto e resíduo de poda urbana:2 partes de substrato comercial - 1:2; 1 parte de composto de lodo de esgoto e resíduo de poda urbana:1 parte de substrato comercial - 1:1; 1 parte de composto de lodo e resíduo de poda urbana - 1:0).

Em relação à cultura da aveia, a aplicação de adubação nitrogenada proveniente do lodo de esgoto (equivalente a 140 kg ha⁻¹ de N) proporcionou aumento da massa seca após 120 dias da semeadura, sendo a produtividade final de 6.205 kg ha⁻¹ de matéria seca, quando comparado

aos outros tratamentos, sendo T0 – sem adubação nitrogenada: 5288,9 kg ha⁻¹; T1 – (70 kg ha⁻¹ de N): 5372,7 kg ha⁻¹; T2 – 50% adubação nitrogenada proveniente do lodo de esgoto (35 kg ha⁻¹ de N) e 50% na forma mineral (35 kg ha⁻¹ de N): 5241,9 kg ha⁻¹; T3 – 100% adubação nitrogenada proveniente do lodo de esgoto (70 kg ha⁻¹ de N): 5966,0 kg ha⁻¹; T4 – 150% adubação nitrogenada proveniente do lodo de esgoto (105 kg ha⁻¹ de N): 6171,2 kg ha⁻¹ (Lobo et al., 2012). Além disso, proporcionou a retenção de umidade em solo arenoso mesmo com o índice pluviométrico baixo para a região do experimento, localizada em São Manuel/SP, que é caracterizado por verões com clima quente e úmido e inverno de menor incidência de chuvas com temperaturas amenas.

Em uma outra pesquisa utilizando biossólido caleado em Latossolo Vermelho com textura média, observou-se o crescimento radicular da aveia até a camada de 20-40 cm, sendo superior aos tratamentos que utilizaram somente lodo de esgoto ou somente calagem. A produtividade final de grãos foi de 1.200 kg ha⁻¹ (biossólido caleado); 1.050 kg ha⁻¹ (lodo de esgoto) e 1.000 kg ha⁻¹ (calagem) (Corrêa et al., 2008).

2.2.4 Correção da acidez do solo utilizando Biossólido caleado

A cal virgem é um dos produtos alcalinos mais baratos e usados no saneamento, reconhecido desde o século passado para estabilizar lodo de esgoto. O uso desta substância tem influência no aumento do pH inibindo patógenos, além de auxiliar na remoção de fósforo em processos de tratamento avançados de efluentes¹ (Rambo, 2005). De acordo com o Programa de Pesquisa em Saneamento Básico - PROSAB (1999), o lodo deve manter um teor de umidade em torno de 60 a 70% para garantir uma eficiente reação com a cal.

Com a adição da cal virgem ao lodo a base seca na dose de 15%, Costa et al. (2015) constataram que o pH pode se elevar acima de 12, chegando a temperaturas acima de 70°C e proporcionar também aumento da condutividade elétrica (CE). Porém, com base nas conclusões de Anjos (2000), dependendo da quantidade e da periodicidade da aplicação do biossólido caleado no solo, juntamente com as condições climáticas do local, pode haver risco de salinização do solo e prejudicar a produtividade das culturas quando a condutividade ultrapassar 2,0 mS cm⁻¹ (Tamanini, 2004).

¹ Também chamado de tratamento terciário, onde microrganismos e nutrientes que não foram removidos nos outros processos são removidos nessa etapa, tais métodos como a desnitrificação por meio de condições anóxicas, remoção do fósforo por meio químico, e a desinfecção com o uso da cloração, ozonização ou radiação ultravioleta (Chiavelli et al., 2019).

Em outro estudo em campo que buscou avaliar os efeitos de diferentes corretivos de solo nos atributos químicos do solo, crescimento radicular da parte aérea e na produtividade da aveia preta utilizando compostos de calcário dolomítico - CD (2,3 t ha⁻¹), lodo de esgoto centrifugado - LC (2,6 t ha⁻¹), escória de aciaria - E (1,7 t ha⁻¹), lama cal - Lcal (3,5 t ha⁻¹) e uma testemunha - sem aplicação de corretivos, foi observado o aumento de pH do solo com os tratamentos até 10 cm de profundidade, e diminuição da quantidade de alumínio trocável com a aplicação dos tratamentos CD (pH 5,2), LC (pH 6,2), E (pH 5,6), Lcal (pH 5,8) e uma testemunha (pH 4,6) (Corrêa et al., 2008). Estudos de Santos (2014) trouxe como resultado que a adição de biofóssido compostado elevou o pH de 5,0 para 7,0 com a aplicação 16 Mg ha⁻¹ em solo de textura arenosa. Porém ressaltou o comprometimento do pH maior que 7,0 na disponibilidade de Cu e Zn.

Serrat et al. (2011) avaliaram a taxa de aplicação máxima anual de lodo de esgoto higienizado por processo de estabilização alcalina prolongada (EAP) em dois solos testando três tratamentos: (i) lodo de esgoto sob condições controladas de estabilização alcalina prolongada (LEAP), por meio da adição de cal virgem para elevar o pH da mistura a 12 e posterior período de reação de 30 dias; (ii) lodo de esgoto sob estabilização alcalina prolongada sob escala real da estação (LER) e (iii) calcário. Os lodos providos de tratamento anaeróbico receberam a adição de cal virgem na proporção de 50% de sólidos totais. Após a incubação dos solos por 60 dias, foi determinado o poder neutralizante (PN) dos tratamentos, constatando-se que a metodologia de determinação do PN utilizada para corretivo agrícola pode ser utilizada para a recomendação da taxa de aplicação máxima anual de lodo EAP ao solo. Com os cálculos do PN, foram então determinadas as doses de tratamento em que cada solo recebeu (calculadas pelo método de saturação de bases (V%)): para Latossolo Bruno Ácrico foi utilizado o tratamento de LER EAP com PN de 29,4 nas doses de 0; 10; 20; 40 t ha⁻¹ e calcário com PN de 101,8 nas doses de 0; 3,5; 11,7; 19,9 t ha⁻¹; e para Cambissolo Háplico Tb Distrófico foi utilizado lodo de esgoto tratado sob condições reais da estação nas doses de 0; 10; 20; 40 e também LE EAP nas doses de 0; 10; 20; 40. Avaliando o efeito dos dois lodos sobre o pH do Cambissolo, a taxa de aplicação máxima determinada foi de 40,6 t ha⁻¹ para LEAP e 23,9 t ha⁻¹ para LER. A diferença indica as condições em que o lodo foi preparado. No Latossolo, para que o LEAP chegasse ao pH 7,0, a taxa de aplicação máxima anual determinada foi de 74,15 t ha⁻¹, sendo 1,8 vezes maior que a obtida para o Cambissolo, evidenciando assim que o Latossolo apresenta maior poder tampão se tratando de LEAP. A taxa de aplicação máxima anual de lodo EAP sofreu interferência do método de adição da cal, sendo em média 1,6 vezes menor para o solo incubado com o lodo EAP higienizado em escala real. Para o aumento do

pH do solo, a relação entre o Lodo EAP e o calcário foi de 3:1 (dose de aproximadamente 40 t ha⁻¹ de lodo EAP).

3. HÍPOTESE

Biossólido calcado, com e sem o complemento de NPK, substitui o calcário para correção de acidez do solo e fornece nutrientes nos cultivos de milho e aveia preta em solos de textura franco-arenosa e argilosa.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo geral

Avaliar se o biossólido calcado com e sem adição de NPK corrige a acidez do solo franco-arenoso e argiloso e serve como fonte de nutrientes na produção de biomassa de milho e aveia preta em comparação ao tratamento mineral e controle.

4.2 Objetivos específicos

- 1) Avaliar se a aplicação do biossólido calcado com e sem adição de NPK promove modificações nas propriedades químicas do solo após o cultivo de milho e aveia preta em casa de vegetação;
- 2) Avaliar a produção de massa seca aérea e radicular após o cultivo de milho e aveia preta em casa de vegetação, submetidos aos tratamentos de biossólido calcado com e sem adição de NPK;
- 3) Avaliar se a textura do solo e o biossólido calcado com e sem adição de NPK influenciam na disponibilidade de metais pesados no solo e planta de milho e aveia preta em casa de vegetação.

5. METODOLOGIA

5.1 Localização do experimento, tratamentos, culturas e solos utilizados

O experimento foi realizado em casa de vegetação do Departamento de Microbiologia, Imunologia e Parasitologia, no Centro de Ciências Biológicas da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, Santa Catarina (latitude 27°35'54.04"S; longitude 48°30'56.24"O). O município de Florianópolis possui clima classificado Cfa (Koppen-Geiger), apresentando alta pluviosidade anual (1506 mm) e temperatura média de 20,8 °C (CLIMATE-DATA, 2018).

Foram realizados dois experimentos, sendo um com a cultura do milho híbrido precoce K9660 PRO2, safra 2022, no período de 11 de fevereiro à 14 de julho de 2024, totalizando 95

dias. Foram utilizados vasos com capacidade de 8 kg e nestes adicionados o solo franco-arenoso e argiloso, ambos de baixa fertilidade química natural, em delineamento inteiramente casualizado, sendo um fatorial 5 x 2, com quatro repetições, totalizando 40 vasos. Para a cultura da aveia preta foram utilizados vasos com 3,5 kg, sendo o experimento feito em julho de 2024, totalizando 67 dias de condução. Foram utilizados os mesmos solos, tratamentos e delineamento do experimento com a cultura do milho. Os tratamentos avaliados foram: T1) Biossólido caleado (100% da dose recomendada), T2) Biossólido caleado (100% da dose recomendada + complementação com adubação química - NPK), T3) mistura de NPK e Biossólido caleado (50% de cada), T4) calagem e adubação mineral (NPK, sendo 100% da dose recomendada) e T5) testemunha (Test) sem adubação e sem calagem. Para a definição das doses, a recomendação foi feita a partir do poder de neutralização para os tratamentos T1, T2 e T3, já para os tratamentos que envolvem NPK (T3 e T4) a recomendação foi feita a partir do manual de adubação e calagem (CQFS-RS/SC (2016)).

Para cada solo foi feita a caracterização química e física (Tabela 7), sendo realizadas análises de teores de argila, areia e silte; pH em água, índice SMP, teores trocáveis de Al, Ca e Mg, teores disponíveis de P, K e Na, e carbono orgânico total (COT), segundo métodos descritos em Embrapa (1997) e Tedesco et al. (1995). A partir dos resultados obtidos foram calculados os teores de H+Al, saturação por bases (V), saturação por Al (m), porcentagem de saturação por sódio (PST) e capacidade de troca de cátions potencial (CTC_{pH7,0}), conforme equações descritas pela CQFS-RS/SC (2016).

Tabela 7. Caracterização física e química dos solos utilizados no experimento.

Solo	Variáveis analisadas							
	Areia	Silte	Argila	pH _{água}	Al	H+Al	Ca	Mg
	-----g kg ⁻¹ -----			---	-----cmol _c dm ⁻³ -----			
Argiloso	207	255	538	3,90	2,20	10,90	1,0	0,9
Franco-arenoso	672	205	123	4,87	0,70	5,10	1,0	1,0
	K	Na	CTC _{pH7,0}	COT	m	V	PST _{Na}	P
	-----cmol _c dm ⁻³ -----			g kg ⁻¹	-----%-----			mg kg ⁻¹
Argiloso	0,15	0,05	13,00	9,64	51,16	16,15	0,64	8,3
Franco-arenoso	0,12	0,05	7,27	9,28	24,39	29,84	0,69	1,9

m=saturação por alumínio; V: saturação por bases; PST_{Na}: porcentagem de saturação por sódio

5.2. Lodo de esgoto: origem, tratamento e análises realizadas

O lodo de esgoto que recebeu o tratamento químico com cal virgem foi oriundo da estação de tratamento de esgoto (ETE) da Companhia de Águas de Joinville (CAJ), em

Joinville, SC. Na ETE o processo de tratamento é feito por Lodos Ativados por Batelada, em que o tratamento do efluente consiste em etapas, sendo primeira a remoção de sólidos grosseiros por peneiras, separação de areia por força gravitacional e separação de gordura por raspadores superficiais (pré-tratamento). A partir daí, o efluente é destinado em para 4 reatores biológicos para a remoção da matéria orgânica. Ao final, ocorre a decantação dos sólidos (lodo de esgoto) separando assim em 2 produtos: lodo e efluente. O efluente tratado segue para a etapa final de desinfecção por radiação ultravioleta. Parte do sólido permanece no sistema para eficiência na redução de matéria orgânica pelos microrganismos. O restante do lodo passa por adensamento e de desague com a finalidade de remoção de água, ao final obtém-se um material pastoso, o qual é destinado ao aterro sanitário.

O método de higienização do lodo foi feito pelo processo de estabilização alcalina prolongada (EAP), metodologia utilizada pela Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR), que visa a elevação do pH para 12 após a mistura da cal virgem com o lodo e com posterior período de reação de 30 dias, conforme Jamal et al. (2011) e Andreoli et al (2014). Inicialmente foram coletados 250 kg de lodo pastoso diretamente dos tanques de armazenamento da CAJ para posterior pesagem e caleação (Figura 1).



Figura 1. Coleta do lodo nos tanques de armazenamento na CAJ para posterior realização do processo de caleação.

Em seguida, foram adicionados 15 kg cal virgem em 250 kg de lodo pastoso em um tanque plástico (caixa d'água de 250 L) (Figura 2). Nesta etapa, sempre foi adicionado uma parte de lodo e uma parte de cal, misturando todo material para deixar homogeneizado,

conforme verifica-se na Figura 2. A caracterização da cal virgem encontra-se na Tabela 8 e do lodo pastoso da ETE antes da caleação na Tabela 9.



Figura 2. Etapa de caleação do lodo em caixa de 250 L na CAJ.

Tabela 8. Caracterização da cal virgem para determinação do poder neutralizante (PN), reatividade das partículas (RE) e o Poder Relativo de Neutralização Total (PRNT).

Amostra cal virgem	Variáveis analisadas (%)							Umidade 105°C
	CaO	MgO	CaO + MgO	CaCO ₃	MgCO ₃	PN	PRNT	
	35,78	23,12	58,90	63,90	48,74	148,54	112,40	0,66
Variáveis analisadas (%) = parte física								
Abertura da peneira	Retida na peneira			Passante na peneira				
ABNT-10 2,00 mm	2,82			97,18				
ABNT-20 0,84 mm	11,91			85,27				
ABNT-50 0,30 mm	29,96			55,31				
Fundo < 0,30mm	55,31			0,00				

Tabela 9. Caracterização física e química do lodo de esgoto pastoso antes da caleação.

Variáveis analisadas (mg kg ⁻¹)									
As	Ba	Cd	Pb	Cu	Cr	Hg	Mo	Ni	Se
14,62	94,53	1,15	12,47	102,70	24,61	1,43	<0,01	23,68	<5,00
Zn	pH	Umidade	Coliformes termotolerantes		Ovos de helmintos		Salmonella ssp		
mg kg ⁻¹	H ₂ O	%	UFC/100mL		ovos L ⁻¹		25g		
540,91	5,13	85,02	3,4x10 ³		1,60		Presente		
Variáveis analisadas (mg kg ⁻¹)									
Na	Ca	Mg	K	P	N	COT			
3.247	3.515	3.405,00	2.970	1.135	8.140	1.260			

COT=carbono orgânico total

Após 30 dias da caleação, todo o lodo foi transportado para a UFSC. Ainda na forma pastosa, o lodo contou com a secagem ao ar (Figura 3) e exposição à radiação solar por 6h e 30 min com temperatura ambiente variando de 21 a 25,3°C e radiação solar de 32,80 a 3330,60 kJ/m² (INMET, 2023). Com base aos tratamentos aplicados, a classificação pela CONAMA 498/2020 determinou o biossólido em Classe A para uso agrícola, onde atendeu ao valor da concentração de *Escherichia coli* em 2,6x10².

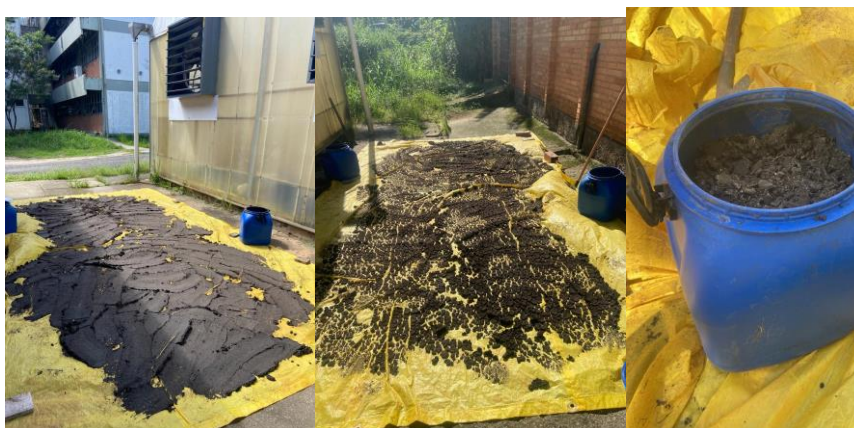


Figura 3. Secagem do biossólido sobre lona plástica para posterior caracterização química e física.

Para posterior moagem e peneiramento, o biossólido caleado passou pelo tratamento térmico a 65°C, em estufa de circulação de ar forçado, durante 4 dias para secagem do material. As etapas de tratamento foram realizadas no período de novembro a dezembro de 2023. Ao todo, a higienização do lodo de esgoto recebeu tratamento químico, térmico e de solarização para eliminação parcial ou total dos patógenos bem como para secagem do material, sendo

assim, a partir do tratamento do lodo de esgoto, esse produto passa a ser chamado de Biossólido Caleado.

A partir do tratamento químico, foi feita a caracterização física e química do biossólido caleado (Tabela 10), sendo feitas análises de: umidade (%), pH, Al, Ca, Mg, H+Al, P, N e carbono orgânico total (COT), relação C:N, enxofre (S), Cu, Zn, As, Ba, Cd, Pb, Cr, Hg, Mo, Ni, Se, segundo métodos descritos em Embrapa (1997) e Tedesco et al. (1995). Também foi levado em consideração a resolução CONAMA (2020) para caracterização do potencial agrônômico do biossólido caleado. Os dados da caracterização física e química do biossólido caleado estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10. Caracterização física e química do biossólido caleado.

		Variáveis analisadas							
		As	Ba	Cd	Pb	Cu	Cr	Hg	Mo
		-----mg kg ⁻¹ -----							
		5,80	267,89	2,38	36,39	95,04	12,24	405,73	<0,01
Biossólido caleado	Ni	Se	Zn	Coliformes termotolerantes		Ovos de helmintos		Salmonella ssp	
	mg kg ⁻¹		mg L ⁻¹	UFC/100mL		ovos L ⁻¹		25g	
	38,20	0,26	511,88	1,1x10 ⁴		<1,00		ausente	
	Umidade	pH	Al	Ca	Mg	H+Al	K	P	N
	g g ⁻¹	H ₂ O	-----cmol _c kg ⁻¹ -----				mg kg ⁻¹	mg dm ⁻³	
	0,82	9,5	0,0	6,1	48,1	0,2	2,00	78,7	197,84
	Na	PST _{NA}	CTC	m	V	COT	Areia	Silte	Argila
	cmol _c kg ⁻¹	-----%-----		-----g kg ⁻¹ -----					
	2,61	4,42	59,0	0,0	99,66	64,97	699	290	11

COT=carbono orgânico total, CTC=capacidade de troca catiônica, PST_{NA}=porcentagem de saturação de sódio trocável.

O biossólido caleado foi utilizado, principalmente, como corretivo de acidez do solo, em que após finalizado o processo de caleação o seu pH final foi de 9,5 (básico, Tabela 10) e os solos de textura franco-arenosa e argilosa testados estavam com pH ácido (Tabela 7). Para saber as quantidades a serem aplicadas do biossólido, calcularam-se o poder neutralizante (PN) e a reatividade das partículas (RE), para se determinar o Poder Relativo de Neutralização Total (PRNT), conforme evidenciado na Tabela 11.

Tabela 11. Caracterização do biossólido calcado para determinação do poder neutralizante (PN), reatividade das partículas (RE) e o Poder Relativo de Neutralização Total (PRNT).

Variáveis analisadas (%) = parte química								
Biossólido calcado	CaO	MgO	CaO + MgO	CaCO ₃	MgCO ₃	PN	PRNT	Umidade 105°C
	12,93	9,52	22,45	23,09	20,06	66,78	38,63	8,38
Variáveis analisadas (%) = parte física								
Malha da peneira	% Retida na peneira			% Passante na peneira				
ABNT-10 2,00 mm	0,51			99,49				
ABNT-20 0,84 mm	35,98			63,51				
ABNT-50 0,30 mm	32,16			31,35				
Fundo < 0,30 mm	31,65			0				

As doses de biossólido calcado (Tabela 12 e 13) foram estabelecidas pelo poder de neutralização (PN) visando a caracterização do potencial corretivo do lodo alcalinizado (Tedesco et al., 1995). Para os demais tratamentos foi levado em consideração o teor do elemento mais limitante (N, P ou K) nos solos de textura franco-arenosa e argilosa (Tabela 1), conforme as recomendações nutricionais para o milho (Tabela 12) e para aveia preta (Tabela 13) (CQFS-RS/SC, 2016).

Tabela 12. Quantidades aplicadas de lodo calcado, NPK e calcário para o desenvolvimento do experimento do milho.

Solo	Tratamentos				
	T1	T2	T3	T4	T5
N (Ureia), P (SFT) e K (KCl), em g					
Argiloso	0	2,65; 2,65; 0,92	1,40; 3,11; 0,72	2,80; 6,22; 1,44	0
Franco-arenoso	0	2,65; 1,70; 0,44	1,40; 2,02; 0,43	2,80; 4,04; 0,87	0
Biossólido calcado (g)					
Argiloso	336,24	336,24	168,12	0	0
Franco-arenoso	112	112	56	0	0
CaCO₃(g)					
Argiloso	0	0	0	119,25	0
Franco-arenoso	0	0	0	42,50	0

T1: Dose de 100% biossólido calcado, T2: Dose de 100% biossólido calcado + NPK, T3: Dose de 50% biossólido calcado + 50% NPK, T4: Dose de 100% NPK + Calagem, T5: Testemunha. STF: Super fosfato triplo; KCl: cloreto de potássio.

Tabela 13. Quantidades aplicadas de biossólido calcado, NPK e calcário para o desenvolvimento do experimento da aveia preta.

Solo	Tratamentos				
	T1	T2	T3	T4	T5
	N (Ureia), P (SFT) e K (KCl), em g				
Argiloso	0	0,66; 0,45; 0,34	0,40; 0,58; 0,21	0,80; 1,24; 0,37	0
Franco-arenoso	0	0,73; 0,51; 0,17	0,40; 0,62; 0,19	0,80; 1,16; 0,41	0
	Biossólido calcado (g)				
Argiloso	119,41	119,41	59,70	0	0
Franco-arenoso	64,42	64,42	32,21	0	0
	CaCO₃(g)				
Argiloso	0	0	0	46,18	0
Franco-arenoso	0	0	0	25,00	0

T1: Dose de 100% biossólido calcado, T2: Dose de 100% biossólido calcado + NPK, T3: Dose de 50% biossólido calcado + 50% NPK, T4: Dose de 100% NPK + Calagem, T5: Testemunha. STF: Super fosfato triplo; KCl: cloreto de potássio.

5.3. Montagem do experimento: incubação do solo e semeadura do milho

Na primeira semana de fevereiro de 2024 foi realizada a incubação dos solos argiloso e franco-arenoso com os tratamentos constantes na Tabela 12. Para cada tratamento com solo argiloso e franco-arenoso, todo o material (solo + biossólido) foi homogeneizado em betoneira. Posteriormente, esse material foi colocado em sacos plásticos que foram hermeticamente fechados e com a umidade próximo da capacidade de campo para que as reações de alcalinização ocorressem.

Para o tratamento mineral, foi utilizado NPK, sendo ureia para fornecimento de N, superfosfato triplo para P e cloreto de potássio para K (Tabela 12). O pH do solo foi corrigido com calcário (CaCO₃) para elevar o valor a 6,0, conforme preconiza o manual de calagem e adubação (CQFSRS/SC, 2016) para a cultura do milho. O tratamento testemunha utilizou os solos em condição natural (franco-arenoso e argiloso), conforme consta na Tabela 12. Os demais tratamentos foram 50% de NPK, e 50% de biossólido calcado.

Após duas semanas de incubação foi realizada a determinação do pH dos solos em cada tratamento, sendo os valores obtidos apresentados na Tabela 14.

Tabela 14. Valores de pH no solo após a incubação com o biofóssido calcado e o calcário.

Solo	Tratamentos				
	T1	T2	T3	T4	T5
Solo argiloso	6,7	6,9	5,4	6,4	3,9
Solo franco-arenoso	7,1	7,3	6,0	7,8	4,8

T1: Dose de 100% biofóssido calcado, T2: Dose de 100% biofóssido calcado + NPK, T3: Dose de 50% biofóssido calcado + 50% NPK, T4: Dose de 100% NPK + Calagem, T5: Testemunha.

Após a incubação foram adicionados aos solos (tratamentos T2, T3 e T4) as quantidades de NPK, conforme Tabela 12, e novamente homogeneizados em betoneira. Em seguida, os solos argiloso e franco-arenoso foram adicionados aos vasos, sendo 8 L por vaso. Em seguida foi adicionada água para atingir 70% da capacidade de campo de cada solo. A quantidade de água foi calculada conforme a textura de cada solo, para se atingir a capacidade de campo. Utilizou-se o método do funil (Embrapa, 2009) para calcular a capacidade de campo. Posteriormente, foi feita a semeadura de três sementes de milho por vaso e após a emergência foi feito o raleio, mantendo-se apenas uma planta de milho por vaso. As plantas foram irrigadas diariamente para que a umidade do solo ficasse entre 60 a 70% da capacidade de campo. Para isso, cada vaso foi pesado diariamente levando-se em consideração o peso inicial no qual foi adicionada água em cada vaso para elevar a capacidade de campo a 70%. As temperaturas mínimas e máximas internas da casa de vegetação foram monitoradas diariamente (Figura 4).

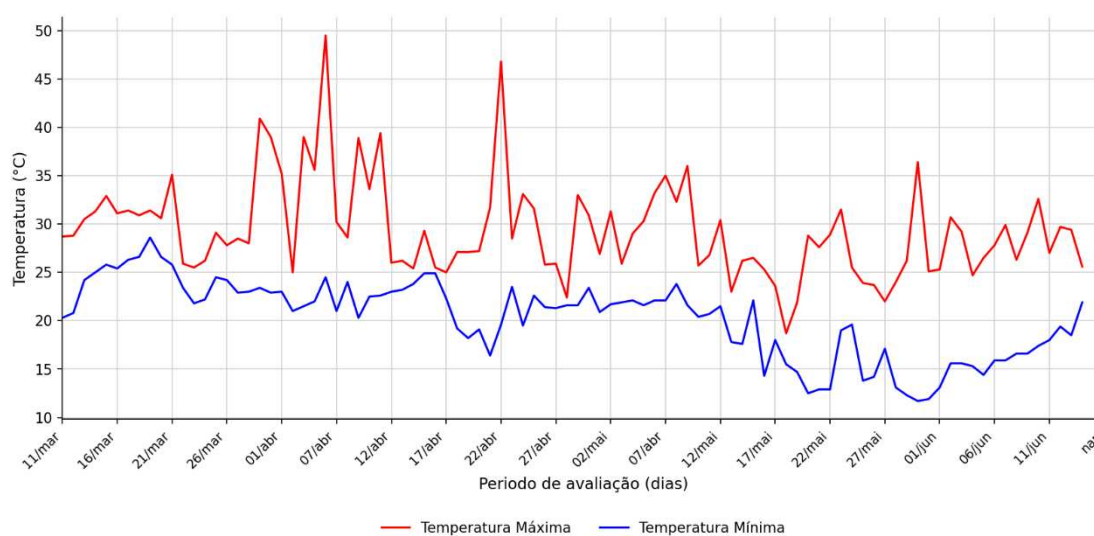


Figura 4. Temperatura da casa de vegetação durante dos 95 dias de experimento com o milho.

5.3.1. Análises químicas realizadas no solo e no tecido vegetal do milho

O milho foi cultivado até o início do florescimento, sendo as plantas cortadas aos 95 dias após a semeadura. Inicialmente foram avaliados a altura e diâmetro do colmo, e contado o número de folhas.

O corte das plantas foi feito rente ao solo em cada vaso e toda a parte aérea do milho (folhas e colmos) foi colocada em sacos de papel e levado para secagem em estufa de circulação de ar forçada à 60°C para obtenção da massa seca (MS) da parte aérea, e após secagem, o material foi pesado com auxílio de balança de precisão. Posteriormente, o material vegetal da parte aérea foi triturado em moinho tipo wiley e acondicionados em sacos plásticos. No tecido vegetal do milho da parte aérea foram avaliados os teores dos seguintes elementos: carbono (C), N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn, Zn, Na, Co, V, Mo, Se, Al, Ni, Cd, Pb e Cr, segundo IAC (2001) e Embrapa (2009).

As raízes, de cada vaso, também foram separadas do solo, sendo cada vaso colocado em uma bandeja e manualmente as raízes foram separadas. Em seguida, as raízes foram lavadas em água potável para retirar o material mineral que ainda estava retido nas mesmas. Posteriormente, foram secas em estufa de circulação de ar forçada à 60°C para obtenção da massa seca (MS) das raízes e após a secagem da parte aérea e radicular, o material foi pesado com auxílio de balança de precisão.

Após a retirada das raízes de cada solo, todo material restante foi seco ao ar, destorroado e passado em peneira de malha 2,00 mm para obtenção da terra fina seca ao ar. Neste material foram realizadas as seguintes análises: pH em água, índice SMP, H+Al, Al, Ca, Mg, Na, K e P, segundo a metodologia de Tedesco et al. (1995). Em seguida foram calculados os valores da capacidade de troca catiônica (CTCpH 7,0), saturação por Al (m%) e saturação por bases (V%), segundo CQFSRS/SC (2016). As leituras de P, Ca, Mg e Na foram feitas em um espectrômetro de massa com fonte de plasma indutivamente acoplado (ICP-MS). Os teores de C, N e S totais foram quantificados por meio do analisador elementar CHNS-O e a obtenção dos teores totais de Cu e Zn foi feita por digestão nítrico-perclórica (Tedesco et al., 1995) e, posteriormente, quantificado em ICP-MS.

Ao final do experimento, também foi realizado a avaliação do índice Spad de clorofila utilizando-se medidor portátil de clorofila denominado clorofilômetro minolta SPAD-502 (Soil and Plant Analysis Development), que realiza medida instantânea e não destrutiva da folha, dando um valor de absorvância do comprimento de onda na região do vermelho (pico em 650 nm), região de alta absorvância pelas moléculas de clorofila (Godoy, 2002). Esta

avaliação foi realizada na terceira folha totalmente aberta, próximo ao pendão floral. Foram realizadas três medições por planta, nas folhas saudias, totalizando 12 avaliações por tratamento.

5.4. Montagem do experimento: incubação do solo e semeadura da aveia preta

Na primeira semana de julho de 2024 foi realizada a incubação dos solos argiloso e franco-arenoso com os tratamentos constantes na Tabela 13. Para cada tratamento com solo argiloso e franco-arenoso, todo o material (solo + biossólido calcado adicionado em cada tratamento constante na Tabela 13) foi homogeneizado em betoneira. Posteriormente, esse material foi colocado em sacos plásticos que foram hermeticamente fechados e com a umidade próximo da capacidade de campo para que as reações de alcalinização ocorressem.

Para o tratamento mineral, foi utilizado NPK, sendo ureia para fornecimento de N, superfosfato triplo para P e cloreto de potássio para K (Tabela 13). O pH do solo foi corrigido com calcário (CaCO_3) para elevar o valor a 6,0; conforme preconiza o manual de adubação e calagem (CQFSRS/SC, 2016) para a cultura da aveia preta. O tratamento testemunha utilizou os solos em condição natural (franco-arenoso e argiloso), conforme consta na Tabela 13. Os demais tratamentos foram 50% de NPK, e 50% de lodo calcado.

Após duas semanas de incubação foi realizada a leitura do pH dos tratamentos, sendo os valores apresentados na Tabela 15.

Tabela 15. Valores de pH no solo após a incubação com o biossólido calcado e o calcário.

Solo	Tratamentos				
	T1	T2	T3	T4	T5
Solo argiloso	6,4	6,5	5,4	6,9	4,0
Solo franco-arenoso	6,9	6,8	5,9	7,6	5,0

T1: Dose de 100% biossólido calcado, T2: Dose de 100% biossólido calcado + NPK, T3: Dose de 50% biossólido calcado + 50% NPK, T4: Dose de 100% NPK + Calagem, T5: Testemunha.

Após a incubação foram adicionados aos solos (tratamentos T2, T3 e T4) as quantidades de NPK, conforme Tabela 13, e novamente homogeneizados em betoneira. Em seguida, os solos argiloso e franco-arenoso foram adicionados aos vasos, sendo 3,5 L por vaso. Em seguida foi adicionada água para atingir 70% da capacidade de campo de cada solo. A quantidade de água foi calculada conforme a textura de cada solo, para se atingir a capacidade de campo. Utilizou-se o método do funil (Embrapa, 2009) para calcular a capacidade de campo. Posteriormente, foi feita a semeadura de dez sementes de aveia preta por vaso e após a emergência foi feito o raleio, mantendo-se apenas seis plantas de aveia preta por vaso. As plantas foram irrigadas diariamente para que a umidade do solo ficasse entre 60 a 70% da

capacidade de campo. Para isso, cada vaso foi pesado diariamente levando-se em consideração o peso inicial no qual foi adicionada água em cada vaso para elevar a capacidade de campo a 70%. As temperaturas máximas e mínimas da casa de vegetação foram monitoradas diariamente (Figura 5).

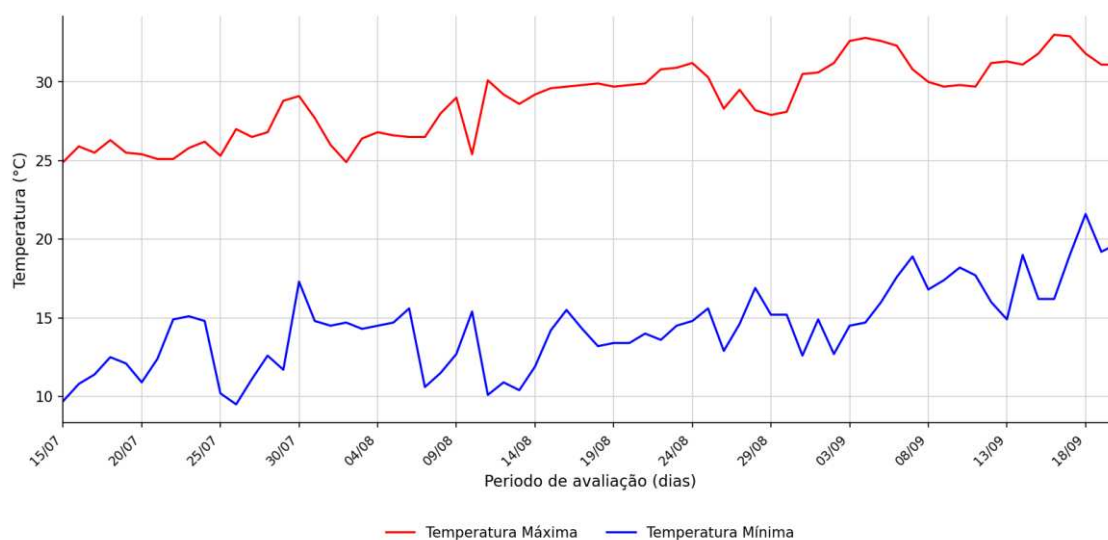


Figura 5. Temperatura da casa de vegetação durante dos 67 dias de experimento com a aveia preta.

5.4.1. Análises químicas realizadas no solo e no tecido vegetal da aveia preta

A aveia preta foi cultivada até o início do florescimento, sendo as plantas cortadas aos 67 dias após a semeadura. Foram avaliados a altura e número de perfilhos e realizada o corte das plantas.

O corte das plantas foi feito rente ao solo em cada vaso e toda a parte aérea da aveia preta foi colocada em sacos de papel e levado para secagem em estufa de circulação de ar forçada à 60°C para obtenção da massa seca (MS) da parte aérea e após secagem, o material foi pesado com auxílio de balança de precisão. Posteriormente, o material vegetal foi triturado em moinho tipo wiley e acondicionados em sacos plásticos. No tecido vegetal da aveia preta da parte aérea foram avaliados os teores dos seguintes elementos: carbono (C), N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn, Zn, Na, Co, V, Mo, Se, Al, Ni, Cd, Pb e Cr, segundo IAC (2001) e Embrapa (2009).

As raízes, de cada vaso, também foram separadas do solo, sendo cada vaso colocado em uma bandeja e manualmente as raízes foram separadas. Em seguida, as raízes foram lavadas em água corrente para retirar o material mineral que ainda estava retido nas mesmas.

Posteriormente, foram secas em estufa de circulação de ar forçada à 60°C para obtenção da massa seca (MS) das raízes e após a secagem o material foi pesado com auxílio de balança de precisão.

Após a retirada das raízes de cada solo, todo material restante foi seco ao ar, destorroado e passado em peneira de malha 2,00 mm para obtenção da terra fina seca ao ar. Neste material foram realizadas as seguintes análises: pH em água, índice SMP, determinação de H+Al, Al, Ca, Mg, Na, K e P, segundo a metodologia de Tedesco et al. (1995). Em seguida foram calculados os valores da capacidade de troca catiônica (CTCpH 7,0), saturação por Al (m%) e saturação por bases (V%), segundo CQFSRS/SC (2016). As leituras de P, Ca, Mg e Na foram feitas em um espectrômetro de massa com fonte de plasma indutivamente acoplado (ICP-MS). Os teores de C, N e S totais foram quantificados por meio do analisador elementar CHNS-O e a obtenção dos teores totais de Cu e Zn foi feita por digestão nítrico-perclórica (Tedesco et al., 1995) e, posteriormente, quantificado em ICP-MS.

Também foi realizado a avaliação do índice Spad de clorofila utilizando-se medidor portátil de clorofila denominado clorofilômetro minolta SPAD-502 (Soil and Plant Analysis Development), que realiza medida instantânea e não destrutiva da folha, dando um valor de absorvância do comprimento de onda na região do vermelho (pico em 650 nm), região de alta absorvância pelas moléculas de clorofila (Godoy, 2002). Esta avaliação foi realizada na terceira folha totalmente aberta, próximo ao pendão floral. Foram realizadas três medições por planta, nas folhas sadias, totalizando 12 avaliações por tratamento.

5.5. Análise estatística dos dados

Os dados foram analisados quanto à normalidade e homogeneidade por meio dos testes de Lilliefors e Bartlett, respectivamente. Na sequência, foram submetidos à análise de variância (ANOVA) com aplicação do teste F e, os valores médios, quando observadas diferenças significativas, comparados entre si pelo teste Scott-Knott a 5%, utilizando-se o software Sisvar 5.6. Foi utilizado um fatorial 5 x 2, sendo 5 tratamentos e dois solos. Quando houve interação significativa entre tratamento e solo, esta foi desdobrada.

6. RESULTADOS

6.1. Experimento com a cultura do milho

6.1.1. Diâmetro do colmo, altura, número de folhas, massa seca e índice Spad das plantas de milho

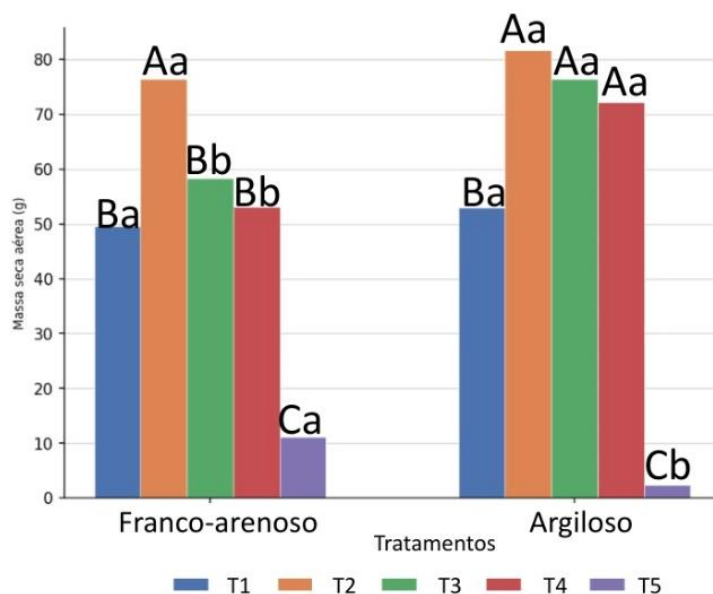
O tratamento testemunha (T5) apresentou os menores valores para diâmetro do colmo, altura, número de folhas (Tabela 16) e massa seca aérea e radicular (Figuras 6 e 7) nos dois solos avaliados em comparação a todos os demais tratamentos. Na comparação entre os solos, foram verificados os maiores valores para esses parâmetros no franco-arenoso.

Tabela 16. Valores dos parâmetros morfológicos e índice Spad das plantas de milho ao fim dos 95 dias após a semeadura.

Parâmetro	Solo	Tratamentos					CV%
		T1	T2	T3	T4	T5	
Diâmetro do colmo (mm)	Franco-arenoso	15,14 Aa	16,28 Aa	15,02 Aa	14,87 Aa	9,12 Ba	7,33
	Argiloso	12,76 Bb	15,79 Aa	14,63 Aa	14,30 Aa	6,58 Cb	
Altura (cm)	Franco-arenoso	78,63 Ba	11,85 Aa	104,5 Aa	99,75 Aa	57,00 Ca	15,16
	Argiloso	98,75 Aa	10,78 Aa	105,2 Aa	109,7 Aa	28,75 Bb	
Número total de folhas	Franco-arenoso	19,25 Aa	20,50 Aa	19,50 Aa	18,50 Aa	14,50 Ba	5,90
	Argiloso	16,75 Bb	17,75 Bb	19,25 Aa	18,25 Aa	12,25 Cb	
Índice Spad	Franco-arenoso	18,79 Bb	26,21 Aa	20,11 Bb	14,85 Cb	21,48 Bb	7,81
	Argiloso	24,85 Aa	27,61 Aa	27,62 Aa	26,76 Aa	27,34 Aa	

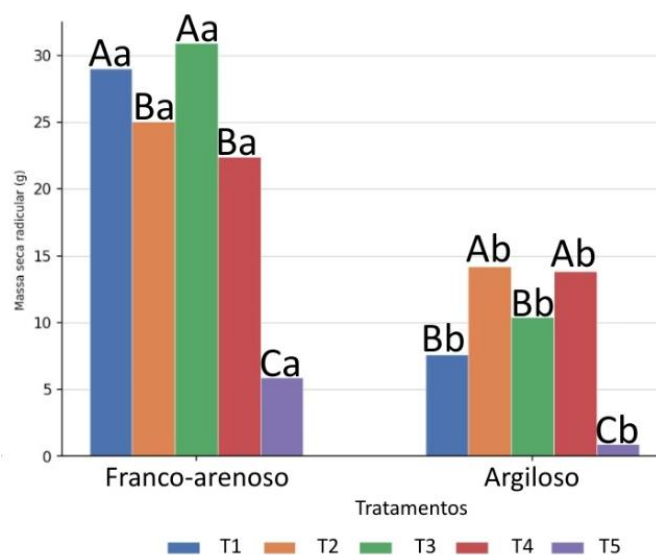
T1: Dose de 100% biossólido calcado, T2: Dose de 100% biossólido calcado + NPK, T3: Dose de 50% biossólido calcado + 50% NPK, T4: Dose de 100% NPK + Calagem, T5: Testemunha. Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade. CV= coeficiente de variação.

Figura 6. Valores médios de massa seca aérea das plantas de milho ao fim dos 95 dias após a semeadura.



T1: Dose de 100% bioossólido calcado, T2: Dose de 100% bioossólido calcado + NPK, T3: Dose de 50% bioossólido calcado + 50% NPK, T4: Dose de 100% NPK + Calagem, T5: Testemunha. Médias seguidas de mesma letra minúscula (solos) e maiúscula (tratamentos) na coluna, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Figura 7. Valores médios de massa seca radicular das plantas de milho ao fim dos 95 dias após a semeadura.



T1: Dose de 100% bioossólido calcado, T2: Dose de 100% bioossólido calcado + NPK, T3: Dose de 50% bioossólido calcado + 50% NPK, T4: Dose de 100% NPK + Calagem, T5: Testemunha. Médias seguidas de mesma letra minúscula (solos) e maiúscula (tratamentos) na coluna, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Para o solo franco-arenoso, os tratamentos T1-T4 apresentaram os maiores valores para o diâmetro do colmo, número total de folhas e altura da planta, à exceção de T1 para esta última variável (Tabela 16). Em relação à massa seca aérea (Figura 6), T2 apresentou os maiores valores, seguido de T1, T3 e T4, enquanto para a massa seca radicular T1 e T3 foram superiores, seguidos de T2 e T4 (Figura 7).

Para o solo argiloso, os tratamentos T2-T4 apresentaram os maiores valores para todas as variáveis estudadas, à exceção do número total de folhas para T2 e massa seca radicular para T3, que foram menores. Já o T1 apresentou os menores valores de massa seca aérea e radicular, diâmetro e folhas totais em relação ao T4, não diferindo apenas para a altura da planta (Figura 6, 7 e Tabela 16).

Comparando-se os tratamentos dentro de cada solo, verifica-se para o solo franco-arenoso que, de maneira geral, não houve diferenças entre os tratamentos com aporte de nutrientes para diâmetro do colmo, número total de folhas e altura da folha. Já para o solo argiloso, em geral, T2-T4 foram superiores para todas as variáveis analisadas (Tabela 16).

Para o índice Spad, no solo franco-arenoso, o T2 apresentou os maiores valores e o T4, os menores. Os demais tratamentos não diferiram entre si. Para o solo argiloso não foram evidenciadas diferenças entre os tratamentos. Comparando-se os solos, em todos os tratamentos foram verificados maiores valores no argiloso, exceto para o T2, que não apresentou diferenças (Tabela 16).

6.1.2 Análises químicas na parte aérea das plantas de milho

Em relação aos macronutrientes, de maneira geral, o tratamento T5 apresentou maiores teores para nitrogênio (N), potássio (K) e enxofre (S), porém sem diferir do T2 para o S para ambos os solos. Para o N, os tratamentos T1-T4 não diferenciaram entre si para ambos os solos. Mas foram evidenciadas diferenças entre os solos, com maiores teores de N no solo argiloso. Em relação ao fósforo (P), todos os tratamentos que receberam aplicação de bio-sólido caçado (T1-T3) apresentaram maiores teores do que o T4 e T5 em ambos os solos, com exceção do solo argiloso, onde o T5 não diferiu de T1-T3. Entre os solos, apenas T2 e T5 difeririam, sendo verificados maiores teores no T2 para o solo franco-arenoso e no T5 para o solo argiloso. Já para o K não foram verificadas diferenças entre T1-T4 para o solo franco-arenoso. Porém, no solo argiloso, o T1 apresentou teores de K superiores aos tratamentos T2-T4. Entre os solos, apenas o T4 apresentou diferenças, com maiores teores no solo franco-arenoso (Tabela 17).

Tabela 17. Teores de macronutrientes (g kg^{-1}) do tecido vegetal do milho ao fim dos 95 dias após a semeadura.

Parâmetro	Solo	Tratamentos					CV%
		T1	T2	T3	T4	T5	
N (g kg^{-1})	Franco-arenoso	6,84 Bb	8,43 Ba	6,22 Bb	5,09 Bb	14,18 Ab	15,36
	Argiloso	9,35 Ba	10,83 Ba	10,30 Ba	9,38 Ba	26,36 Aa	
P (g kg^{-1})	Franco-arenoso	0,64 Aa	0,78 Aa	0,61 Aa	0,54 Ba	0,43 Bb	18,20
	Argiloso	0,71 Aa	0,61 Ab	0,67 Aa	0,40 Ba	0,72 Aa	
K (g kg^{-1})	Franco-arenoso	5,74 Ba	4,28 Ba	4,94 Ba	5,12 Ba	12,41 Aa	18,36
	Argiloso	5,72 Ba	3,72 Ca	3,52 Ca	3,43 Cb	10,82 Aa	
Ca (g kg^{-1})	Franco-arenoso	6,18 Ba	5,87 Ba	5,60 Ba	7,68 Aa	4,97 Ba	15,57
	Argiloso	5,90 Ba	5,10 Ba	4,52 Ba	7,78 Aa	2,72 Cb	
Mg (g kg^{-1})	Franco-arenoso	10,34 Aa	11,51 Aa	8,02 Ba	2,6 Ca	2,18 Ca	17,87
	Argiloso	9,74 Aa	10,73 Aa	8,08 Ba	2,51 Ca	1,36 Ca	
S (g kg^{-1})	Franco-arenoso	0,76 Bb	0,93 Ab	0,7 Bb	0,48 Cb	0,99 Ab	16,70
	Argiloso	1,08 Ca	1,32 Aa	0,86 Ca	0,84 Ca	1,43 Aa	

T1: Dose de 100% biofósforo calcado, T2: Dose de 100% biofósforo calcado + NPK, T3: Dose de 50% biofósforo calcado + 50% NPK, T4: Dose de 100% NPK + Calagem, T5: Testemunha. Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste Skott-Knott a 5% de probabilidade.

Para o cálcio (Ca), o T4 foi o que apresentou maiores teores na planta, tanto no solo franco-arenoso quanto no argiloso em relação aos demais tratamentos. Os tratamentos que receberam biofósforo calcado (T1-T3) não diferiram entre si, independente do solo, mas foram superiores ao T5 para o solo argiloso. Entre os solos, apenas a testemunha apresentou diferenças, com maiores teores de Ca para o solo franco-arenoso. Para o magnésio (Mg), os tratamentos que receberam biofósforo calcado (T1-T3) apresentaram maiores teores que os tratamentos T4 e T5, que não diferiram entre si para ambos os solos. Entre os solos não foram verificadas diferenças para o Mg em nenhum dos tratamentos. Para o S, os tratamentos T2 e T5 apresentaram maiores teores em relação aos outros tratamentos nos dois tipos de solo, e não diferiram entre si para ambos. Porém, no solo argiloso observou-se maiores valores. Entre os solos, os tratamentos que receberam biofósforo calcado foram superiores a T4 no solo franco-arenoso, enquanto para o solo argiloso T2 foi superior aos demais tratamentos que receberam adubação. Comparando os solos, o argiloso apresentou maiores valores em relação ao franco-arenoso para todos os tratamentos (Tabela 17).

Os teores de micronutrientes e metais pesados do tecido vegetal do milho estão apresentados na Tabela 18. De maneira geral, o tratamento testemunha (T5) apresentou maiores teores de boro (B), cobre (Cu) e chumbo (Pb) em ambos os solos (Tabela 18). No solo franco-

arenoso, os tratamentos que receberam biossólido caleado (T1-T3) apresentaram maiores teores de B do que o T4. Já para o solo argiloso não foram encontradas diferenças entre T1-T4. Entre os solos, T2 e T3 apresentaram maiores teores de B para o solo franco-arenoso, enquanto a testemunha apresentou maiores valores no solo argiloso. Para o Cu no solo franco-arenoso, o T2 apresentou o segundo maior teor, seguido de T1 e T3, e T4 o menor teor. Para o solo argiloso, não foram verificadas diferenças entre T1-T4. Entre os solos, os tratamentos que receberam aporte de nutrientes e a testemunha (T5) apresentaram maiores teores de Cu para o argiloso, exceto o T2 que não apresentou diferença. Em relação ao Pb, não ocorreram diferenças entre solos (Tabela 18).

Tabela 18. Teores de micronutrientes e metais pesados (mg kg^{-1}) do tecido vegetal do milho ao fim dos 95 dias após a semeadura.

Parâmetro	Solo	Tratamentos					CV%
		T1	T2	T3	T4	T5	
Na (mg kg^{-1})	Franco-arenoso	41,94Aa	36,14Aa	29,05Aa	33,92Aa	30,86Ab	73,25
	Argiloso	25,42Ba	20,04Ba	22,01Ba	18,83Ba	167,2Aa	
B (mg kg^{-1})	Franco-arenoso	13,61Ba	13,21Ba	15,22Ba	10,17Ca	21,02Ab	13,17
	Argiloso	11,26Ba	10,03Bb	9,89Bb	10,03Ba	28,66Aa	
Cu (mg kg^{-1})	Franco-arenoso	3,25Cb	4,68Ba	3,64Cb	1,82Db	6,21Ab	12,22
	Argiloso	4,99Ba	5,16Ba	5,07Ba	4,74Ba	10,49Aa	
Fe (mg kg^{-1})	Franco-arenoso	136,04Ca	174,47Ba	101,66Ca	96,44Ca	239,85Aa	31,36
	Argiloso	118,87Ba	160,85Aa	80,54Ba	114,57Ba	197,95Aa	
Mn (mg kg^{-1})	Franco-arenoso	36,17Bb	42,51Bb	97,99Ab	41,69Bb	89,51Ab	17,63
	Argiloso	64,9Ca	87,27Ca	201,35Ba	74,48Ca	471,65Aa	
Zn (mg kg^{-1})	Franco-arenoso	20,31Ba	31,78Aa	19,98Ba	14,29Ba	27,54Ab	18,59
	Argiloso	23,38Ca	28,77Ba	25,86Ba	15,04Ca	35,94Aa	
Mo (mg kg^{-1})	Franco-arenoso	0,40Aa	0,23Ba	0,00Da	0,15Ca	0,00Da	33,28
	Argiloso	0,32Ab	0,17Ba	0,06Ca	0,09Ca	0,07Ca	
Al (mg kg^{-1})	Franco-arenoso	230,18Ba	333,2Aa	170,95Ba	189,09Ba	346,73Aa	30,61
	Argiloso	156,17Ba	237,47Aa	104,32Ba	150,46Ba	228,04Ab	
Ni (mg kg^{-1})	Franco-arenoso	1,00Aa	0,84Aa	0,85Aa	0,94 Aa	1,01Ab	3,63
	Argiloso	0,91Ba	0,92Ba	0,57Ba	0,88Ba	1,48Aa	
Pb (mg kg^{-1})	Franco-arenoso	0,34Ba	0,97Ba	0,79Ba	0,68Ba	1,55Aa	45,30
	Argiloso	0,74Ba	0,51Ba	0,60Ba	0,47Ba	1,50Aa	
Cd (mg kg^{-1})	Franco-arenoso	0,01Aa	0,02Aa	0,02Aa	0,00Aa	0,04Aa	102,80
	Argiloso	0,02Aa	0,02Aa	0,04Aa	0,01Aa	0,02Aa	
Cr (mg kg^{-1})	Franco-arenoso	3,55Ba	4,08Aa	3,50Ba	2,63Ca	2,74Cb	11,25
	Argiloso	3,22Aa	3,27Ab	2,88Ab	2,29Ba	3,45Aa	

T1: Dose de 100% bio sólido calcado, T2: Dose de 100% bio sólido calcado + NPK, T3: Dose de 50% bio sólido calcado + 50% NPK, T4: Dose de 100% NPK + Calagem, T5: Testemunha. Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste Skott-Knott a 5% de probabilidade.

Para sódio (Na), os tratamentos não diferiram entre si no solo franco-arenoso. Já para argiloso, o T5 apresentou maiores teores na planta e os tratamentos T1-T4 não diferiram entre si. Entre os solos, ocorreram diferença apenas no T5, sendo o maior teor no solo argiloso (Tabela 18). Para o ferro (Fe), o T5 não diferiu nos dois solos e apresentou maiores teores entre os tratamentos no solo franco-arenoso, mas não diferiu de T2 para solo argiloso. Nos dois solos,

o T2 apresentou maiores teores em comparação aos demais que receberam adubação, sendo que estes não diferiram entre si nos dois solos.

Em relação ao manganês (Mn), o T5 apresentou maiores teores em relação aos tratamentos em ambos os solos, não diferindo apenas de T3 no solo franco-arenoso (Tabela 18). Os demais dos tratamentos desse solo também não diferiram entre si. O mesmo aconteceu no solo argiloso, onde o T3 obteve maior teor em comparação ao restante dos tratamentos adubados. Entre os solos, as maiores médias ocorreram no solo argiloso. Em relação ao zinco (Zn), T2 e T5 obtiveram os maiores teores entre os tratamentos e não diferiram entre si no solo franco-arenoso, ocorrendo o mesmo para o restante dos tratamentos nesse solo. Já para solo argiloso, o T5 apresentou a maior teor, seguido de T2 e T3 que foram superiores a T1 e T4, onde ambos tratamentos não diferiram entre si. Entre os solos, ocorreu diferença apenas em T5, com o maior teor ocorrendo no solo argiloso.

Os teores de molibdênio (Mo) foram baixos em relação aos elementos anteriores (Tabela 18). O tratamento T1 obteve os maiores teores em ambos os solos. No solo franco-arenoso, T3 e T5 não diferiram, ficando abaixo de T4, seguido de T3. Já para solo argiloso, T2 diferiu de T3-T5 com maiores teores entre eles. Entre os solos não ocorreu diferença significativa, exceto para T1 com maiores valores no solo franco-arenoso. Para alumínio (Al), os resultados dos tratamentos de ambos os solos foram parecidos, com maiores teores no T2 e T5, não diferindo entre si, onde T1, T3 e T4 não se diferenciaram entre si também. Entre os solos, a diferença ocorreu apenas para T5 com maior média em solo franco-arenoso.

Em relação ao níquel (Ni), não ocorreu diferença entre os tratamentos no solo franco-arenoso (Tabela 18). Já para o solo argiloso, T5 foi superior aos demais, que não diferiram entre si. Entre os solos, ocorreu diferença apenas no T5, com o maior teor no solo argiloso. Para cádmio (Cd), todos os tratamentos dentro de ambos os solos tiveram teores baixos, não ocorrendo diferença significativa entre si. Para cromo (Cr), no solo franco-arenoso, o maior teor ocorreu no tratamento T2, seguido de T2, T3 e T5. Já no solo argiloso, os maiores teores foram nos tratamentos T1, T2, T3 e T5. Entre os solos, os maiores teores de Cr foram superiores no T2 e T3 no solo franco-arenoso, enquanto no solo argiloso, o T5 foi superior (Tabela 18).

6.1.3. Análises químicas no solo cultivado com o milho

Tratando-se de acidez ativa, os tratamentos T1 e T4 não diferiram entre si no solo franco-arenoso, assim como T1, T2 e T4 no solo argiloso. Os demais tratamentos apresentaram valores de pH em águas superiores aos do T5 ($\text{pH} < 5,5$) (Tabela 19). Na saturação por alumínio os maiores teores ocorreram no T5 (Tabela 20), enquanto os demais tratamentos não apresentaram Al disponível, apesar de T3 ter apresentado concentrações pequenas nos dois solos, porém as condições foram semelhantes, com maiores valores no T5 (Tabela 19).

Tabela 19. Valores de pH, acidez potencial e teor de alumínio dos solos aos 95 dias após a semeadura das plantas de milho.

Parâmetro	Solo	Tratamentos					CV%
		T1	T2	T3	T4	T5	
pH H ₂ O	Franco-arenoso	6,32 Aa	6,01 Ba	5,86 Ba	6,10 Aa	4,81 Ca	2,35
	Argiloso	6,06 Ab	6,15 Aa	5,60 Bb	6,06 Aa	4,49 Cb	
pH SMP	Franco-arenoso	7,01 Aa	6,68 Ba	6,44 Ca	6,83 Aa	5,89 Da	2,20
	Argiloso	6,58 Ab	6,56 Aa	5,75 Cb	6,34 Bb	4,78 Db	
Al (cmolc.dm^{-3})	Franco-arenoso	0,00 Ba	0,00 Ba	0,02 Ba	0,00 Ba	0,72 Ab	12,81
	Argiloso	0,00 Ba	0,00 Ba	0,05 Ba	0,00 Ba	2,31 Aa	
H+Al (cmolc.dm^{-3})	Franco-arenoso	2,33 Cb	2,85 Ca	3,60 Bb	2,67 Cb	5,40 Ab	8,77
	Argiloso	3,38 Ca	3,41 Ca	6,01 Ba	3,61 Ca	11,97 Aa	

T1: Dose de 100% biossólido calcado, T2: Dose de 100% biossólido calcado + NPK, T3: Dose de 50% biossólido calcado + 50% NPK, T4: Dose de 100% NPK + Calagem, T5: Testemunha. Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste Skott-Knott a 5% de probabilidade.

Os maiores valores de acidez potencial (H+Al) também ocorreram no T5. De maneira geral, o solo argiloso apresentou maiores valores de H + Al (Tabela 19), devido as condições iniciais analisadas antes da aplicação do biossólido, onde solos argilosos são naturalmente mais ácidos. Quanto a capacidade de troca de cátions (CTC) tanto efetiva quanto potencial (Tabela 20), ficou evidenciado a diferença entre solos, onde todos os tratamentos no solo argiloso apresentaram os maiores valores. Em se tratando de CTC efetiva, os tratamentos T1 e T2 apresentaram os maiores valores nos dois solos. Para o solo franco-arenoso, T1 e T3 apresentam maiores valores, seguido de T4. De forma similar no solo argiloso, T1 e T2 apresentaram os maiores valores, seguido de T4 e T5. Para CTC potencial, o tratamento T1 e a testemunha (T5) obtiveram as maiores médias no solo franco-arenoso, enquanto no solo argiloso, T5 foi superior. Os demais tratamentos, em geral, não diferiram entre si nos dois solos (Tabela 20).

Tabela 20. Valores de capacidade de troca catiônica, saturação por bases e saturação por alumínio dos solos aos 95 dias após a semeadura das plantas de milho.

Parâmetro	Solo	Tratamentos					CV%
		T1	T2	T3	T4	T5	
CTC _{efetiva} (cmol _c .dm ⁻³)	Franco-arenoso	6,12 Ab	5,89 Ab	3,13 Cb	4,30 Bb	3,15 Cb	11,63
	Argiloso	9,74 Aa	9,33 Aa	6,35 Ca	7,62 Ba	4,89 Ba	
CTC _{potencial} (cmol _c .dm ⁻³)	Franco-arenoso	8,45 Ab	8,90 Ab	6,70 Bb	6,98 Bb	7,83 Ab	8,30
	Argiloso	12,96 Ba	12,62 Ba	12,33 Ba	11,49 Ba	14,70 Aa	
V %	Franco-arenoso	72,41 Aa	68,12 Bb	46,07 Da	62,55 Ca	28,42 Ea	4,84
	Argiloso	75,15 Aa	75,20 Aa	49,29 Ca	65,18 Ba	17,90 Db	
m %	Franco-arenoso	0,00 Ba	0,00 Ba	0,23 Ba	0,00 Ba	25,88 Ab	11,92
	Argiloso	0,00 Ba	0,00 Ba	1,06 Ba	0,00 Ba	46,85 Aa	

T1: Dose de 100% biossólido calcado, T2: Dose de 100% biossólido calcado + NPK, T3: Dose de 50% biossólido calcado + 50% NPK, T4: Dose de 100% NPK + Calagem, T5: Testemunha. Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste Skott-Knott a 5% de probabilidade. V=saturação por bases, m=saturação por alumínio.

Para a saturação de bases, no solo franco-arenoso, T1 foi superior aos demais tratamentos, que também diferiram entre si. No solo argiloso, T1 e T2 foram superiores aos demais tratamentos, que também diferiram entre si (Tabela 20). Entre os solos, apenas o T5 apresentou maiores valores no franco-arenoso e T2 no argiloso. Em relação a saturação por alumínio, o tratamento testemunha apresentou médias superiores ao restante dos tratamentos independente do solo, que não diferiram entre si. Na comparação dos solos, T5 foi superior no solo argiloso (Tabela 20).

Os teores de macronutrientes, sódio e carbono orgânico total do solo aos 95 dias após a semeadura das plantas de milho estão apresentados na Tabela 21.

Tabela 21. Teores de macronutrientes, sódio e carbono orgânico total do solo do milho ao fim dos 95 dias após a semeadura.

Parâmetro	Solo	Tratamentos					CV %
		T1	T2	T3	T4	T5	
Ca (cmol.c.dm^{-3})	Franco-arenoso	3,31 Ab	2,84 Bb	1,60 Cb	3,41 Ab	1,35 Ca	8,64
	Argiloso	5,05 Ba	5,18 Ba	3,34 Ca	6,46 Aa	1,00 Da	
Mg (cmol.c.dm^{-3})	Franco-arenoso	2,59 Ab	2,43 Ab	1,34 Bb	0,56 Ca	0,90 Ca	12,91
	Argiloso	4,47 Aa	4,53 Aa	2,69 Ba	0,63 Da	1,16 Ca	
K (cmol.c.dm^{-3})	Franco-arenoso	0,10 Aa	0,08 Aa	0,06 Ba	0,07 Ba	0,09 Aa	16,23
	Argiloso	0,07 Bb	0,08 Ba	0,07 Ba	0,07 Ba	0,11 Aa	
Na (cmol.c.dm^{-3})	Franco-arenoso	0,12 Ab	0,12 Ab	0,09 Bb	0,07 Bb	0,08 Ba	10,72
	Argiloso	0,14 Aa	0,14 Aa	0,12 Ba	0,10 Ca	0,08 Da	
P (mg.kg^{-1})	Franco-arenoso	8,44 Cb	13,71 Aa	10,59 Ba	14,46 Aa	2,94 Da	8,43
	Argiloso	11,90 Aa	12,43 Ab	7,83 Bb	6,96 Bb	3,33 Ca	
P rem (mg.kg^{-1})	Franco-arenoso	34,56 Aa	32,55 Ba	32,63 Ba	35,72 Aa	31,30 Ca	6,37
	Argiloso	18,14 Ab	18,62 Ab	19,41 Ab	15,54 Bb	13,45 Bb	
S (mg.kg^{-1})	Franco-arenoso	4,83 Ab	8,37 Ab	4,97 Ab	7,47 Ab	4,79 Ab	2,88
	Argiloso	66,64 Ba	68,24Ba	59,25 Ca	83,71 Aa	48,86 Ca	
N total (g.kg^{-1})	Franco-arenoso	0,92 Ca	1,42 Aa	1,20 Ba	0,75 Cb	1,25 Ba	12,40
	Argiloso	0,67 Bb	1,30 Aa	0,70 Bb	1,17 Aa	0,77 Bb	
COT (g.kg^{-1})	Franco-arenoso	9,86 Bb	12,41 Aa	8,86 Bb	8,43 Bb	8,66 Ba	20,67
	Argiloso	14,79 Aa	13,94 Aa	15,26 Aa	14,00 Aa	10,46 Ba	

T1: Dose de 100% biossólido caleado, T2: Dose de 100% biossólido caleado + NPK, T3: Dose de 50% biossólido caleado + 50% NPK, T4: Dose de 100% NPK + Calagem, T5: Testemunha. Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste Skott-Knott a 5% de probabilidade.

Em relação aos macronutrientes, para o Ca os tratamentos T1 e T4 apresentaram os maiores teores do solo franco-arenoso e T4 no solo argiloso. Para o Mg, os teores de T1 e T2 foram superiores nos dois solos, enquanto para o K os teores foram superiores nos tratamentos T1, T3 e T5 no solo franco-arenosos e T5 foi superior no argiloso. Entre os solos, para Ca e Mg, os tratamentos que apresentaram diferenças, com maiores valores, foram encontrados no solo argiloso (Tabela 21).

Para o teor de Na, os maiores valores foram encontrados no T1 e Te, para ambos os solos. Na comparação entre os solos, os tratamentos T1-T4 diferiram entre si, com maiores valores para o solo argiloso (Tabela 21).

Em relação ao P disponível, os maiores teores foram encontrados no T2 e T4 no solo franco-arenoso e T1 e T2 no argiloso. Entre os solos, os teores de P foram superiores no

argiloso para os tratamentos T2-T4, sendo maior no franco-arenoso apenas para o T1 (Tabela 21). Para o fósforo remanescente (P rem), os maiores valores foram encontrados no T1 para o solo franco-arenoso e no T1 -T3 para o solo argiloso. Entre os solos, todos os tratamentos foram superiores no franco-arenoso.

Para o nitrogênio (N), os maiores valores foram encontrados no T2 para o solo franco-arenoso e T2 e T4 para o solo argiloso. Entre os solos, T1, T3 e T5 foram superiores no franco-arenoso, enquanto o T4 apresentou maiores valores no solo argiloso (Tabela 21).

Em relação ao enxofre (S) não houve diferenças entre tratamentos no solo franco-arenoso e T4 foi superior no solo argiloso. Entre os solos, o argiloso de destacou com os maiores valores para todos os tratamentos. O COT foi superior no tratamento T2 no solo franco-arenoso e superior nos tratamentos T1-T4 para o solo argiloso. Na comparação entre os solos, T1, T3 e T4 foram superiores no argiloso (Tabela 21).

Para micronutrientes no solo, encontrou-se o maior teor de Mn no T2 no solo franco-arenoso, sendo que os demais tratamentos diferiram entre si, enquanto T5 foi superior aos demais tratamentos em solo argiloso (Tabela 22). Para o Fe não ocorreu diferença significativa entre os tratamentos em ambos os solos. Na comparação entre os solos, Mn e Fe foram superiores no solo franco-arenoso em relação ao argiloso em todos os tratamentos. Em relação ao Cu, não houve diferença entre os tratamentos do solo franco-arenoso, já para argiloso T5 obteve os maiores teores entre o restante dos tratamentos, seguido de T4. Em solo argiloso todos os tratamentos foram superiores aos tratamentos de arenoso.

Para Zn, os teores de T1 e T5 foram superiores aos outros tratamentos em solo franco-arenoso, sendo T3 o mais baixo, já para argiloso os tratamentos T3 e T4 foram superiores aos outros tratamentos e não diferiram entre si. Entre solos, T2 e T4 não diferiram entre si, enquanto em solo argiloso, os tratamentos T3 e T4 foram superiores ao franco-arenoso e T1 superior em franco-arenoso.

Em relação aos teores B, os tratamentos T1 e T2 obtiveram os maiores valores no solo franco-arenoso, enquanto no solo argiloso não ocorreu diferenças entre os tratamentos. Entre os solos, os tratamentos T1 e T2 foram superiores no franco-arenoso e T4 foi superior no argiloso (Tabela 22).

Tabela 22. Teores de micronutrientes ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) do solo aos 95 dias após a semeadura das plantas de milho.

Parâmetro	Solo	Tratamentos					CV%
		T1	T2	T3	T4	T5	
Mn ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Franco-arenoso	57,89 Ba	63,31 Aa	52,17Ca	56,08Ba	53,75Ca	5,47
	Argiloso	26,11 Bb	25,57 Bb	24,55Bb	24,78Bb	31,82Ab	
Fe ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Franco-arenoso	335,96 Aa	307,25Aa	325,52Aa	336,76Aa	336,64Aa	7,23
	Argiloso	167,57 Ab	166,58Ab	164,62b	156,71Ab	159,7Ab	
Cu ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Franco-arenoso	4,28 Ab	6,88 Ab	4,39 Ab	4,22 Ab	6,34 Ab	11,09
	Argiloso	39,45 Ca	40,80 Ca	47,50 Ba	45,73 Ba	63,26 Aa	
Zn ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Franco-arenoso	28,06 Aa	21,36 Ba	14,78 Cb	18,60 Bb	27,15 Aa	10,23
	Argiloso	22,59 Cb	20,34 Ca	36,35 Aa	34,60 Aa	29,22 Ba	
B ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Franco-arenoso	0,52 Aa	0,43Aa	0,18Ca	0,19 Cb	0,32Ba	30,34
	Argiloso	0,25 Ab	0,18Ab	0,27Aa	0,33Aa	0,35Aa	

T1: Dose de 100% biossólido calcado, T2: Dose de 100% biossólido calcado + NPK, T3: Dose de 50% biossólido calcado + 50% NPK, T4: Dose de 100% NPK + Calagem, T5: Testemunha. Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste Skott-Knott a 5% de probabilidade.

Quanto aos teores de metais pesados, nos valores de para Bário (Ba) os maiores teores ocorreram em T1 para os dois solos, seguido de T3 e T5 em solo franco-arenoso, já para argiloso o restante dos tratamentos não diferiram entre si. Entre solos, os maiores teores permaneceram em argiloso em T3 e T4 e para franco-arenoso em T1, T2 e T5 (Tabela 23).

Tabela 23. Teores de metais pesados (mg.kg^{-1}) nos solos do milho ao fim dos 95 dias após a semeadura.

Parâmetro	Solo	Tratamentos					CV%
		T1	T2	T3	T4	T5	
Ba (mg.kg^{-1})	Franco-arenoso	22,72 Aa	19,34 Ba	12,75 Ca	12,09 Cb	19,71 Ba	8,39
	Argiloso	17,16 Ab	15,30 Bb	14,38 Ba	15,72 Ba	14,00 Bb	
Cu (mg.kg^{-1})	Franco-arenoso	4,28 Ab	6,88 Ab	4,39 Ab	4,22 Ab	6,34 Ab	11,09
	Argiloso	39,45 Ca	40,80 Ca	47,50 Ba	45,73 Ba	63,26 Aa	
Zn (mg.kg^{-1})	Franco-arenoso	28,06 Aa	21,36 Ba	14,78 Cb	18,60 Bb	27,15 Aa	10,23
	Argiloso	22,59 Cb	20,34 Ca	36,35 Aa	34,60 Aa	29,22 Ba	
As (mg.kg^{-1})	Franco-arenoso	1,08 Ab	0,66 Bb	0,38 Cb	0,52 Bb	0,90 Ab	7,74
	Argiloso	3,16 Aa	3,28 Aa	2,82 Ba	2,74 Ba	2,63 Ba	
Ni (mg.kg^{-1})	Franco-arenoso	1,24 Ab	1,52 Ab	1,17 Ab	0,94 Ab	1,62 Ab	16,18
	Argiloso	8,06 Ba	8,18 Ba	10,23 Aa	9,36 Aa	8,60 Ba	
Pb (mg.kg^{-1})	Franco-arenoso	21,66 Ab	14,70 Ab	10,22 Cb	14,47 Bb	20,23 Ab	8,29
	Argiloso	30,68 Aa	27,34 Ba	29,02 Ba	31,85 Aa	28,77 Ba	
Cr (mg.kg^{-1})	Franco-arenoso	17,21 Aa	5,61 Bb	0,00 Cb	0,00 Cb	0,00 Cb	7,60
	Argiloso	14,01 Ab	14,44 Aa	14,00 Aa	13,81 Aa	12,70 Ba	

T1: Dose de 100% biossólido calcado, T2: Dose de 100% biossólido calcado + NPK, T3: Dose de 50% biossólido calcado + 50% NPK, T4: Dose de 100% NPK + Calagem, T5: Testemunha. Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste Skott-Knott a 5% de probabilidade.

Em alguns metais pesados, todos os tratamentos deram abaixo do limite de detecção (LOQ), sendo eles Cd ($< 0,08$), Mo ($< 0,7$), Hg (< 30), Se ($< 2,1$), abrangendo na tabela apenas os que atingiram os analitos que conseguiram ser quantificados pelo equipamento.

Para arsênio (As), os tratamentos T1 e T5 foram superiores aos demais tratamentos em solo franco-arenoso, onde T2 e T4 não diferiram entre si. Em solo argiloso, T1 e T2 obtiveram os maiores teores, não diferindo entre si, já os outros tratamentos não ocorreram diferença entre si. Todos os tratamentos em solo argiloso foram superiores a franco-arenoso.

Em relação ao níquel (Ni), em solo franco-arenoso não houve diferença entre os tratamentos, já para argiloso T4 e T4 obtiveram os maiores teores, e o restante dos tratamentos não diferiram entre si. Entre solos, os maiores teores permaneceram em argiloso em todos os tratamentos.

Para chumbo (Pb), não houve diferença entre T1, T2 e T5, sendo esses com maiores concentrações em franco-arenoso, seguido de T4. Em argiloso, os maiores teores permaneceram em T1 e T4, não diferindo entre si, e não correram diferenças entre os outros tratamentos. Todos os tratamentos em solo argiloso foram superiores ao franco-arenoso.

Para Cr, T1 obteve maior concentração, seguido de T2 em solo franco-arenoso, e o restante dos tratamentos não diferiram entre si. Em solo argiloso, o menor teor foi em T5, não havendo diferença entre os outros tratamentos. Entre solos, somente T1 teve maior concentração em solo franco-arenoso, onde os outros tratamentos foram superiores em argiloso.

6.2. Experimento com a cultura da aveia preta

6.2.1. Número de perfilhos, altura, massa seca e índice Spad das plantas de aveia preta

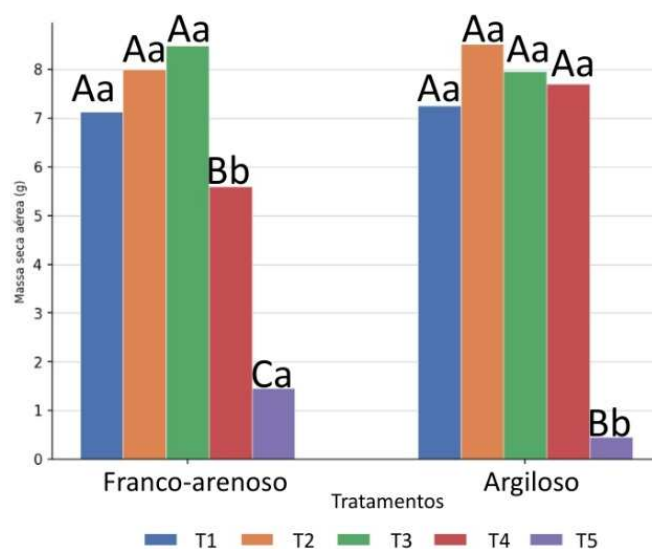
O tratamento testemunha (T5) apresentou os menores valores para número de perfilhos, altura, índice spad (Tabela 24) massa seca aérea e radicular (Figura 8 e 9) e nos dois solos avaliados em comparação aos demais tratamentos. Na comparação entre os solos, foram verificados maiores valores para esses parâmetros no franco-arenoso, exceto para número de perfilhos, onde não ocorreu diferença significativa entre solos (Tabela 24).

Tabela 24. Valores dos parâmetros morfológicos e índice Spad das plantas de aveia preta ao fim dos 67 dias após a semeadura.

Parâmetro	Solo	Tratamentos					CV%
		T1	T2	T3	T4	T5	
Perfilho (un)	Franco-arenoso	11,50 Ba	15,00 Aa	13,00 Ba	13,75 Ba	5,50 Ca	15,94
	Argiloso	12,25 Aa	13,00 Aa	12,75 Aa	12,50 Aa	6,00 Ba	
Altura (cm)	Franco-arenoso	45,62 Aa	48,72 Aa	46,15 Aa	43,70 Aa	30,12 Ba	5,91
	Argiloso	42,35 Bb	45,57 Bb	48,33 Aa	44,30 Ba	25,82 Cb	
Índice Spad	Franco-arenoso	43,71 Cb	49,64 Aa	48,81 Aa	45,80 Ba	34,85 Da	3,13
	Argiloso	46,10 Aa	46,79 Ab	46,24 Ab	46,69 Aa	25,41 Bb	

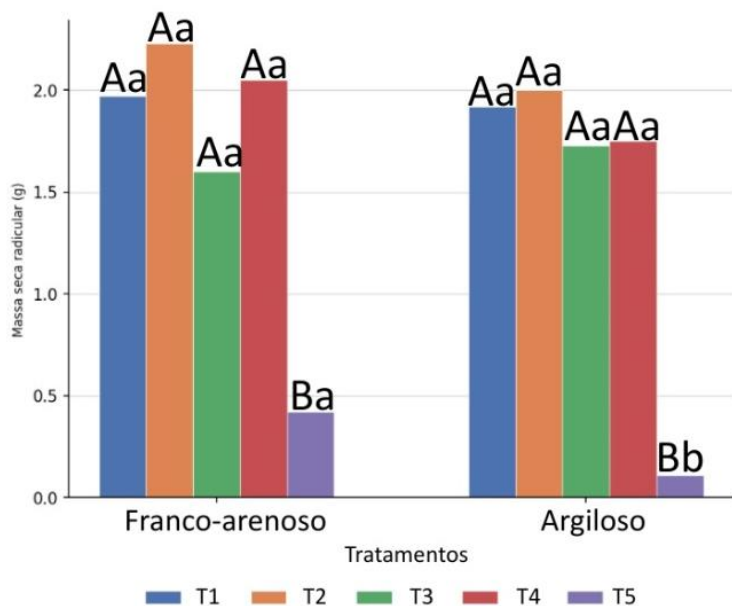
T1: Dose de 100% biossólido calcado, T2: Dose de 100% biossólido calcado + NPK, T3: Dose de 50% biossólido calcado + 50% NPK, T4: Dose de 100% NPK + Calagem, T5: Testemunha. Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste Skott-Knott a 5% de probabilidade. CV= coeficiente de variação.

Figura 8. Valores médios de massa seca aérea das plantas da aveia preta ao fim dos 67 dias após a semeadura.



T1: Dose de 100% biossólido calcado, T2: Dose de 100% biossólido calcado + NPK, T3: Dose de 50% biossólido calcado + 50% NPK, T4: Dose de 100% NPK + Calagem, T5: Testemunha. Médias seguidas de mesma letra minúscula (solos) e maiúscula (tratamentos) na coluna, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Figura 9. Valores médios de massa seca radicular das plantas da aveia preta ao fim dos 67 dias após a semeadura.



T1: Dose de 100% biossólido calcado, T2: Dose de 100% biossólido calcado + NPK, T3: Dose de 50% biossólido calcado + 50% NPK, T4: Dose de 100% NPK + Calagem, T5: Testemunha. Médias seguidas de mesma letra minúscula (solos) e maiúscula (tratamentos) na coluna, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Para solo franco-arenoso, T2 apresentou maior número de perfilhos e não diferiu da altura para os tratamentos T1, T3, T4. Já para massa seca aérea e radicular (Figura 8 e 9), T1-T4 apresentaram maiores valores, com exceção de T4 na parte aérea da planta. Para índice spad, T2 e T3 foram superiores aos demais tratamentos. Em solo argiloso, os tratamentos T1-T4 apresentaram maiores valores para as variáveis estudadas, com exceção de T2 em altura, onde superou todos os tratamentos. Comparando-se os solos dentro de cada tratamento, de maneira geral não ocorreu diferença significativa entre eles na quantidade de perfilhos, nem em massa seca aérea e radicular em T1-T3. O solo argiloso se apresentou superior em T4 em altura, e T1 no índice spad (Tabela 24).

6.2.2. Análises químicas na parte aérea das plantas de aveia preta

O tratamento testemunha apresentou valores superiores aos demais para os elementos nitrogênio (N), potássio (K) e enxofre (S) (Tabela 25). Para o N, não ocorreu diferença significativa entre T1, T2 e T4 em solo franco-arenoso, já para solo argiloso, os tratamentos T2 e T4 foram superiores a T1 e T3. Entre solos, o franco-arenoso foi superior em T1 e T2, mas para T3, o argiloso apresentou maior valor. Para K, os tratamentos T1 e T4 foram superiores em solo franco-arenoso, já para argiloso, T4 foi superior a T1-T3, não ocorrendo diferença significativa entre T2 e T3. Entre solos, argiloso foi superior em franco-arenoso em T2, T3 e T4, não havendo diferença significativa em T1, mas para T5, o franco-arenoso apresentou maior valor. Para S, T1 e T2 foram superiores a T3 e T4 em solo franco-arenoso. Para o solo argiloso, T2 foi superior a T1, T3 e T4. Entre solos, não ocorreu diferença significativa entre os tratamentos, apenas para T5, onde o franco-arenoso obteve maior valor.

Tabela 25. Teores de macronutrientes (g kg^{-1}) do tecido vegetal da aveia preta ao fim dos 67 dias após a semeadura.

Parâmetro	Solo	Tratamentos					CV%
		T1	T2	T3	T4	T5	
N (g.kg^{-1})	Franco-arenoso	22,85 Ba	24,33 Ba	13,28 Cb	21,21 Ba	27,79 Aa	9,81
	Argiloso	15,59 Cb	21,01 Bb	17,14 Ca	18,80 Ba	28,10 Aa	
P (g.kg^{-1})	Franco-arenoso	1,30 Aa	1,18 Ba	0,99 Ca	0,98 Ca	0,84 Da	8,08
	Argiloso	0,86 Ba	0,98 Ab	0,73 Cb	0,80 Cb	0,74 Ca	
K (g.kg^{-1})	Franco-arenoso	11,26 Ba	9,49 Cb	9,29 Cb	12,36 Bb	27,53 Aa	6,30
	Argiloso	10,79 Da	12,29 Ca	12,03 Ca	13,71 Ba	23,03 Ab	
Ca (g.kg^{-1})	Franco-arenoso	4,62 Ba	3,87 Ca	3,44 Da	7,24 Aa	2,83 Ea	9,68
	Argiloso	3,10 Bb	3,36 Ba	2,88 Bb	5,67 Ab	1,45 Cb	
Mg (g.kg^{-1})	Franco-arenoso	5,16 Aa	4,81 Aa	3,43 Ba	1,61 Ca	1,27 Cb	8,78
	Argiloso	3,04 Bb	3,50 Ab	2,58 Cb	1,55 Ea	2,08 Da	
S (g.kg^{-1})	Franco-arenoso	1,84 Ba	1,69 Ba	1,43 Ca	1,29 Ca	2,77 Aa	8,64
	Argiloso	1,63 Ca	1,76 Ba	1,51 Ca	1,48 Ca	2,03 Ab	

T1: Dose de 100% biossólido calcado, T2: Dose de 100% biossólido calcado + NPK, T3: Dose de 50% biossólido calcado + 50% NPK, T4: Dose de 100% NPK + Calagem, T5: Testemunha. Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste Skott-Knott a 5% de probabilidade.

Para fósforo (P), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), no solo franco-arenoso (Tabela 25), T5 apresentou os menores valores em comparação ao restante dos tratamentos, sem diferir do T4 para Mg. Para P, não ocorreu diferença significativa entre os tratamentos e solos em T3 e T4. T1 foi superior aos tratamentos em solo franco-arenoso e T2 em argiloso. Entre os solos, não houve diferenças em T1 e T5, mas para T2, T3 e T4, o solo franco-arenoso apresentou maiores valores. Para Ca, T4 foi superior a todos os tratamentos nos dois solos, seguido de T1, T2, T3 e T5 em solo franco-arenoso. Já para argiloso não ocorreu diferença significativa entre T1-T3. Entre solos, o franco-arenoso foi superior em todos os tratamentos, exceto para T2, onde não diferiu do argiloso. Para o Mg, não houve diferença significativa entre T1 e T2 em solo franco-arenoso, sendo estes superiores aos demais, seguido de T3. Para solo argiloso, T2 foi superior seguido de T1, T3 e T4. Entre solos, o franco-arenoso foi superior a todos, exceto para T4 e T5, onde o argiloso obteve os maiores valores.

Em relação aos micronutrientes e metais pesados, de maneira geral, T5 foi superior aos demais tratamentos nos elementos cobre (Cu), manganês (Mn), zinco (Zn), alumínio (Al), níquel (Ni), chumbo (Pb), cádmio (Cd), chumbo (Pb), níquel (Ni) e cromo (Cr) (Tabela 26).

Tabela 26. Teores micronutrientes e metais pesados (mg.kg⁻¹) no tecido da planta da aveia preta ao fim dos 67 dias após a semeadura.

Parâmetro	Solo	Tratamentos					CV%
		T1	T2	T3	T4	T5	
Na (mg.kg ⁻¹)	Franco-arenoso	4058,47Ab	3452,51Bb	2940,42Cb	2520,93Db	1423,91Ea	8,27
	Argiloso	4484,58Aa	4681,10Aa	3876,45Ba	3099,75Ca	1400,28Da	
B (mg.kg ⁻¹)	Franco-arenoso	5,63Bb	4,63Bb	5,16Ba	3,72Cb	9,69Aa	13,18
	Argiloso	7,86Aa	6,42Ba	6,20Ba	7,05Aa	3,67Cb	
Cu (mg.kg ⁻¹)	Franco-arenoso	6,29Ab	5,07Bb	3,72Bb	4,67Bb	7,86Ab	15,02
	Argiloso	9,44Ca	11,22Ba	8,02Ca	9,74Ca	18,13Aa	
Fe (mg.kg ⁻¹)	Franco-arenoso	353,78 Bb	267,13 Bb	590,50 Ab	302,17 Bb	667,50 Aa	24,16
	Argiloso	1714,96Aa	1337,26Ba	852,50Ca	1687,44Aa	607,57 Ca	
Mn (mg.kg ⁻¹)	Franco-arenoso	23,09 Bb	20,19 Bb	28,56 Bb	23,36 Bb	369,55Ab	7,31
	Argiloso	78,88 Ba	84,57 Ba	79,55 Ba	68,38 Ba	447,43Aa	
Zn (mg.kg ⁻¹)	Franco-arenoso	37,78 Ba	27,60 Ca	20,23 Db	13,51 Ea	42,20 Ab	9,14
	Argiloso	26,05 Cb	30,37 Ba	25,33 Ca	12,17 Da	55,19 Aa	
Mo (mg.kg ⁻¹)	Franco-arenoso	2,85 Aa	1,54 Ca	0,74 Da	1,88 Ba	0,29 Eb	33,28
	Argiloso	1,21 Ab	1,24 Ab	0,43 Db	0,94 Bb	0,58 Ca	
Al (mg.kg ⁻¹)	Franco-arenoso	754,26Bb	1698,23Aa	409,82Cb	1012,13Ba	1468,58Ab	20,46
	Argiloso	1720,72Ba	1126,3Cb	1190,7Ca	1348,24Ca	2978,43Aa	
Ni (mg.kg ⁻¹)	Franco-arenoso	1,23 Ba	0,87 Bb	0,80 Ba	0,88 Bb	8,40 Aa	16,18
	Argiloso	1,47 Ba	1,48 Ba	1,17 Ba	1,58 Ba	6,10 Aa	
Pb (mg.kg ⁻¹)	Franco-arenoso	0,76 Cb	0,66 Cb	1,36 Ba	0,83 Ca	2,01 Ab	13,35
	Argiloso	1,47 Ba	1,00 Ca	1,46 Ba	0,71 Da	2,98 Aa	
Cd (mg.kg ⁻¹)	Franco-arenoso	0,02 Ca	0,03 Ca	0,8 Ba	0,02 Ca	0,11 Aa	42,25
	Argiloso	0,01 Ba	0,02 Ba	0,03 Bb	0,03 Ba	0,06 Ab	
Cr (mg.kg ⁻¹)	Franco-arenoso	2,84 Ca	2,56 Ca	3,77 Ba	2,75 Ca	10,93 Ab	14,42
	Argiloso	3,13 Ba	3,09 Ba	2,67 Bb	3,13 Ba	12,97 Aa	

T1: Dose de 100% biossólido caleado, T2: Dose de 100% biossólido caleado + NPK, T3: Dose de 50% biossólido caleado + 50% NPK, T4: Dose de 100% NPK + Calagem, T5: Testemunha. Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste Skott-Knott a 5% de probabilidade.

Para sódio (Na), as menores concentrações foram em T5. Em solo franco-arenoso, T1 apresentou maiores valores seguido de T2, T3, T4 e T5. Já para argiloso, em T1 e T2 não ocorreu diferença significativa. Ente solos, o argiloso foi superior a franco-arenoso, exceto em T5, não ocorrendo diferença entre eles. Para boro (B), T5 foi superior em solo franco-arenoso

e não houve diferença significativa entre T1-T3. Em solo franco-arenoso, T1 e T4 foram superiores ao restante e não ocorreu diferença significativa entre T2 e T3, sendo T5 a menor concentração. Entre solos, franco-arenoso foi maior em T5 e argiloso superior em T1, T2 e T4, não correndo diferença entre eles em T3 (Tabela 26).

Para Cu em solo franco-arenoso, T1 foi superior aos demais, e não houve diferença significativa entre o restante. Em solo argiloso, T5 foi superior, e não houve diferença significativa entre T1, T3 e T4. Entre solos, o argiloso foi superior ao franco-arenoso em todos os tratamentos. Para o ferro (Fe), T3 foi superior aos demais e não ocorreu diferença entre o restante dos tratamentos em solos franco-arenoso. Já para argiloso, T1 e T4 obtiveram as maiores concentrações, seguida de T2, T4. Entre solos, o argiloso foi superior ao franco-arenoso em todos os tratamentos, exceto para T5, onde não ocorreu diferença entre eles (Tabela 26).

Em relação ao Mn, não houve diferença significativa entre os tratamentos T1-T4 para os dois solos. Entre os solos, o argiloso foi superior ao franco-arenoso em todos os tratamentos. Para zinco (Zn), T1 foi superior aos demais tratamentos em franco-arenoso, e no argiloso, T2 foi maior que os demais tratamentos, não ocorrendo diferença significativa entre T1 e T4. Entre solos, não ocorreu diferença nos tratamentos T2 e T4, onde franco-arenoso foi superior em T1 e argiloso em T3 e T5 (Tabela 26).

Para molibdênio (Mo), T1 foi superior a todos os tratamentos em solo franco-arenoso, seguido de T4. Já para argiloso, T1 e T2 não diferiram entre si e foram superiores aos demais tratamentos. Entre solos, franco-arenoso foi maior que argiloso em todos os tratamentos, exceto para T5, sendo maior em argiloso (Tabela 26).

Para o Al, T2 foi superior ao restante dos tratamentos, onde não ocorreu diferença significativa entre T1 e T4. Já para argiloso T1 foi superior ao restante entre T2-T4 no solo franco-arenoso. Entre solos, não ocorreu diferença significativa em T4, franco-arenoso foi superior a argiloso em T2 e argiloso superior a franco-arenoso nos demais tratamentos (Tabela 26).

Para Ni, não ocorreu diferença significativa entre o restante dos tratamentos em solo franco-arenoso e argiloso. Entre solos, franco-arenoso foi superior a argiloso em T5 e inferior em T2 e T4, onde não ocorreu diferença significativa entre eles em T1 e T3. Para chumbo (Pb), T3 foi superior ao restante dos tratamentos em solo franco-arenoso, onde não ocorreu diferença significativa entre o restante. Já para argiloso T1 e T2 não diferiram entre si e foram superiores ao restante dos tratamentos. Entre solos não ocorreu diferença em T3 e T4, sendo franco-franco-arenoso superior a argiloso aos demais tratamentos (Tabela 26).

Para Cd, T3 foi superior ao restante dos tratamentos em solo franco-arenoso, onde eles não diferiram entre si. Já para argiloso, não ocorreu diferença significativa entre o restante dos tratamentos. Entre solos apenas franco-arenoso foi superior em T2 e T5, onde não ocorreu diferença ao argiloso no restante dos tratamentos. O mesmo ocorreu para Cr, exceto a diferença entre solos no T5, onde argiloso foi superior ao franco-arenoso (Tabela 26).

6.2.3. Análises químicas no solo cultivado com a aveia preta

Para o pH em água, todos os tratamentos apresentaram valores superiores ao T5 nos dois tipos de solo, não diferindo entre si. Em geral, destaca-se que T5 obteve os menores valores de pH e maiores para acidez potencial e alumínio (Tabela 27).

Tabela 27. Valores de pH, acidez potencial e teor de alumínio dos solos aos 67 dias após a semeadura das plantas de aveia preta.

Parâmetro	Solo	Tratamentos					CV%
		T1	T2	T3	T4	T5	
pH H ₂ O	Franco-arenoso	6,61 Aa	6,27 Aa	6,30 Aa	6,62 Aa	5,32 Ba	5,18
	Argiloso	6,34 Aa	6,19 Aa	6,30 Aa	6,26 Aa	4,90 Ba	
pH SMP	Franco-arenoso	7,33 Aa	7,02 Ba	6,95 Ca	7,29 Aa	6,17 Ca	3,32
	Argiloso	6,93 Ab	7,00 Aa	6,68 Aa	7,04 Aa	5,71 Bb	
Al (cmolc.dm ⁻³)	Franco-arenoso	0,00 Ba	0,00 Ba	0,00 Ba	0,00 Ba	0,48 Ab	33,43
	Argiloso	0,00 Ba	0,00 Ba	0,00 Ba	0,00 Ba	1,41 Aa	
H+Al (cmolc.dm ⁻³)	Franco-arenoso	1,85 Ca	2,03 Ca	2,44 Bb	1,10 Ca	4,38 Ab	10,07
	Argiloso	2,28 Ca	2,36 Ca	3,00 Ba	2,30 Ca	7,07 Aa	

T1: Dose de 100% biossólido calcado, T2: Dose de 100% biossólido calcado + NPK, T3: Dose de 50% biossólido calcado + 50% NPK, T4: Dose de 100% NPK + Calagem, T5: Testemunha. Medias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste Skott-Knott a 5% de probabilidade.

Em relação a CTC efetiva, T1 apresentou valores superiores aos demais tratamentos nos dois tipos de solo, não ocorrendo diferença significativa entre T2 e T4 nos dois tipos de solo. Já para CTC potencial, T1 apresentou maior valor em solo argiloso, onde não ocorreu diferença significativa entre T2 e T4 e entre T1, T2 e T4 em solo franco-arenoso. Comparando o solo dentro de tratamento, é possível destacar que solo argiloso possui maiores valores em todos os tratamentos entre as duas capacidades de troca catiônica, não ocorrendo diferença significativa apenas para T5 em CTC efetiva (Tabela 28).

Tabela 28. Valores de capacidade de troca catiônica, saturação por bases e saturação por alumínio dos solos aos 67 dias após a semeadura das plantas de aveia preta.

Parâmetro	Solo	Tratamentos					CV%
		T1	T2	T3	T4	T5	
CTC _{efetiva} (cmolc.dm ⁻³)	Franco-arenoso	7,94 Ab	7,15 Bb	4,68 Cb	6,83 Bb	2,58 Da	8,97
	Argiloso	11,85 Aa	9,46 Ba	6,73 Ca	9,33 Ba	3,02 Da	
CTC _{potencial} (cmolc.dm ⁻³)	Franco-arenoso	9,79 Ab	9,18 Ab	7,12 Bb	8,74 Ab	6,48 Bb	8,28
	Argiloso	14,13 Aa	11,82 Ba	9,73 Ca	11,63 Ba	8,12 Da	
V %	Franco-arenoso	80,93 Aa	77,92 Ba	65,62 Ba	78,16 Aa	32,16 Ca	5,30
	Argiloso	83,88 Ab	79,99 Ab	69,19 Ba	80,19 Aa	23,10 Cb	
m %	Franco-arenoso	0,00 Ba	0,00 Ba	0,00 Ba	0,00 Ba	18,98 Ab	37,95
	Argiloso	0,00 Ba	0,00 Ba	0,00 Ba	0,00 Ba	44,23 Aa	

T1: Dose de 100% biossólido calcado, T2: Dose de 100% biossólido calcado + NPK, T3: Dose de 50% biossólido calcado + 50% NPK, T4: Dose de 100% NPK + Calagem, T5: Testemunha. Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste Skott-Knott a 5% de probabilidade. V=saturação por bases, m=saturação por alumínio.

Para a saturação de bases, T1 e T4 apresentam valores superiores aos demais tratamentos em solo franco-arenoso e T3 o menor valor em solo argiloso, não ocorrendo diferença significativa entre o restante. Já para saturação por alumínio, T5 apresentou as maiores porcentagens nos dois tipos de solo, sendo inexistente nos restantes dos tratamentos. Comparando o solo dentro de tratamento, destaca-se o franco-arenoso em saturação de bases, não ocorrendo diferença significativa apenas em T3 e T4 (Tabela 28).

Para o solo franco-arenoso, o maior teor de Ca foi para T4, seguido de T1, T2 e T3, onde o mesmo ocorreu em solo argiloso, porém não havendo diferença significativa entre T1 e T2. Para Mg, os maiores teores em solo franco-arenoso estão em T1 e T2, seguidos de T3 e T4, em solo argiloso o maior valor foi encontrado em T1, não ocorrendo diferença significativa entre T2 e T3. Para K, os maiores valores estão em T5 nos dois tipos de solo, e não houve diferença significativa entre o restante dos tratamentos, somente em T4 com menor teor em solo franco-arenoso (Tabela 29).

Entre os solos, o argiloso se destaca em T1-T4 nos teores de Ca, o solo franco-arenoso se destaca em T1-T4 nos teores de K e não há diferença significativa entre T2, T4 e T5 para Mg e T5 para K.

Quanto a P, em solo franco-arenoso T1 apresentou valores superiores aos demais, seguido de T2 e não ocorrendo diferença significativa entre o restante, já para solo argiloso, T2 apresentou o maior valor, seguido de T1 e T3, não ocorrendo diferença entre T4 e T5. Para Prem, não ocorreu diferença no solo franco-arenoso entre T3 e T5, sendo estes os maiores

valores, e nem entre T1, T2 e T4. Já para argiloso, não houve diferença significativa entre nenhum dos tratamentos. Entre os solos, para P e Prem, o franco-arenoso apresentou maiores teores dentre todos os tratamentos (Tabela 29).

Tabela 29. Teores de macronutrientes, sódio e carbono orgânico total do solo da aveia preta ao fim dos 67 dias após a semeadura.

Parâmetro	Solo	Tratamentos					CV %
		T1	T2	T3	T4	T5	
Ca (cmolc.dm ⁻³)	Franco-arenoso	5,06 Bb	4,05 Cb	2,87 Db	6,35 Ab	1,44 Ea	10,02
	Argiloso	6,62 Ba	6,22 Ba	3,61 Ca	8,54 Aa	0,73 Db	
Mg (cmolc.dm ⁻³)	Franco-arenoso	2,80 Ab	3,01 Aa	1,73 Bb	0,42 Ca	0,56 Da	21,09
	Argiloso	5,18 Aa	3,18 Ba	3,07 Ba	0,74 Ca	0,78 Ca	
K (cmolc.dm ⁻³)	Franco-arenoso	0,07 Aa	0,07 Aa	0,07 Aa	0,05 Ba	0,08 Aa	16,10
	Argiloso	0,04 Bb	0,05 Bb	0,04 Bb	0,03 Bb	0,08 Aa	
P (mg.dm ⁻³)	Franco-arenoso	27,71 Aa	23,52 Ba	18,24 Ca	17,13 Ca	5,64 Ca	14,88
	Argiloso	9,38 Bb	14,02 Ab	6,33 Cb	3,58 Db	2,62 Db	
P rem (mg.dm ⁻³)	Franco-arenoso	32,1 Ba	32,19 Ba	34,54 Aa	32,13 Ba	33,87 Aa	7,92
	Argiloso	7,84 Ab	9,23 Ab	8,83 Ab	7,86 Ab	7,6 Ab	
N total (g kg ⁻¹)	Franco-arenoso	0,80 Ba	1,25 Aa	1,42 Aa	0,64 Bb	1,32 Aa	14,81
	Argiloso	0,67 Ca	0,70 Cb	0,96 Bb	1,02 Ba	1,25 Aa	
COT (g kg ⁻¹)	Franco-arenoso	16,00 Aa	15,34 Aa	15,4 Aa	14,06 Ba	15,53 Aa	4,74
	Argiloso	14,22 Bb	15,26 Aa	13,39 Cb	12,8 Cb	12,93 Cb	

T1: Dose de 100% biossólido caleado, T2: Dose de 100% biossólido caleado + NPK, T3: Dose de 50% biossólido caleado + 50% NPK, T4: Dose de 100% NPK + Calagem, T5: Testemunha. Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste Skott-Knott a 5% de probabilidade.

Para o nitrogênio, T2, T3 e T5 apresentaram os maiores teores no solo franco-arenoso. Já para o solo argiloso, T5 se destacou com os maiores valores, seguido de T3 e T4 com maiores valores em comparação a T1 e T2. Entre os solos, T2 e T3 apresentaram maiores valores no solo franco-arenoso, enquanto T4 apresentou maiores valores no argiloso (Tabela 29).

Para o COT, T4 apresentou menores teores e não ocorreu diferença significativa entre os demais tratamentos em solo franco-arenoso. Para o argiloso, T2 apresentou os maiores teores, seguido de T1, com os menores valores para T3-T5, que não diferiram entre si. Entre os solos, o franco-arenoso apresentou maiores valores dentre os tratamentos, com exceção de T2, que não diferiu (Tabela 29).

Para os micronutrientes do solo, o maior teor de Mn em solo franco-arenoso apresentou-se em T1, não ocorrendo diferença significativa entre o restante dos tratamentos. Para o argiloso

não ocorreram diferenças significativa entre os tratamentos. Para Fe e Cu, não ocorreram diferenças entre os tratamentos em solo franco-arenoso. Em solo argiloso, Fe apresentou maiores valores em T1-T3, sem diferenças significativas entre eles, e para Cu, T1 se destacou entre os tratamentos com maior valor e T5, com menor valor. Já para Zn, T1 e T2 apresentaram os maiores teores em solo argiloso, e T4 e T5 em solo arenoso. Entre os solos, para Mn, Fe e Cu o franco-arenoso se destacou entre todos os tratamentos com maiores valores, porém para Zn, o argiloso apresentou teores maiores em T1 e T2 e franco-arenoso T4 e T5, não houve diferença entre solos em T3 (Tabela 30).

Tabela 30. Teores de micronutrientes (mg dm^{-3}) do solo aos 67 dias após a semeadura das plantas de aveia preta.

Parâmetro	Solo	Tratamentos					CV %
		T1	T2	T3	T4	T5	
Mn (mg. kg^{-1})	Franco-arenoso	98,25 Aa	90,91 Ba	91,17 Ba	92,44 Ba	90,59 Ba	5,02
	Argiloso	24,50 Ab	24,65 Ab	21,85 Ab	24,03 Ab	27,76 Ab	
Fe (mg. kg^{-1})	Franco-arenoso	373,49 Aa	359,46Aa	372,60Aa	343,51Aa	376,41Aa	5,90
	Argiloso	241,46 Ab	219,4 Ab	227,05Ab	208,78Bb	193,77Bb	
Cu (mg. kg^{-1})	Franco-arenoso	0,80 Ab	0,00 Ab	0,00 Ab	4,66 Ab	4,32 Ab	9,37
	Argiloso	99,50 Aa	98,31 Aa	94,80 Aa	91,09 Ba	86,15 Ba	
Zn (mg. kg^{-1})	Franco-arenoso	0,00 Bb	0,00 Bb	0,00 Bb	22,57 Aa	24,92 Aa	11,14
	Argiloso	36,21 Aa	37,75 Aa	33,63 Ba	32,71 Bb	26,66 Ca	

T1: Dose de 100% biossólido caleado, T2: Dose de 100% biossólido caleado + NPK, T3: Dose de 50% biossólido caleado + 50% NPK, T4: Dose de 100% NPK + Calagem, T5: Testemunha. Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste Skott-Knott a 5% de probabilidade.

Em alguns metais pesados, todos os tratamentos deram abaixo do limite de detecção (LOQ), sendo eles Cd ($< 0,08$), Mo ($< 0,7$), Hg (< 30), Se ($< 2,1$), abrangendo na tabela apenas os que atingiram os analitos que conseguiram ser quantificados pelo equipamento.

Nos teores de Ba, As, Ni, Pb e Cr, o solo argiloso apresentou valores superiores ao franco-arenoso. Para Ni, Pb e Cr, os teores em T1-T3 foram inferiores a T4 e T5 em solo franco-arenoso (Tabela 31).

Para Ba, nenhum dos tratamentos diferiram entre si em franco-arenoso e argiloso, exceto T5 que obteve menor teor em solo argiloso. Também em Cu nenhum tratamento diferiu entre si em solo franco-arenoso, já argiloso os maiores teores foram em T1-T3, não diferindo entre si (Tabela 31).

Para Zn, T1 e T2 foram superiores aos outros tratamentos e não diferiram entre si em solo argiloso. Para As, não houve diferença entre os tratamentos T1-T4, sendo esses superiores

a T5 em solo franco-arenoso, já para argiloso, T1-T3 diferiram entre si e foram inferiores a T4 e T5. Para Ni os maiores teores foram em T3 e T4, sendo esses indiferentes entre si. Para Pb, não houve diferença de tratamentos em solo argiloso (Tabela 31).

Tabela 31. Teores de metais pesados (mg.kg^{-1}) nos solos da aveia preta ao fim dos 67 dias após a semeadura.

Parâmetro	Solo	Tratamentos					CV%
		T1	T2	T3	T4	T5	
Ba (mg kg^{-1})	Franco-arenoso	8,70 Ab	8,31 Ab	10,06 Ab	8,55 Ab	9,83 Ab	6,81
	Argiloso	42,38 Aa	45,15 Aa	43,06 Aa	43,78 Aa	39,95 Ba	
As (mg kg^{-1})	Franco-arenoso	0,84 Ab	0,89 Ab	0,90 Ab	0,96 Ab	0,69 Bb	7,24
	Argiloso	2,00 Ba	2,10 Ba	2,12 Ba	2,23 Aa	2,28 Aa	
Ni (mg kg^{-1})	Franco-arenoso	0,00 Bb	0,00 Bb	0,00 Bb	1,48 Ab	1,33 Ab	8,43
	Argiloso	20,83 Ba	22,44 Aa	21,80 Aa	20,37 Ba	19,91 Ba	
Pb (mg kg^{-1})	Franco-arenoso	15,34 Cb	14,67 Cb	15,31 Cb	21,49 Bb	24,92 Aa	5,96
	Argiloso	24,80 Aa	26,50 Aa	24,98 Aa	25,42 Aa	23,67 Aa	
Cr (mg kg^{-1})	Franco-arenoso	0,00 Bb	0,00 Bb	0,00 Bb	2,96 Ab	2,09 Ab	5,76
	Argiloso	34,20 Ca	38,81 Aa	36,05 Ba	32,56 Da	35,60 Ba	

T1: Dose de 100% biossólido calcado, T2: Dose de 100% biossólido calcado + NPK, T3: Dose de 50% biossólido calcado + 50% NPK, T4: Dose de 100% NPK + Calagem, T5: Testemunha. Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste Skott-Knott a 5% de probabilidade.

7. DISCUSSÃO

7.1. Visão geral

Neste trabalho, investigamos o potencial do biossólido calcado, aplicado de forma isolada ou em combinação com adubação mineral (NPK), em substituir as fontes tradicionais de nutrientes e de correção de acidez do solo. O trabalho traz resultados promissores, demonstrando que a aplicação isolada do biossólido calcado se equivale a calagem e adubação com NPK para corrigir a acidez do solo e disponibilizar nutrientes para a cultura do milho, sem elevar em nível tóxicos os metais pesados no solo (descritos pela CONAMA 420/2008). Esses resultados foram observados para solos com contraste importante na granulometria (franco-arenoso e argiloso).

Diante da gama ampla de variáveis analisadas, variações nas tendências entre os tratamentos foram observadas de acordo com a variável utilizada. De forma geral, percebe-se que a aplicação combinada de biossólido calcado com adubação mineral (T3) também

proporcionou melhorias das condições químicas do solo para o crescimento e desenvolvimento na cultura do milho e da aveia preta. Isso é relevante e demonstra que pode haver flexibilização na adubação com bio sólido calcado. Por exemplo, conforme a disponibilidade e custo deste bio sólido calcado e da adubação solúvel, uma combinação entre ambas pode ser utilizada para garantir máximo ganho econômico. Uma discussão detalhada sobre os mecanismos pelos quais o bio sólido calcado, isolado ou em combinação com adubação solúvel, melhora as condições do solo, é apresentada nos tópicos subsequentes.

7.2. Acidez do solo e desempenho do milho e aveia preta

As plantas do tratamento testemunha (T5), em ambos os solos avaliados, apresentaram desenvolvimento inferior aos demais tratamentos (T1-T4) no momento da coleta, como evidenciado pelo milho (Tabela 16, Figura 6 e 7) (95 dias após a semeadura – DAS) e pela aveia preta (67 DAS) (Tabela 24, Figura 9 e 10).

Enquanto as plantas do milho dos tratamentos T1-T4 encontravam-se em transição de estágio vegetativo para o reprodutivo (Tabela 16), as do T5 tiveram seu crescimento e desenvolvimento (Figuras 10 a 16, anexo) comprometidos devido às condições químicas do solo, como resultado, as plantas desse tratamento apresentaram menor diâmetro do colmo, altura, número de folhas e massa seca aérea e radicular em comparação aos demais tratamentos (Tabela 16, Figura 6 e 7). O mesmo comportamento ocorreu para as plantas da aveia preta, onde no número de perfilhos, altura, massa seca aérea e radicular e índice spad foram menores em T5 (Tabela 24, Figura 9 e 10), devido as condições químicas inapropriadas para o cultivo da aveia preta, baseado nas análises de pH do solo (<5,5), maiores teores de alumínio e acidez potencial, baixa CTC e saturação de bases em comparação aos demais tratamentos (Tabelas 19, 20, 27 e 28). Isso demonstra que a condição controle possibilitou uma análise adequada do potencial real do bio sólido calcado em disponibilizar nutrientes e corrigir a acidez do solo.

A disponibilidade de nutrientes no solo é um fator que afeta diretamente o crescimento e desenvolvimento das plantas. Além disso, a acidez do solo é um fator determinante para o desenvolvimento radicular. A toxicidade do alumínio trivalente (Al^{3+}) em pH <5,5 (Meurer, 2017), por exemplo, impacta diretamente o crescimento das plantas, como evidenciado no tratamento testemunha (T5) (Tabela 19 e 27). Esse tratamento também apresentou os menores valores de massa seca radicular e aérea do milho e aveia preta (Figuras 7, 8, 9 e 10), devido à elevada acidez (Tabela 19 e 27) e aos baixos teores de nutrientes nos solos avaliados (Tabelas 21 e 29), confirmando a influência negativa do pH baixo no desenvolvimento morfológico das culturas estudadas.

No comparativo aos tratamentos, a aplicação de biossólido caleado e calagem se mostrou como uma estratégia de condicionamento químico superior para solos subtropicais, superando as severas limitações biofísicas impostas pelo tratamento testemunha (T5) (Guo et al., 2012; Oliveira et al., 2025).

O uso da calagem em T4 e o biossólido caleado (T1-T3) refletiu sobre a acidez do solo durante o período de incubação e teve como efeito a correção do pH e permitiu o desenvolvimento das plantas de milho e aveia preta (Tabelas 19 e 27), que além de alterar a forma de alumínio trocável, anulou a saturação por alumínio, o que zerou o risco de toxidez na planta.

O efeito corretivo do biossólido caleado sobre o solo atua como um sistema tamponante de liberação gradual, perante o tratamento de higienização do lodo de esgoto com a cal virgem. Ao entrar em contato com a solução do solo, as bases fortes associadas ao resíduo (especialmente o Ca(OH)_2 , resultante da higienização) promovem a hidrólise e consequente elevação do pH, deslocando o equilíbrio químico para a precipitação do alumínio trocável na forma de hidróxidos insolúveis, como a gibbsita (Al(OH)_3). Este mecanismo de detoxificação química corrobora os achados de Guo, Song e Kazda (2012), que identificam o biossólido caleado não apenas como fertilizante, mas como um agente de remediação de solos ácidos com performance equivalente ou superior a calagem (T4).

Os tratamentos com biossólido caleado 100% e NPK + calagem atingiram pH superior ao tratamento com 50% de biossólido caleado, independentemente do solo (Tabelas 19 e 27). No entanto, mesmo com menor dose, este último tratamento foi eficiente, sem diferenças na saturação por alumínio em relação aos demais (Tabelas 20 e 28), indicando condições adequadas para o crescimento e desenvolvimento do milho e da aveia preta.

Esses resultados estão em conformidade com aqueles de Nascimento et al. (2022), que observaram melhorias nas propriedades químicas de um Cambissolo Háplico no cultivo de mamoneira após a aplicação de lodo de esgoto tratado com CaO. No experimento, que utilizou $33,61 \text{ t ha}^{-1}$ de lodo de esgoto o pH inicial de 5,6 foi elevado promoveu aumento de pH de 5,8 para 7,53 (camada de 0-20cm) e 5,5 para 6,38 (camada de 20-40cm), além da redução da acidez potencial teve aumento da saturação por bases. Resultados semelhantes foram obtidos por Barbosa et al. (2017) com a adição de biossólido alcalinizado. Contudo, as condições experimentais (solo, clima, planta, características do lodo) específicas nos diferentes estudos limitam uma comparação mais detalhada, especialmente no que se refere à dose recomendada. Isso justifica a necessidade de experimentação específica para diferentes locais.

A acidez potencial evidenciou maior poder tampão em solo argiloso na cultura do milho (Tabela 19). Viçosi e Oliveira (2024) relataram que solos argilosos apresentam maior resistência a variações de pH em comparação aos franco-arenosos, influenciando a reatividade do corretivo. Em sete dias, esses autores observaram que uma dose de 5 t ha⁻¹ de biossólido calcado elevou o pH do solo franco-arenoso de 6,39 para 7,35, alcançando 7,6 ao final do experimento. Para o solo argiloso, por outro lado, foi necessária uma dose de 80 t ha⁻¹ para atingir pH 8, reduzindo para 7,4 após 90 dias de incubação.

Por outro lado, no experimento da aveia preta, a mudança de pH foi menos expressiva no solo argiloso e franco-arenoso (Tabela 27). No solo argiloso (T3 e T5), a maior densidade de cargas negativas permanentes e a presença de óxidos de Fe e Al conferem uma resistência superior à neutralização da acidez potencial, o que era de se esperar de acordo com o percentual da dosagem (50%), entretanto, isso não interferiu no desenvolvimento radicular e aéreo da aveia preta que levou este tratamento (Figuras 9 e 10), quando comparada aos tratamentos que receberam 100% das doses, mostrando a eficiência na utilização da metade da dosagem (Tabela 27). A matéria orgânica (MO) do biossólido, rica em grupos funcionais carboxílicos e fenólicos, atua via complexação de esfera interna, sequestrando o Al³⁺ remanescente em quelatos orgânicos estáveis (Conte et al., 2017; Lin et al., 2024). Isso reduz a atividade do alumínio na solução, permitindo um desenvolvimento radicular pleno mesmo em condições de neutralização parcial da acidez.

No trabalho de Matos e Matos (2012), resultados semelhantes trouxeram melhoria para as propriedades químicas em diferentes solos argilosos em pH inicial de 4,61; 4,53; 5,38, quando aplicado doses de 16,24; 19,27 e 12,64 t ha⁻¹, respectivamente de biossólido calcado, elevaram o pH até 6,5. Em outro estudo utilizando 2 e 4 kg de biossólido calcado em Latossolo Vermelho-Amarelo, teve como resultado na diminuição do pH de 6,10 para 6,06 e 5,97 nas duas doses, respectivamente, porém dentro dos teores aceitáveis para a permanência dos macros e micronutrientes no solo (Coelho et al., 2018).

O aumento de pH pode ser comprovado por Conte et al. (2017) ao adicionar as doses 0, 15, 30, 45 e 60 t ha⁻¹ de biossólido em Latossolo Vermelho Eutroférico (pH= 5,7) e Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico (pH=4,7), tendo os valores máximo na dose de 60 t ha⁻¹ (4,9 e 6,2, respectivamente). Um estudo no estado de Delaware-EUA, atingiu valores semelhantes de pH em biossólido calcado e no solo, encontrados nesse experimento. Guo, Song e Kazda (2012) relataram que em solo franco-arenoso (pH=5,3), após a adição de 4 e 12,5 g kg⁻¹ de biossólido calcado (pH= 9,9), atingiu pH de 6,3 e 7,1, após 3 meses de incubação,

afirmado após resultados de acidez do solo e nutrientes, que o biofóssido caleado é um multinutriente e um substituto eficaz da calagem no solo.

Assim, a textura do solo deve ser considerada na recomendação de doses de biofóssido caleado nas duas culturas. Importante ressaltar, porém, que variações na mineralogia do solo provavelmente impactam na dose de biofóssido caleado para corrigir a acidez.

7.3. Dinâmica de Disponibilidade e Absorção de Nutrientes

A absorção de nutrientes pelo milho e aveia preta foram governadas pela interação entre o efeito corretivo dos tratamentos, além dos nutrientes presentes na MO do biofóssido caleado e a adição de NPK nos tratamentos (Tabelas 17, 24, 25). De maneira geral, as plantas responderam às alterações na solução do solo promovidas pelos tratamentos e pela neutralização da acidez, fatores que ditaram a disponibilidade de macro e micronutrientes.

No tratamento T5, apesar do pH mais ácido ter afetado a absorção de alguns nutrientes, é possível observar maiores concentrações de N e P (milho) e N, K e S (aveia preta). Contudo, essa superioridade não reflete uma maior disponibilidade nutricional, mas sim o efeito de concentração. Devido às severas limitações impostas pela acidez e toxicidade de Al^{3+} , as plantas de T5 apresentaram baixo desempenho no crescimento; assim, a pequena quantidade de nutrientes absorvida não foi diluída em uma biomassa expressiva. No caso do nitrogênio, pode ter ocorrido rápida mineralização e absorção do N já presente no solo (Barrow e Hartemink, 2023), acumulando-se em tecidos atrofiados.

Para milho, a combinação de biofóssido caleado 100%+ NPK resultou nos maiores teores no tecido foliar em solo argiloso (Tabela 25), evidenciando que pode ter ocorrido rápida absorção radicular do N mineral adicionado, evidenciando o aumento de massa seca (Figura 7 e 8) e posteriormente, a maior concentração no solo de N possa estar ligada pela presença na MO do biofóssido caleado. Em T1 do mesmo solo, o pH combinado com maior teor de carbono orgânico total (COT) (Tabela 21) resultou em uma relação C/N mais alta e retenção de N para absorção posterior. No entanto, o aumento da atividade microbiana na nitrificação do amônio pode ter levado à lixiviação de N, devido ao maior teor na solução do solo (Tiecher et al., 2023). Giannopoulos et al. (2025) relataram que a incubação de solo franco (pH 5,0) com biofóssido caleado aumentou a disponibilidade de N ao longo do tempo, comprovando o aumento das taxas de mineralização e elevação do pH para 6,6.

Na aveia preta em solo franco-arenoso os maiores teores de N no solo que ocorreram na combinação de biofóssido caleado + NPK (Tabela 29) indicam a integração de fontes orgânicas e minerais otimiza a sincronia entre a liberação do nutriente e a demanda da cultura,

resultando em maior acúmulo de massa seca (Figura 9 e 10). Embora a maior parte do nitrogênio no bio sólido permaneça em formas orgânicas, a caleação preserva teores significativos de N-total, permitindo uma mineralização que acompanha a demanda da cultura, diferenciando-se de processos como a compostagem ou secagem térmica (Le; Price, 2024).

A disponibilidade de fósforo (P) está diretamente relacionada à acidez do solo, pois a presença de Al^{3+} pode reduzir sua disponibilidade. Com o aumento do pH, hidroxilas (OH^-) competem com o fosfato pelos sítios de adsorção do Al, liberando P da fase sólida para a solução do solo, tornando-o mais disponível para as plantas (Tiecher et al., 2023).

No experimento com milho, o maior teor de P no solo observado no T2, para ambos os solos, e no T1, no solo franco-arenoso (Tabela 21), e para aveia preta maiores concentrações em T1 e T2 para solo franco-arenoso (Tabela 29), se deve à maior quantidade de P presente no bio sólido caleado (Tabela 10). O tratamento com cal demonstrou eficiência na liberação de P, quebrando ligações com cátions metálicos (Kopp et al., 2024), e influenciando positivamente essa dinâmica ao promover a precipitação de compostos de cálcio-fosfato (Ca-P), reduzindo a solubilidade imediata e o risco de perdas ambientais por lixiviação (Freitas et al., 2026).

O decaimento do teor de P nos dois solos em T2 para T3 nas duas culturas (Tabela 17 e 29), fica evidente que ao reduzir a dosagem na metade, a concentração no solo diminui, porém, essa diferença não afeta a concentração na planta do milho (Tabela 17). Na diferença entre solos, é evidente maiores concentrações de P em solo franco-arenoso para as duas culturas (Tabela 21 e 29), ficando claro que a textura influencia na retenção de fósforo.

Ylivainio et al. (2021) relataram que a aplicação de 150 mg kg^{-1} de bio sólido estabilizado com cal virgem em um solo franco-arenoso ácido (pH 5,8) elevou a disponibilidade de P em 43%, com pH final de 6,3, possivelmente devido à conversão de P-Fe em fosfato de cálcio, uma forma mais solúvel.

O aumento de P extraível no lodo de esgoto após a adição de $Ca(OH)_2$, também foi observado por Kopp et al. (2024), porém baixa absorção pelas plantas em solo franco-arenoso com pH já adequado para o milho (6,6). O aporte de MO via bio sólido pode elevar os teores de P na forma orgânica, liberando-o gradualmente ao longo do tempo, além de poder favorecer a retenção do P mineral proveniente do NPK (T2-T3) (Raniero et al., 2022). Isso se deve ao fato de o bio sólido aumentar significativamente as frações de P lábil e moderadamente lábil no solo, garantindo uma oferta contínua do nutriente para as culturas ao longo do ciclo (Yuan et al., 2025).

Estudos de longa duração (Desjardins et al., 2025; Donald et al., 2025) confirmam que o bio sólido caleado é uma fonte de P de alta eficiência, capaz de elevar os teores no solo de

forma sustentável, com taxas de permanência do nutriente superiores a 70% ao longo de décadas. Em solos franco-arenosos, essa eficiência é potencializada pela menor superfície específica, reduzindo a fixação mineral e favorecendo a absorção radicular.

A disponibilidade de potássio (K) está relacionada à capacidade de troca de cátions (CTC) do solo, especialmente à CTC da matéria orgânica, que é dependente do pH. À medida que o pH aumenta, mais cargas negativas são geradas, promovendo a adsorção de K nos sítios de troca do solo (Tiecher et al., 2023).

Nos experimentos, a disponibilidade K seguiu padrões distintos conforme a textura. A aplicação de biossólido aumentou a CTC e a saturação por bases em relação a T5 (tabela 20 e 28). Esse efeito decorre da elevação do pH e do aumento da matéria orgânica, que introduz grupos funcionais e superfícies carregadas negativamente, favorecendo a retenção de cátions essenciais como K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} (Goldan et al., 2022). Resultados semelhantes foram observados por Araújo et al. (2022), que destacaram o incremento da CTC efetiva com o uso de biossólido.

Em solo franco-arenoso, os tratamentos que levaram biossólido caleado e NPK tiveram as maiores concentrações no tecido foliar do milho (Tabela 17). Esse efeito pode estar relacionado à baixa CTC do solo franco-arenoso tendo menor retenção nesse nutriente (Tabela 20), deixando o K disponível na solução do solo e tendo absorção radicular mais fácil e rápida, além do KCl que foi adicionado aos tratamentos promovendo também uma disponibilidade imediata. Estudos de Neves, Ernani e Simonete (2009) afirmam o aumento de K em função das doses de KCl em solos franco-arenosos com pouca matéria orgânica. A maior concentração no tecido do milho observada em T1 nos dois solos (Tabela 17) sugere que a MO do biossólido caleado atua como um reservatório de liberação gradual. Esse comportamento justifica os resultados para T1 em solo franco-arenoso na concentração do tecido foliar da aveia preta (Tabela 26), onde no experimento dessa cultura mesmo que nos outros tratamentos que foram adicionadas concentrações de KCl para complementação junto ao biossólido caleado, nesse solo isso não refletiu na disponibilidade para a planta, provavelmente devido a absorção do K mineral a pelos colóides da matéria orgânica (Tiecher et al., 2023).

Já em solo argiloso, a concentração de K no tecido foliar da aveia preta foi mais expressiva (Tabela 25), já que possui por natureza maior CTC (Tabela 28). Estudos de Coelho et al. (2018) relataram aumento na concentração K no solo conforme o aumento da CTC na adição de biossólido em Latossolo Vermelho-Amarelo. O aumento predomina também nos tratamentos T4, biossólido caleado 100% + NPK e biossólido caleado 50% + NPK, em que esses resultados corroboram com o estudo de Batista et al., 2018.

É comum que condicionadores de acidez contenham grandes quantidades de cálcio (Ca) e magnésio (Mg). Quando corretivos como calcário dolomítico [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$], carbonato de cálcio (CaCO_3) ou cal virgem (CaO) são aplicados ao solo, os íons Ca^{2+} e Mg^{2+} substituem o alumínio (Al^{3+}) nos sítios de adsorção, formando compostos insolúveis com hidroxilas (OH^-) e reduzindo sua toxicidade (Li et al., 2020). Assim, o aumento do pH nos dois solos em milho e aveia preta (Tabela 19 e 27) favoreceu o aumento de Ca e Mg (Tabela 21 e 29) e minimizou o efeito tóxico do alumínio (Tabela 19 e 27). Enquanto o calcário convencional muitas vezes apresenta baixa solubilidade e lenta translocação no perfil, a fração orgânica solúvel do bio sólido pode carregar íons Ca^{2+} e Mg^{2+} para camadas mais profundas, facilitando a correção e proporcionando maior desenvolvimento radicular (Lin et al., 2024; Oliveira et al., 2025).

Para o Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg), o bio sólido calcado demonstrou ser uma fonte equivalente ou superior à calagem + NPK (T4) (Tabela 21 e 29). Devido à higienização química do bio sólido com cal virgem (CaO), todos os tratamentos com bio sólido calcado corrigiram a acidez e disponibilizaram esses nutrientes para o solo, entretanto, a maior concentração de cálcio em solo argiloso tanto no milho quanto na aveia preta ocorreu em T4 (Tabela 21 e 29) notado também das plantas (Tabela 17 e 25), o que já se esperava devido a adição do carbonato de cálcio.

Matos e Matos (2012) e Nascimento et al. (2022) demonstram a amplitude vertical da correção do pH atingindo camadas subsuperficiais. Ainda assim, os tratamentos com bio sólido calcado demonstraram resultados superiores a T5 independente do solo e da cultura, maior disponibilidade em solo argiloso, devido à sua maior CTC saturação por bases (V%), o que proporcionou também em relação ao aumento do teor de Mg nos solos do milho e da aveia preta no comparativo T1-T3 e T5 (Tabela 21 e 29), além do bio sólido calcado apresentar grandes quantidades de Mg na matéria orgânica (Tabela 21 e 29).

Micronutrientes como ferro (Fe), cobre (Cu), zinco (Zn) e manganês (Mn) são fortemente influenciados pelo pH do solo; a disponibilidade diminui com o aumento do pH (Malavolta, 1980). Em T5, a acidez extrema manteve esses cátions metálicos em formas altamente solúveis, resultando em elevadas concentrações no tecido das culturas (Tabela 18 e 22), e potencialmente fitotóxicas. Com a correção do solo (T1-T4), ocorreu a precipitação desses metais na forma de hidróxidos ou sua complexação estável pela MO, reduzindo a biodisponibilidade para níveis seguros.

No comportamento de Cu nos dois experimentos, foi observado pouca variação no pH entre T1 e T4 nos dois solos, resultado que representado em solo franco-arenoso (Tabela 30 e 22). Tziachris et al. (2016) relataram que a aplicação de bio sólido calcado elevou o pH do solo

de 5,0 para 6,8 em um ano, reduzindo os teores de metais pesados, com exceção do Zn. Esse efeito foi atribuído à adsorção e precipitação de metais nas frações inorgânicas do solo, bem como à maior sorção devido à adição de cal ao lodo de esgoto.

No caso específico do Cu no tecido foliar da aveia preta em solo argiloso, a adição de NPK no biofóssido calcado 100% (T2) sugere que ocorreu substituição iônica, onde os íons de K^{2+} pode ter deslocado o Cu^{2+} dos colóides de argila para a solução, favorecendo a absorção pela planta em relação ao biofóssido calcado 100% (T1). Para Mn, foi demonstrado maiores concentrações em solo franco-arenoso e menores na planta, o contrário ocorreu em solo argiloso devido maior CTC. Esse efeito reforça a necessidade de considerar a textura do solo, principalmente na interação entre fontes orgânicas e minerais no manejo da fertilidade (Batista et al., 2018).

7.4. Metais pesados

No uso agrícola do biofóssido é primordial a segurança ecotoxicológica quanto aos teores de metais pesados. Neste estudo, constatou-se que o resíduo, mesmo antes do processo calcado, as concentrações dos metais pesados já apresentavam valores significativamente inferiores aos limites máximos estabelecidos pela Resolução CONAMA 498/2020, reduzindo os riscos de bioacumulação em planta, porém estudos recentes indicam evolução quanto segurança na aplicação de biofóssidos para o monitoramento de contaminantes emergentes, para que não afete a saúde de solo e planta por resíduos químicos complexos não detectados em análises convencionais (Shukla et al., 2025).

De maneira geral, todos os metais pesados nas duas culturas, ficaram abaixo da Conama 420/2009, fica com exceção de Cu em T5 no solo argiloso no experimento do milho (Tabela 23). Dentre metais analisados, Mo, Mg e Se não atingiram o limite de quantificação nas determinações em cada tratamento, sendo assim, a discussão se concentrou a apenas Ba, Cu, Zn, As, Ci, Pb e Cr.

A adição de biofóssido calcado melhorou as características químicas dos solos avaliados, tanto na dose de 100% quanto na de 50%. É importante destacar que naturalmente os metais pesados ou “elementos-traço potencialmente tóxicos” são encontrados nos solos, dependendo do tipo de material de origem e do processo de formação da originários da rocha, mesmo que em baixas concentrações (Fadigas et. Al, 2002). Os teores de metais encontrados no solo (Tabela 23 e 31) ficaram abaixo dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA

420/2009 (mg kg⁻¹): Cu (60), Cd (3), Cr (150), Ni (70), Pb (180) e Zn (300), garantindo que o uso do bioossólido calcado não representa risco ambiental.

Apesar do mercúrio ter ultrapassado valores máximos permitidos de substâncias químicas no bioossólido (Tabela 10), nos experimentos não foi detectado nos solos dos tratamentos que envolveram bioossólido calcado. Esse efeito pode ter ocorrido a partir de do tratamento alcalino que imobilizou parte desse metal, além da secagem do produto e tratamento térmico a 65°C, onde o Hg possa ter volatilizado (sendo ele altamente volátil), efeito possa ter ocorrido a partir da metodologia analisada e do equipamento.

Percebe-se uma tendência nos dois experimentos sobre a concentração de alguns metais pesados sobre a diferença de concentração dos metais entre solos maior parte dos tratamentos (Tabela 23 e 31). No solo argiloso, a presença de minerais de argila e óxidos reforça a imobilização dos metais em comparação ao solo franco-arenoso, entretanto, mesmo em condições de maior lixiviação potencial (solo franco-arenoso), a mudança no pH e o incremento no teor de carbono no solo através do bioossólido calcado promoveram a adição de grupos carboxila (COOH⁻) e hidroxila (OH⁻), facilitando a complexação dos metais (Fu et al., 2023), onde foram suficientes para impedir a translocação desses elementos para a parte aérea de forma nociva, como a concentração no tecido da planta de Zn e Pb (milho e aveia preta) e Ni, e Cr (aveia preta) inferior a T5 (tabela 31). Resultados semelhantes foram encontrados nos estudos de Freitag et al. (2010) em cultivos de aveia preta.

Esse efeito está relacionado à formação de cargas negativas e ao aumento da área superficial específica do solo, que neutraliza e retém esses elementos (Öborn, Jansson e Johnsson, 1995; Silveira et al., 2003).

Resultados semelhantes foram encontrados por Alves et al. (2021) em um experimento com aplicação de até 30 t.ha⁻¹ de lodo de esgoto em Nitossolo cultivado com girassol, onde não foram observadas alterações nos teores de Ni, Pb, Cd, Cr, Zn, Cu e Na no solo. Esse comportamento é validado também por Campos (2017), que demonstrou que a maior parte dos metais contidos no bioossólido permanece retida na camada superficial (0-25 cm) devido à barreira química criada pela elevação do pH.

Embora o bioossólido possa elevar as concentrações totais de As, Cd, Cu, Ni, Pb e Zn no solo, em curto prazo os valores tendem a não exceder os padrões de qualidade legislados para solos agrícolas tropicais. Um ponto relevante é a interação com fertilizantes minerais. Embora a mistura de bioossólido com NPK possa, em teoria, aumentar a lixiviação de metais devido à competição iônica nos sítios de troca (Campos, 2017), os resultados deste experimento indicam que o efeito corretivo da calcinação prevalece sobre essa mobilização. Além disso, evidências de

estudos de longa duração reforçam que aplicações sucessivas de bio sólido ao longo de 14 anos não resultam em acúmulo persistente ou perigoso no perfil do solo, desde que o manejo do pH seja mantido em níveis adequados (Donald et al., 2025).

Por outro lado, o bio sólido calcado possui teores elevados de sódio (Na), o que pode ser prejudicial do ponto de vista agrícola e ecológico. O acúmulo de sais na solução do solo, por exemplo, pode afetar a germinação e o desenvolvimento inicial das plantas (Conus et al., 2009), especialmente por dificultar a absorção de água pelas plantas. No entanto, devido às concentrações mais elevadas de Ca, Mg e K no lodo em comparação aos solos utilizados, o impacto negativo do Na foi diluído, não comprometendo o crescimento e desenvolvimento do milho (Malavolta, 1997). Além disso, o lodo apresenta teores relativamente elevados de carbono orgânico total (COT) e fósforo (P) em relação aos solos (Tabela 9), o que beneficia o crescimento e desenvolvimento das plantas.

Além da segurança química, a aplicação de resíduos orgânicos higienizados em solos de textura franco-arenosa apresenta baixo risco de contaminação por patógenos (como *E. coli*), uma vez que o processo de tratamento (caleação ou compostagem) garante a estabilidade sanitária necessária para o uso agrícola seguro (Boness et al., 2026).

7.5. Estudos subsequentes

Este trabalho estabelece uma base pioneira na avaliação do bio sólido calcado como substituto estratégico para fontes tradicionais de nutrientes e corretivos de acidez em solos subtropicais. Contudo, os resultados aqui apresentados são circunscritos às condições controladas de cultivo em vasos e limitados a um único ciclo fenológico. Diante disso, a continuidade desta pesquisa é essencial em condições de campo, focando especialmente na avaliação do impacto residual das fontes orgânicas em cultivos sucessivos. Essa abordagem permitirá determinar a periodicidade ideal de aplicação para manter a estabilidade produtiva e o vigor vegetativo das culturas de interesse econômico.

O aprofundamento da interação da caleação com os metais pesados em análises mais, mais detalhadas podem servir como base para uma recomendação futura e uma revisão de valores máximos permitidos em bio sólido pela CONAMA 498/2020, além de avaliar um o monitoramento de longo prazo para validar a segurança ambiental quanto ao acúmulo de metais pesados e para quantificar as melhorias incrementais nas propriedades físicas e biológicas do solo. Importante avaliar também a interação entre bio sólido e microrganismos do solo, principalmente na rizosfera das culturas estudadas, trazendo uma possibilidade futura não apenas um produto corretivo, mas também como um potencial fertilizante.

Em paralelo, sob a visão da economia circular e financeira, estudos futuros podem incorporar a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) e Avaliação do Custo do Ciclo de Vida (ACCV) para mensurar impactos ambientais e financeiros para tomada de decisão de futuros investimentos sobre o bio sólido na agricultura.

8. CONCLUSÕES

De maneira geral, o bio sólido calcado conseguiu alcançar resultados satisfatórios após tratamento do lodo de esgoto, classificando o produto em Classe A da Conama 498/2020, o que possibilitou a aplicação nas culturas mais exigentes. Esse estudo reforçou a eficiência da recomendação através do poder de neutralização deste produto pela mesma resolução, atingindo o objetivo principal do experimento em corrigir a acidez do solo. Reforçou também o efeito do tratamento alcalino no lodo de esgoto e a influência da textura de solo sobre a disponibilidade de metais pesados, não ultrapassando os valores de prevenção e investigação em solo (Conama 420/2009), não apresentando risco ambiental, sendo assim, não há preferência de recomendação sobre a aplicação entre os tratamentos de bio sólido calcado quanto a esse critério.

O bio sólido calcado foi eficiente como corretivo de acidez do solo e fornecedor de nutrientes para o cultivo de milho e aveia preta em solos de textura franco-arenosa e argilosa de baixa fertilidade natural, que neutralizou alumínio trivalente do solo e aumentou o pH, em contraste do tratamento testemunha em que teve seu desenvolvimento limitado. Assim, recomenda-se o uso desse produto em solos ácidos (<5,5). Como o pH dos solos permaneceu estabilizado após fim dos experimentos, não é recomendado a reaplicação em solo para posteriores cultivos, até que ocorram variações na acidez do solo e necessite de uma reaplicação para correção de pH para o desenvolvimento das culturas desejadas. Para a reaplicação de bio sólido calcado com NPK, avaliar além do pH, o nutriente limitante no solo para o uso das doses, assim evitando potenciais riscos de contaminação do lençol freático.

A aplicação de bio sólido em condições de casa de vegetação demonstrou potencial agrônomo consistente, promovendo melhorias nas propriedades químicas do solo e no desenvolvimento das culturas avaliadas. De modo geral, o material atuou simultaneamente como fonte de nutrientes e agente corretivo, evidenciado pelo aumento da disponibilidade nutricional e pelas respostas positivas no crescimento vegetal. A aplicação em escala de vasos trouxe resultados satisfatórios que indicaram o aumento de massa seca aérea e radicular nos tratamentos que envolveram bio sólido calcado a partir das doses para correção da acidez do solo. Quanto ao desenvolvimento das plantas, os tratamentos com bio sólido calcado

apresentaram valores iguais ou superiores ao tratamento NPK+ calagem nos dois solos para aveia preta e superiores a testemunha, já no cultivo do milho, em solo franco-arenoso o tratamento 100% biofósforo calcado+ NPK foi superior a todos os outros tratamentos, e em solo argiloso, os tratamentos 100% biofósforo calcado + NPK e 50% biofósforo calcado+ NPK foram iguais ou superiores ao NPK+ calagem. Portanto, na cultura do milho, recomenda-se o uso de 100% biofósforo calcado + NPK em solo franco arenoso e argiloso esse tratamento ou metade da sua dosagem. Já para a cultura da aveia, a aplicação de biofósforo calcado com e sem o complemento de NPK não difere no desenvolvimento da planta no solo franco arenoso e argiloso, portanto, não há preferência de recomendação.

Assim, conclui-se que o biofósforo constitui alternativa viável para corrigir a acidez do solo e fornecer nutrientes, com potencial para reduzir a dependência de insumos minerais e contribuir para sistemas produtivos mais sustentáveis. Recomenda-se, entretanto, que a definição de doses considere as exigências específicas de cada cultura e que estudos em condições de campo sejam realizados para validar os resultados em escala agrícola e em diferentes ambientes de cultivo.

9. REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2004
- AFÁZ, D., C., S.; BERTOLAZI, K., B.; VIANI, R., A., G.; SOUZA, C., F. Composto de lodo de esgoto para o cultivo inicial de eucalipto. **Revista Ambiente e Água**. Taubaté, 2017.
- ANJOS, A., R., M. **Lixiviação de espécies químicas em latossolo sucessivamente tratados com biossólido e disponibilidade de metais pesados para plantas de milho**. Universidade de São Paulo. Piracicaba, 1999.
- ANJOS, A., R., M.; MATTIAZZO, M., E. Lixiviação de íons inorgânicos em solos repetidamente tratados com biossólido. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, 2000.
- ANJOS, A., R., M.; MATTIAZZO, M., E. Metais pesados em plantas de milho cultivadas em latossolos repetidamente tratados com biossólido. **Revista Ciência Agrícola**, 2000.
- ALCÂNTARA, R., L. **Biossólido como fonte de nutrientes para o algodão herbáceo e seu efeito residual no milho**. Universidade Federal de Campina Grande Campina Grande, 2003.
- ALCÂNTARA, Rosa Maria Cardoso Mota. Embrapa Meio-Norte Contando Ciência na Web O que faz uma planta crescer sadia? Disponível em: <https://www.embrapa.br/contando-ciencia/cultivos/-/asset_publisher/SQBdWkKUgS0N/content/os-alimentos-das-plantas/1355746?inheritRedirect=false> Acessado em: 17/06/2023
- ALONSO, J., M. **Caracterização de Biossólidos para a Produção de Mudanças de Espécies Arbóreas da Mata Atlântica**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Seropédica, 2018.
- ANDREOLI, C. V.; SPERLING, M. V.; FERNANDE, F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. 2ª ed. Belo Horizonte, 2014.
- BARBOSA, G., M., C.; FILHO, J., T. **Uso agrícola do lodo de esgoto: influência nas propriedades químicas e físicas do solo, produtividade e recuperação de áreas degradadas**. Seminário: Ciências Agrárias. Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2006.
- BATISTA, M., A.; INOUE, T., T.; NETO, M., E.; MUNIZ, A., S. Princípios de fertilidade do solo, adubação e nutrição mineral In: BRANDÃO FILHO, J.,U.,T., FREITAS, P.,S.,L., BERIAN, L.O.S., and GOTO, R., comps. Hortaliças-fruto [online]. Maringá, 2018.
- BETEMPS, Cristiane. Lodo de esgoto é ótimo componente de substratos para plantas. Embrapa, 2018. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/32485890/lodo-de-esgoto-e-otimo-componente-de-substratos-para-plantas#:~:text=Esse%20lodo%20%C3%A9%20rico%20em,se%20n%C3%A3o%20for%20esinfetado%20corretamente>>. Acesso em: 26/07/2023.
- BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. **A Disposição de Lodo de Esgoto em Solo Agrícola**. Embrapa Meio Ambiente. Jaguariúna, 2006.

BITTENCOURT, S.; ANDREOLI, C., V.; MOCHIDA, G., A.; SOUZA, L., M., K. M. **Uso de lodo de esgoto na agricultura: Um estudo de caso de sua destinação na Região Metropolitana de Curitiba, Paraná, Brasil.** Poluição da Água, do Ar e do Solo, 2014.

BONESS, J.-O.; KAUTZ, T.; KROSCHEWSKI, B.; HOFFMANN-BAHNSEN, R. Does human excreta fertilization increase pathogen contamination in sandy soils? **Waste Management**, v. 212, p. 115314, 2026.

BRADY, N.C; WEIL, R.R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos.** 3. ed. Porto Alegre, 2013.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.** Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Resolução CONAMA Nº 430 de 13 de maio de 2011. **Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005.** Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2011.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução Nº 498, de 19 de agosto de 2020. **Revoga as Resoluções nºs 375/2006 e 380/2006, define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, e dá outras providências.** Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2011.

BREMM, R., R., R. **Potencial do lodo de esgoto calado como insumo agrícola para a cultura do milho em latossolo vermelho.** Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, 2005.

BRINGHENTI, J., R.; BOSCOV, M., E., G.; PIVELI, R., P.; GÜNTHER, W., M., R. **Codisposição de lodos de tratamento de esgotos em aterros sanitários brasileiros: aspectos técnicos e critérios mínimos de aplicação.** Engenharia Sanitária e Ambiental. São Paulo, 2018.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Resolução CONAMA Nº 420 de 13 de dezembro de 2009. **Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas.**

BRASIL. Ministério da Saúde. **Doenças Infecciosas e Parasitárias: Guia de Bolso.** Secretaria de Vigilância em Saúde, Departamento de Vigilância Epidemiológica. 8ª ed. Brasília, 2010.

CAMARGO, R.; MALDONADO, A., C., D.; DIAS, P., A., S.; SOUZA, M., F.; & FRANÇA, M., S. Diagnose foliar em mudas de pinhão-manso (*Jatropha Curcas L.*) produzidas com biossólido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 2013.

CAMPOS, T.; O. **Lixiviação de metais pesados e macronutrientes em solos condicionados com biossólido de lodo de esgoto.** Universidade Federal Rural Do Rio De Janeiro. Seropédica, 2017.

CAZANOVA, R., C. **Potencial de utilização de potássio oriundo de esgotos domésticos de edificações residenciais e comerciais de grande porte como produto comercializável.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2021.

CHAGAS, J., K., M.; FIGUEIREDO., C., C.; PAZ-FERREIRO. J. Sewage sludge biochars effects on corn response and nutrition and on soil properties in a 5-yr field experiment. **Revista Geoderma**, 2021.

CHIAVELLI, H., G., R.; ARTHUR RIBEIRO TORRECILHAS, A., R.; SELLA, M., R.; CARDOSO, M., A., P.; MARTIN, D., R. **Etapas de um sistema de tratamento de efluente e processos convencionais de tratamento: uma revisão de literatura.** IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção. Ponta Grossa, 2019

CHENG, H.; XU, W.; LIU, J.; ZHAO, Q.; HE. Y.; CHENG, G. Application of composted sawwage sludge as a soil amendment for turfgrass growth. **Journal Ecological Engineering**, 2007.

CLIMATE-DATA. Clima Florianópolis, 2023. Disponível em: < <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/santa-catarina/florianopolis-1235/> > Acesso em: 12 novembro. 2023.

COELHO, J., V.; COSTA, T., G., A.; IWATA, B., F.; CUNHA, L., M.; SANTOS, J., G., P.; CLEMENTINO, G., E., S. Atributos de qualidade em Latossolo Vermelho-Amarelo sobefeito de diferentes doses de biossólido comparado a adubação mineral e esterco bovino. **Jornal Multi-Ciência**, 2018.

Companhia de Saneamento do Paraná SANEPAR. **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura Programa de Pesquisa em Saneamento Básico.** PROSAB. Curitiba, 1999.

CONTE, A., M.; MARQUES, R., D.; REIS, A., S.; VIECELI, T., H., A. Colunas de lixiviação com solos de texturas arenosa e argilosa e aplicação de biossólidos. **Scientia Agraria Paranaensis**, 2017.

COOPER, A; DEMARCO, J. Composted biosolids amendments for enhanced soil organic carbon and water storage in perennial pastures in Colorado. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 2023.

CORRÊA, J., C.; BÜLL, L., T.; CRUSCIOL, C., A., C.; FERNANDES, D., M.; MATTOS PERES, M., G., M. Aplicação superficial de diferentes fontes de corretivos no crescimento radicular e produtividade da aveia preta. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, 2008.

CORREIA, J., R.; CUNHA, T., J., F. Solos arenosos no brasil: problemas, riscos e opções de uso. **Revista de Política Agrícola**, 1998.

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.

COSTA, A., N.; COSTA, A., F., S.; CAETANO, L., C., S. **Aspectos químicos e físicos da disposição do lodo de ETE no solo**. Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural. Vitória, 2015.

DESJARDINS, M.; IPPOLITO, J. A.; BARY, A. I.; CAPPELLAZZI, S. B.; LIPTZIN, D.; GRIFFIN-LAHUE, D. Aplicações de biossólidos de longo prazo melhoram as principais funções de saúde do solo para sistemas de terras áridas semiáridas. **Science of The Total Environment**, 2025.

DOBERMANN, A. Nutrient use efficiency: measurement and management. *In* International Fertilizer Industry Association. **Fertilizer best management practices**. Paris, 2007.

DO NASCIMENTO, F., M., S. **Aplicação da Técnica PCR para Detecção de Bactérias Potencialmente Patogênicas em um Sistema UASB-Lagoas de Polimento para Tratamento de Esgoto Doméstico**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2008.

DONAGEMMA, G.K.; FREITAS, P.L.D.; BALIEIRO, F.D.; FONTANA, A.; SPERA, S.T.; LUMBRERAS, J.F.; MACEDO, M.C.M. Characterization, agricultural potential, and perspectives for the management of light soils in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 2016.

DONALD, J. B.; HATFIELD, R. G.; ELLIS, R.; OSBORNE, T. Z.; BACON, A. R.; LIN, Y. Fósforo derivado de biossólidos persiste em solos arenosos da Flórida. **Geoderma Regional**, 2025.

ESPINOZA, A., L., F. **Potencial agrônômico de fertilizantes organominerais a partir da compostagem do lodo de esgoto**. Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2023.

Evelise Martins. Solo argiloso: o que muda no seu manejo. Aegro, Porto Alegre, 4 de setembro de 2023. Disponível em: < <https://blog.aegro.com.br/solo-argiloso/> >. Acesso em: 28/07/2023.

FADIGAS, F., D., S.; DO AMARAL-SOBRINHO, N., M., B.; MAZUR, N.; DOS ANJOS, L., H., C.; ALESSANDRA ALEXANDRE FREIXO, A., A. **Concentrações naturais de metais pesados em algumas classes de solos brasileiros**. **Revista Solos e Irrigação**, 2002.

FIDALSKI, J.; CHAVES, J. C. D. Respostas do cafeeiro (*Coffea arábica* L.) IAPAR-59 à aplicação superficial de resíduos orgânicos em um Latossolo vermelho distrófico típico. **Coffee Science**. Lavras, 2010.

FONTANA, A.; PEREIRA, M., G.; SALTON, J., C.; LOSS, A.; CUNHA, T., J., F. Fósforo remanescente e correlação com as substâncias húmicas em um latossolo vermelho sob diferentes sucessões de cultura em plantio direto. **Revista Brasileira de Agrociência**, 2008.

FREITAG., E., E.; BÜLL., L., T.; CORRÊA, J., C.; BACKES, C.; MIGGIOLARO, A., E.; CRUSCIOL, C., A., C. **Teor de Metais Pesados na Cultura da Aveia Preta em Função da Aplicação Superficial de Resíduos Urbanos e Industriais, no Sistema Plantio Direto**. XXIX Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas. Espírito Santo, 2010.

FREIBERG, Y.; FINE, P.; BORISOVER, M.; LEVKOVITCH, I.; BARAM, S. Biosolids increase phosphate adsorption of semi-arid Mediterranean soils. **Journal of Environmental Management**, 2022.

FREITAS, A. M. et al. Review of technologies for phosphorus immobilization in biosolids-impacted soils. **Science of the Total Environment**, v. 1011, p. 181080, 2026.

GHERGHEL, A.; TEODOSIU, A.; DE GISI, S. A review on wastewater sludge valorisation and its challenges in the context of circular economy. **Journal of Cleaner Production**, 2019.

GHERGHEL, A.; TEODOSIU, C.; CASTRO, S. De. Beneficial use of municipal sludge under the circular economy concept: A review. **Journal of Environmental Management**, v. 235, p. 114115, 2019.

GIANNOPOULOS, G.; PILALAS, D.; MANDILARA, G. D.; KOTZAMANIDIS, C.; ANASTOPOULOS, I.; DUSHKU, E.; TZANAKAKIS, V. A.; POLIDOROS, A. N.; ASCHONITIS, V.; ARAMPATZIS, G. From biowastes to risks? Impact of biosolids treatment and dose on antibiotic resistance in agricultural soils - A mesocosm study. **One Health**, v. 22, p. 101336, jun. 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.onehlt.2024.101336>.

GODOY, L., C. A logística na destinação do lodo de esgoto. **Revista Científica On-line Tecnologia, Gestão e Humanismo**, 2013.

GOMES, S., B., V.; NASCIMENTO, C., W., A.; BIONDI, C., M. Produtividade e composição mineral de plantas de milho em solo adubado com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, 2007.

GOMES, S., B., V.; NASCIMENTO, C., W., A.; BIONDI, C., M.; ACCIOLY, A., M., A. Distribuição de metais pesados em plantas de milho cultivadas em Argissolo tratado com lodo de esgoto. **Revista Ciência Rural**, 2006.

GOMES, Marco Antonio Ferreira. Perdas de nutrientes. Embrapa Agricultura Digital e Embrapa Meio Ambiente. Publicado em 22 de dezembro de 2021. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agricultura-e-meio-ambiente/qualidade/residuos/perdas-de-nutrientes>> Acessado em 17/06/2023.

GONZAGA, M., I., S.; MACKOWIAK, C., L.; COMERFORD, N., B.; MOLINE, E., F., V.; SHIRLEY, J., P.; GUIMARAES, E., V. Pyrolysis methods impact biosolids-derived biochar composition, maize growth and nutrition. **Journal Soil and Tillage Research**, 2017.

GUBEL, A., J., M. **Aplicação de biossólidos na agricultura como alternativa para a gestão do lodo proveniente das estações de tratamento de águas residuais**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2024.

GUERRINI, I., A.; R. M. TRIGUEIRO, R., M. Atributos físicos e químicos de substratos compostos por biossólidos e casca de arroz carbonizada. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, 2004.

GUIMARÃES, J., C., S.; CORDEIRO, J.; VITORINO, D., C., F., R. **Utilização do lodo de esgoto na agricultura: uma análise cienciométrica**. Research, Society and Development. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2018.

GUO, M.; SONG, W.; KAZDA, R. Valor fertilizante de biossólidos estabilizados com cal como corretivo do solo. **Agronomy Journal**, 2012.

ILVA, C. A.; MACHADO, P. L. O. A. **Sequestro e emissão de carbono em ecossistemas agrícolas: estratégias para o aumento dos estoques de matéria orgânica em solos tropicais**. Embrapa solos, Rio de Janeiro, 2000.

Info +. Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN). Rio Grande do Sul, 2022. Disponível em: <<https://infomais.corsan.com.br/aprovada-resolucao-proposta-pela-corsan-que-contribui-para-reduzir-impacto-ambiental/>>. Acesso em: 26/07/2023.

JARAUSCH-WEHRHEIM, B. et al. Absorption and translocation of sludge-borne zinc in field-grown maize (*Zea mays* L.). **European Journal of Agronomy**, 1999.

JUNIO, G., R., Z.; SAMPAIO, R., A.; SANTOS, G., B., S.; NASCIMENTO A., L.; PRATES, F., B., S.; FERNANDES, L., A. Metais pesados em milho fertilizado com fosfato natural e composto de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, 2011.

JUNIO, G., R., Z.; SAMPAIO, R., A.; NASCIMENTO, A., L.; SANTOS, G., B.; SANTOS, L., D., T.; LUIZ A. FERNANDES, L., A. Produtividade de milho adubado com composto de lodo de esgoto e fosfato natural de Gafsa. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 2013.

JUNIOR, S., S., A.; SUN HWA MAZUCATO, V., S., H.; MACHADO, D., S.; GUILHERME, D., O.; COSTA, R., B.; FILHO, F., J., C., M. Agronomic potential of biosolids for a sustainable sanitation management in Brazil: Nutrient recycling, pathogens and micropollutants. **Journal of Cleaner Production**, 2021.

JÚNIOR, S., S., A.; PEREIRA, M., A., S.; LIMA, P., M.; MARISHIGUE, M.; GUILHERME, D.; O.; FILHO, F., J., C., M. Evidences on the application of biosolids and the effects on chemical characteristics in infertile tropical sandy soils. **Cleaner Engineering and Technology**, 2021.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**. Boca Raton, CRC. Press, 1987.

KANTERAKI, A. E.; ISARI, E. A.; SVARNAS, P.; KALAVROUZOTIS, I. K. Biosolids: The Trojan horse or the beautiful Helen for soil fertilization? **Science of The Total Environment**, v. 839, p. 156270, set. 2022.

KIRKBY, E., A.; RÖMHELD, V. Micronutrients in plant physiology: functions, uptake and mobility. **Journal The International Fertiliser Society**. Reino Unido, 2007.

KHAN, Z.; FAN, X.; KHAN, M., N.; KHAN, M., A.; ZHANG, K.; YOUQIANG FU, Y.; SHEN, H. A. The toxicity of heavy metals and plant signaling facilitated by biochar application: Implications for stress mitigation and crop production. **Journal Chemosphere**, 2022.

KOMINKO, H.; GORAZDA, K.; WZOREK, Z. Effect of sewage sludge-based fertilizers on biomass growth and heavy metal accumulation in plants. **Journal of Environmental Management**, 2022.

LAJAYER, B., A.; NAJAFI, N.; MOGHISEH, E.; MOSAFERI, M.; HADIAN, J. Micronutrient and heavy metal concentrations in basil plant cultivated on irradiated and non-irradiated sewage sludge- treated soil and evaluation of human health risk. **Regulatory Toxicology and Pharmacology**, 2019.

LE, Q.; PRICE, G. W. A review of the influence of heat drying, alkaline treatment, and composting on biosolids characteristics and their impacts on nitrogen dynamics in biosolids-amended soils. **Waste Management**, v. 176, p. 85-104, 2024.

LIN, Z.; PRICE, G., W.; BURTON, D., L.; CLARK, O., G. Effects on soil nitrogen and plant production from land applying three types of biosolids to an agricultural field for three consecutive years. **Soil and Tillage Research**, 2023.

LOBO, T., F.; FILHO, H., G.; BULL, L., T. Yield of dry matter and c/n ratio of oats as a functional of sewage sludge and nitrogen. **Bioscience Journal**, 2012.

LU, J.; MICKAN, B., S.; RYAN, M., H.; OKELY, H.; ROLLINS, C.; BURTON, M. Consumer perceptions of the co-benefits of biosolids and carbon sequestration in a fertiliser aimed at the urban retail market. **Journal of Cleaner Production**, 2023.

MABROUK, O.; HAMDI, H.; SAYADI, S. 3, AL-GHOUTI, M., A.; MOHAMMED H. ABU-DIEYEH, M., H.; ZOUARI, N. Reuse of Sludge as Organic Soil Amendment: Insights into the Current Situation and Potential Challenges. **Sustainability**. Quatar, 2023.

MALTA, T. S. **Aplicação de lodos de estações de tratamento de esgotos na agricultura: estudo do caso do município de Rio das Ostras**. Fundação Oswaldo Cruz. Rio de Janeiro, 2001.

MARTINS, S. F.; ESPERANCINI, M. S. T.; QUINTANA, N. R. G.; BARBOSA, F. S. (2021). Análise econômica da produção de lodo de esgoto compostado para fins agrícolas na estação de tratamento de esgoto de Botucatu-SP. **Revista Energia na Agricultura**. Botucatu, 2021.

MARTINS, C., A., C.; SANTOS, F., S.; ADRIANO PORTZ, A.; SANTOS. A., M. Desenvolvimento inicial do milho (zea mays l.) em substrato contendo lodo de esgoto compostado. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, 2018.

MATOS, M.,P.; MATOS, A., T. Dose de cal hidratada e características químicas de um lodo de esgoto doméstico submetido à caleação. **Engenharia na Agricultura**, 2012.

MAUER, E., J. Fundamentos de química do solo. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 6ª ed. Porto Alegre, 2017.

MBASABIRE, P., MURINDANGABO, Y. T., FROUZ, J., E BROM, J. Characterization, fractionation and untapped potential of phosphate-amended sewage sludge biochar in soil-plant systems. **Chemosphere**, 367, 143565. 2024.

MOTA, S. **Introdução à engenharia ambiental**. 4. ed. Rio de Janeiro, 2006.

NASCIMENTO, A. L., DURÃES, M. C. O., SAMPAIO, R. A., ZUBA JUNIO, G. R.; PRATES, F. B. de S., FERNANDES, L. A.; ZONTA, E., SOBRINHO, N. M. B. A. Productivity and nutrition of castor bean fertilized with sewage sludge stabilized by different processes. **Research, Society and Development**, 2022.

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. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, 2004.

NETTO-FERREIRA, J., B. Fertilizantes Organominerais à Base de Biossólidos: **Estratégia para o Aumento da Eficiência no Uso de Nutrientes em Planossolos**. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Seropédica, 2020.

NEVES, L. S.; ERNANI, P. R.; SIMONETE, M. A. Mobilidade de potássio em solos decorrente da adição de doses de cloreto de potássio. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, 2009.

NOGUEIRA, T. A. R. et al. Short-term usage of sewage sludge as organic fertilizer to sugarcane in a tropical soil bears little threat of heavy metal contamination. **Journal of Environmental Management**, v. 114, p. 168-177, 2013.

NUVOLARI, A. **Esgoto sanitário: coleta, transporte, tratamento e reuso agrícola**. São Paulo: Editora Blucher, 2009.

PAREDES FILHO, M., V. Compostagem de lodo de esgoto para uso agrícola. **Revista Agroambiental**, 2011.

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

PEREIRA, M. G.; LOSS, A.; BEUTLER, S. J.; TORRES, J. L. R. Carbono, matéria orgânica leve e fósforo remanescente em diferentes sistemas de manejo do solo. **Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 2010.

PIGOZZO, A., T., J.; GOBBI, M., A.; LENZI, E.; JORDÃO, V., R. Avaliação dos resíduos de rerrefino de óleo e de biossólido como fonte de micronutrientes no Latossolo Vermelho Escuro. **Acta Scientiarum**, 2002.

POGGIANI, F.; GUEDES, M., C.; BENEDETTI, V.; MATIAZZO, M., E.; GONÇALVES, J., L., M. **Uso de lodo de esgoto (biossólido) produzido na ETE-Barueri da região metropolitana de São Paulo em plantações florestais**. Congresso Brasileiro e Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável. Florianópolis, 2004.

Programa de destinação agrícola do lodo de esgoto. Sanepar - Companhia de Saneamento do Paraná, 2023. Disponível em: <<https://site.sanepar.com.br/sustentabilidade/destinacao-agricola-lodo-esgoto>>. Acesso em: 30/04/2023.

Relatório sobre o mercado de fertilizante. ANDA - Associação Nacional para Difusão de Adubos, 2023. Disponível em: <https://anda.org.br/pesquisa_setorial/>. Acesso em: 26/07/2023.

RIBEIRO, A., L., M. **Isótopos estáveis de carbono e a relação solo-planta no pantanal mato-grossense**. Universidade de Brasília. Brasília, 2022.

RIGO, M. M.; RAMOS, R. R.; CERQUEIRA, A. A.; SOUZA, P. S. A.; MARQUES, M. R. C. Destinação e reuso na agricultura do lodo de esgoto derivado do tratamento de águas residuárias domésticas no Brasil. **Gaia Scientia**. Rio de Janeiro, 2014.

RIO GRANDE DO SUL. Conselho Estadual do Meio Ambiente (CONSEMA). Resolução CONSEMA 461/2022. **Define critérios e procedimentos para o uso de lodos gerados em estações de tratamento de água (LETAs) e seus produtos derivados em solos, e dá outras providências**. Porto Alegre, RS: Secretária de Estado do Meio Ambiente e Infraestrutura, 2022.

SANTOS, J., N., R. **Utilização de biossólido no crescimento inicial de pinhão manso (*Jatropha curcas* L) cultivado em solo com diferentes texturas**. Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, 2014.

Secretaria da comunicação - Governo do Estado do Paraná. Produzido pela Sanepar, lodo do esgoto vira alternativa sustentável para agricultura. Paraná, 2022. Disponível em: <<https://www.aen.pr.gov.br/Noticia/Produzido-pela-Sanepar-lodo-do-esgoto-vira-alternativa-sustentavel-para-agricultura>> Acesso em: 26/07/2023.

SERRAT, B., M.; SANTIAGO, T. R.; BITTENCOURT, S.; MOTTA, A., C., V.; SILVA, L., A., T., P.; ANDREOLI, C., V. Taxa de aplicação máxima anual de lodo de esgoto higienizado pelo processo de estabilização alcalina: estudo comparativo de curvas de pH de solos. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, 2011.

SCIUBBA, L.; CAVANI, L.; NEGRONI, A.; ZANAROLI, G.; FAVA, F.; CIAVATTA, C.; MARZADORI, C. Changes in the functional properties of a sandy loam soil amended with biosolids at different application rates. **Geoderma**, 2014.

SILVA, C., A.; MACHADO, P., L., O. **A Sequestro e emissão de carbono em ecossistemas agrícolas: estratégias para o aumento dos estoques de matéria orgânica em solos tropicais**. Embrapa Solos. Rio de Janeiro, 2000.

SILVA, I., F.; MIELNICZUK, J. Sistemas de cultivo e características do solo afetando a estabilidade de agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 1998.

SILVA, D., J.; ARAÚJO, C., A., S. **Agricultura irrigada: a importância da adubação**. Congresso brasileiro de ciência do solo. Embrapa Solos. Petrolina, 2005.

SILVA, W. R.; NASCIMENTO, C. W. A.; FRACETTO, F. J. C.; PEREIRA, A. P. A.; XIMENES, D. H. S. V.; LINS, S. A. S.; SILVA, C. C. G.; FRACETTO, G. G. M. Thermal versus chemical stabilization of sewage sludge: Effects on soil chemical properties, microbial functionality, and maize yield in a tropical soil. **Waste Management**, v. 211, p. 115316, mar. 2026.

SILVEIRA, M.L.A.; ALLEONI, L.R.F.; GUILHERME, L.R.G. Biosolids and heavy metals in soils. **Scientia Agrícola**, 2003.

SHARMA, B.; SARKAR, A.; SINGH, P.; SINGH, R., P. Agricultural utilization of biosolids: A review on potential effects on soil and plant grown. **Journal Waste Management**, 2017.

SHUKLA, S.; KHAN, R.; CHRZANOWSKI, Ł.; VAGLIASINDI, F. G. A.; ROCCARO, P. Advancing sustainable agriculture through multi-omics profiling of biosolids for safe application: A review. **Journal of Environmental Management**, v. 375, p. 124292, fev. 2025.

SOFIATTI, V; LIMA, R., L., S.; GOLDFARB, M.; BELTRÃO, N., E., M. Cinza de madeira e lodo de esgoto como fonte de nutrientes para o crescimento do algodoeiro. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**. Campina Grande, 2007.

SPERA, S., T.; REATTI, A.; TAMANINI, C., R. **Recuperação de áreas degradadas com a utilização de biossólido e gramínea forrageira**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2004.

SULLIVAN, D. M.; TOMASEK, A.; LAHUE, D. G.; VERHOEVEN, B.; MOORE, A.; BREWER, L.; BARY, A. I.; COGGER, C. G.; BISWANATH, D. Fertilização com biossólidos, **PNW 508**.

SUN, X., K.; HUANG, Y.; DONG, X.; XU, C., B.; BAI, J. **Um estudo sobre propriedades nutricionais e concentrações de metais pesados de lodo ativado por resíduos derivados de estações de tratamento de esgoto doméstico de cidades pequenas e municipais**. Anais da Conferência Internacional sobre Química de Materiais e Proteção Ambiental, 2015.

TEIXEIRA, A. **Higienização do lodo da estação de tratamento de esgoto por compostagem termofílica para uso agrícola**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2012.

TIAN, G.; CHIU, C.-Y.; FRANZLUEBBERS, A. J.; OLADEJI, O. O.; GRANATO, T. C.; COX, A. E. Biosolids amendment dramatically increases sequestration of crop residue-carbon in agricultural soils in western Illinois. **Applied Soil Ecology**, 2015.

TORRI, S., I.; CORRÊA, R., S.; RENELLA, G. Biosolid Application to Agricultural Land - a Contribution to Global Phosphorus Recycle: A Review. **Journal Pedosphere**, 2017.

TORRI, S. I.; CORRÊA, R. S.; RENELLA, G. Sequestro de carbono no solo resultante da aplicação de biossólidos. **Applied and Environmental Soil Science**, 2014.

TSADILAS, C.; SAMARAS, V.; EVANGELOU, E.; SHAHEEN, S., M. Influence of fly ash and sewage sludge application on wheat biomass production, nutrients availability, and soil properties. **International Journal of Coal Science & Technology**, 2014.

TSUTIYA, M. T; COMPARINI, J. B.; SOBRINHO, P. A; HESPANHOL, I; MELO, J. MARQUES, M. O. **Biossólidos na agricultura**. 2. ed. São Paulo, 2002.

VIEIRA, F., R.; TANAKA, R., T.; TSAI, S., M.; PÉREZ, D., V.; SILVA, C., M., M., S. Disponibilidade de nutrientes no solo, qualidade de grãos e produtividade da soja em solo adubado com lodo de esgoto. **Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, 2005.

WIJESEKARA, H.; COLYVAS, K.; RIPPON, P.; HOANG, S., A.; BOLAN, N., S.; MANNA, M., C.; THANGAVEL, R.; SESHADRI, B.; VITHANAGE, M.; AWAD, Y., M.; SURAPANENI, A.; SAINT, C.; TIAN, G.; TORRI, S.; OK, Y., S.; KIRKHAM, M., B. Carbon sequestration value of biosolids applied to soil: A global meta-analysis. **Journal of Environmental Management**, 2021.

Yuanyao, Y.; Ngo, H. H.; Guo, W.; Chang, S. W.; Nguyen, D. D.; Fu, Q.; Wei, W.; Ni, B.; Cheng, D.; Liu, Y. A critical review on utilization of sewage sludge as environmental functional materials. **Journal Bioresource Technology**. Austrália, 2022.

12. ANEXO

A seguir, o registro fotográfico das plantas de milho e aveia preta, durante e ao término do experimento.

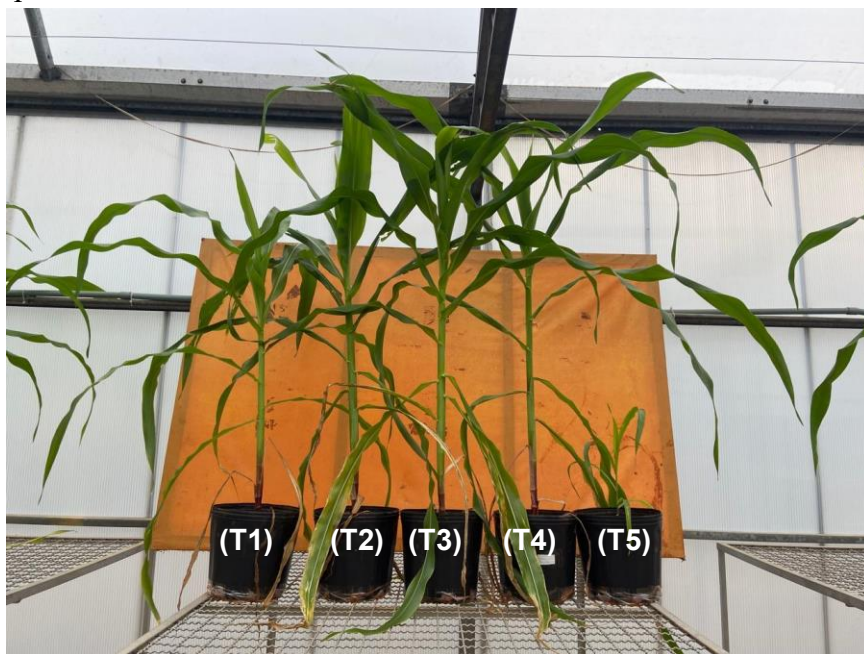


Figura 10. Plantas de milho aos 67 dias após a semeadura nos diferentes tratamentos para o solo argiloso.



Figura 11. Plantas de milho aos 67 dias após a semeadura nos diferentes tratamentos para o solo franco-arenoso.



Figura 12. Plantas de milho do tratamento 1 aos 95 dias após a semeadura nos diferentes tratamentos para o solo franco-arenoso (a) e argiloso (b).



Figura 13. Plantas de milho aos 95 do tratamento 2 dias após a semeadura nos diferentes tratamentos para o solo franco-arenoso (a) e argiloso (b).



Figura 14. Plantas de milho aos 95 do tratamento 3 dias após a semeadura nos diferentes tratamentos para o solo franco-arenoso (a) e argiloso (b).

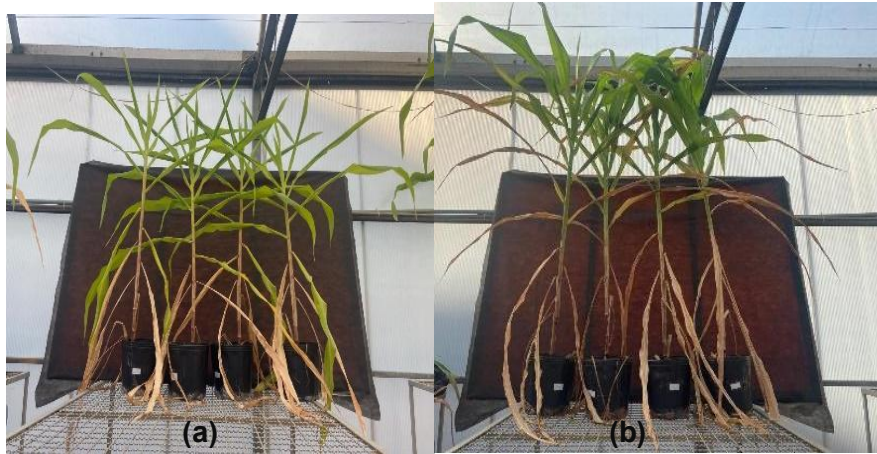


Figura 15. Plantas de milho aos 95 do tratamento 4 dias após a semeadura nos diferentes tratamentos para o solo franco-arenoso (a) e argiloso (b).

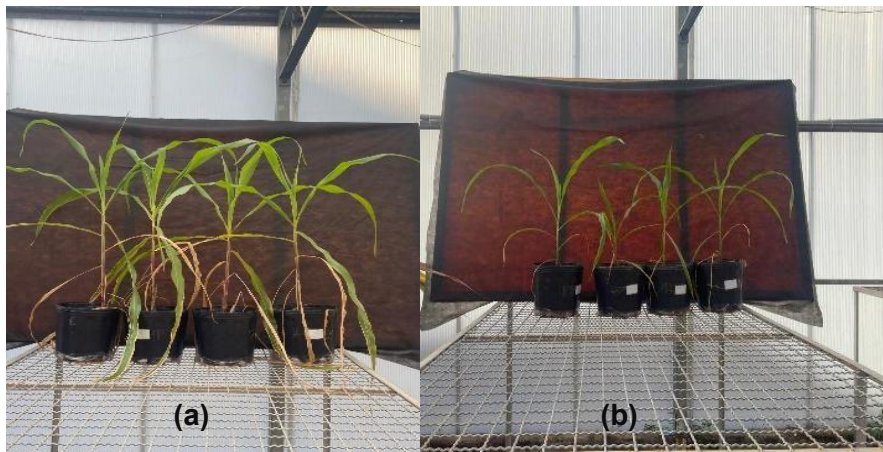


Figura 16. Plantas de milho aos 95 do tratamento 5 dias após a semeadura nos diferentes tratamentos para o solo franco-arenoso (a) e argiloso (b).



Figura 17. Plantas de aveia preta no Tratamento 1 aos 67 dias após a semeadura. a) franco-arenoso e b) argiloso.



Figura 18. Plantas de aveia preta no Tratamento 2 aos 67 dias após a semeadura. a) franco-arenoso e b) argiloso.

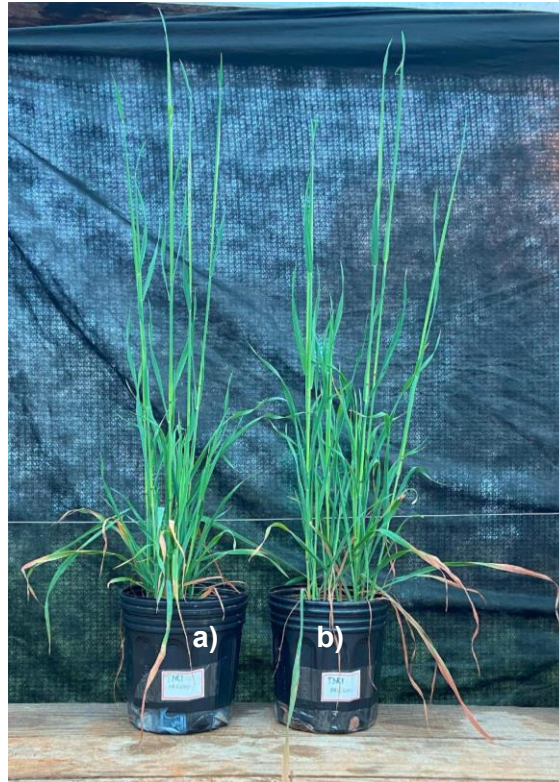


Figura 19. Plantas de aveia preta no Tratamento 3 aos 67 dias após a semeadura. a) franco-arenoso e b) argiloso.



Figura 20. Plantas de aveia preta no Tratamento 4 aos 67 dias após a semeadura. a) franco-arenoso e b) argiloso.



Figura 21. Plantas de aveia preta no Tratamento 5 aos 67 dias após a semeadura. a) franco-arenoso e b) argiloso.

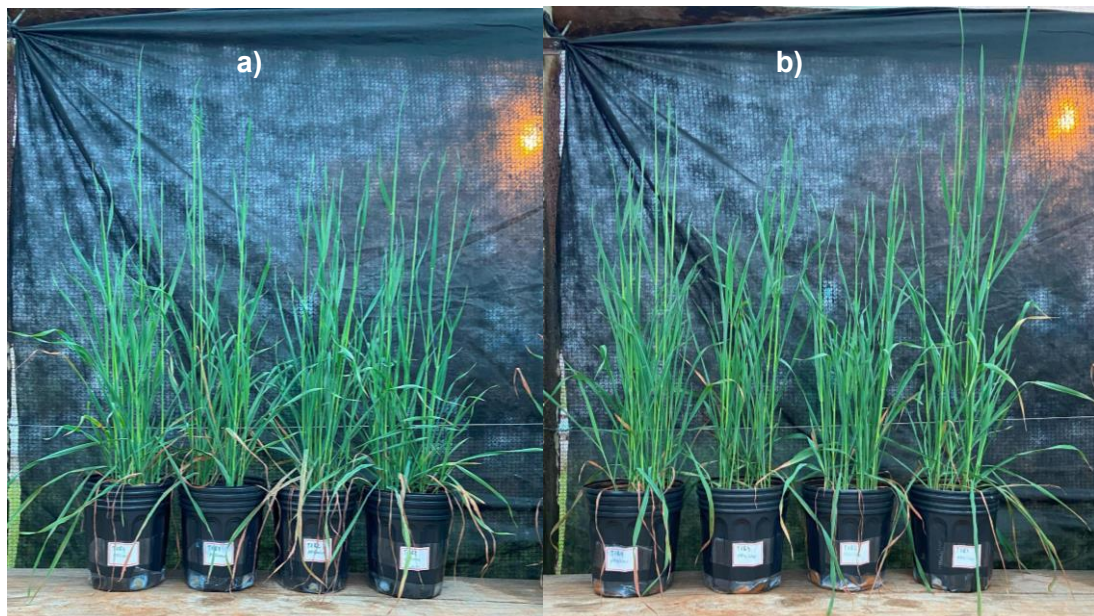


Figura 22. Plantas de aveia preta no tratamento 1 aos 67 dias após a semeadura. a) franco-arenoso e b) argiloso.



Figura 23. Plantas de aveia preta no tratamento 2 aos 67 dias após a semeadura. a) franco-arenoso e b) argiloso.

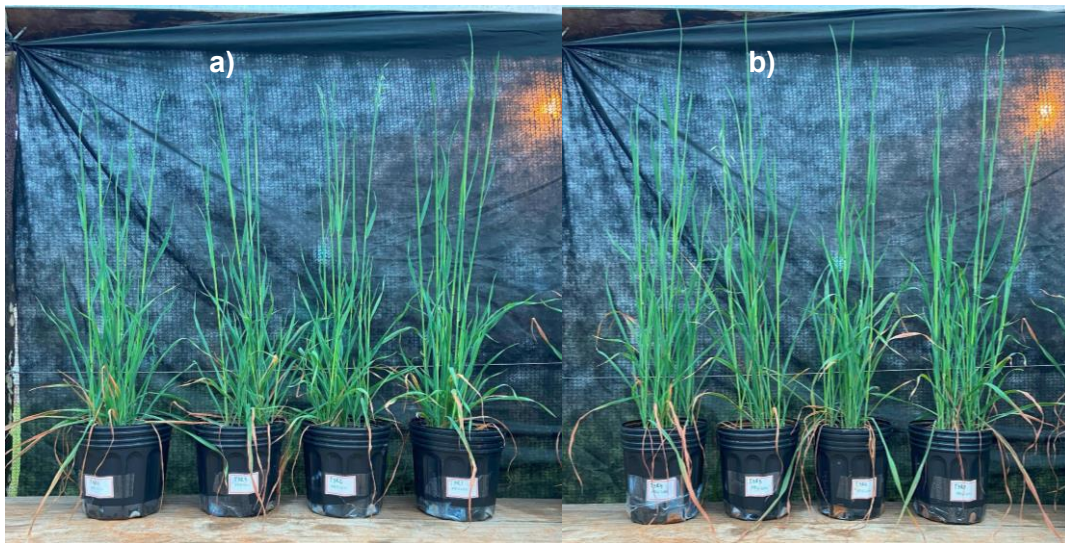


Figura 24. Plantas de aveia preta no tratamento 3 aos 67 dias após a semeadura. a) franco-arenoso e b) argiloso.



Figura 25. Plantas de aveia preta no tratamento 4 aos 67 dias após a semeadura. a) franco-arenoso e b) argiloso.

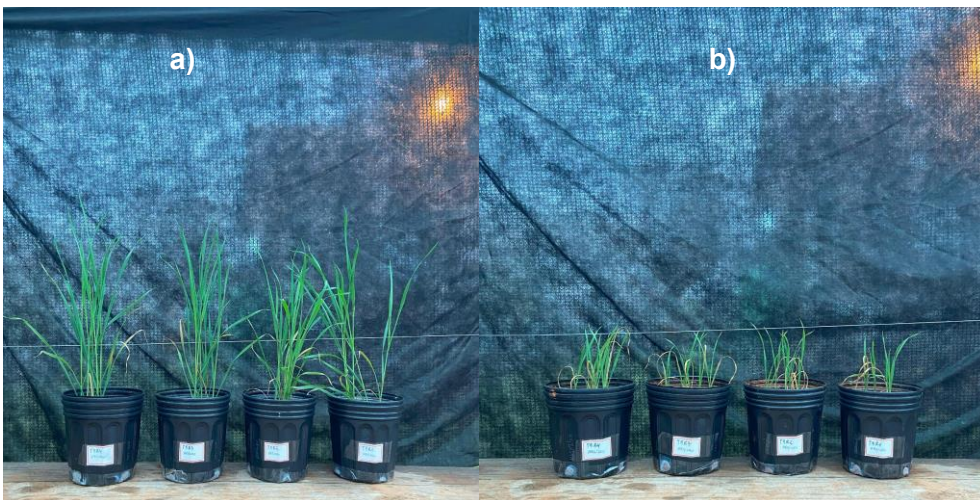


Figura 26. Plantas de aveia preta no tratamento 5 aos 67 dias após a semeadura. a) franco-arenoso e b) argiloso.