

DÉBORA DURÃES ALMEIDA

**POTENCIAL DE APLICAÇÃO NO SOLO E APROVEITAMENTO AGRÍCOLA DE
BIOSSÓLIDOS DE ESGOTO SANITÁRIO**

Bambuí/MG

2026

DÉBORA DURÃES ALMEIDA

**POTENCIAL DE APLICAÇÃO NO SOLO E APROVEITAMENTO AGRÍCOLA DE
BIOSSÓLIDOS DE ESGOTO SANITÁRIO**

Trabalho apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Sustentabilidade e Tecnologia Ambiental, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, *Campus Bambuí*.

Linha de pesquisa: Planejamento e Gestão Ambiental.

Projeto estruturante: Planejamento e Gestão Sustentável de Ecossistemas Urbanos e Agroindustriais - Políticas Públicas e Gestão de Serviços de Saneamento e Controle Ambiental em Processos Agroindustriais.

Orientador: Prof. Dr. Hygor Aristides Victor Rossoni

Coorientador: Prof. Dr. Maribus Altoé Baldotto

Catálogo na Fonte Biblioteca IFMG - Campus Bambuí

A447p Almeida, Débora Durães.
Potencial de aplicação no solo e aproveitamento agrícola de
biossólidos de esgoto sanitário. / Débora Durães Almeida. – Bambuí,
2026.
174 f.: il.; color.

Orientador: Prof. Dr. Hygor Aristides Victor Rossoni.
Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Minas Gerais – Campus Bambuí, MG, Curso Mestrado
Profissional em Sustentabilidade e Tecnologia Ambiental, 2026.

1. Fertilidade do solo. 2. Economia circular. 3. Gestão de resíduos. I.
Rossoni, Hygor Aristides Victor. II. Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Bambuí, MG. III.
Título.

CDD 363.728

Elaborada por Douglas Bernardes de Castro- CRB-6/2802

FICHA DE APROVAÇÃO

PARECER Nº 4

Dissertação intitulada de “**Potencial de aplicação no solo e aproveitamento agrícola de biossólidos de esgoto sanitário**”, de autoria da mestranda em Sustentabilidade e Tecnologia Ambiental, **Débora Durães Almeida**, sob a orientação do prof. **Dr. Hygor Aristides Victor Rossoni** e como coorientador o prof. **Dr. Marihus Altoé Baldotto**, aprovada pela Banca Examinadora de Defesa, em 27/03/2026, com a média de 90,0 pontos.

BambuÍ (MG), 27 de março de 2026.



Documento assinado eletronicamente por **HYGOR ARISTIDES VICTOR ROSSONI**, Usuário Externo, em 31/03/2026, às 09:48, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **DEBORA DURAES ALMEIDA**, Usuário Externo, em 31/03/2026, às 14:17, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Sibele Augusta Ferreira Leite**, Usuário Externo, em 31/03/2026, às 14:35, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Raphael Oliveira de Melo**, Usuário Externo, em 01/04/2026, às 13:39, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Iara Oliveira Fernandes**, Usuário Externo, em 02/04/2026, às 15:01, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **MARIHUS ALTOE BALDOTTO**, Usuário Externo, em 02/04/2026, às 20:01, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **2671677** e o código CRC **4EB02D3B**.

Criado por [ronaldo.barbosa](#), versão 2 por [ronaldo.barbosa](#) em 31/03/2026 08:12:44.

Dedico este trabalho àqueles que são luz no meu caminho, que me ensinaram a persistir mesmo diante da tempestade, que celebraram minhas conquistas e secaram minhas lágrimas. Aos que caminharam comigo em silêncio ou em palavras, deixo minha gratidão, que floresce como sementes de esperança em cada página deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me fortalecer em cada etapa desta caminhada, iluminando meu caminho com fé, sabedoria e esperança. Sem Sua presença e graça, esta conquista não seria possível.

Agradeço à Regional Centro-Oeste da COPASA o apoio e a disponibilização do biossólido utilizado nesta pesquisa, contribuição fundamental para a execução e o desenvolvimento deste estudo. Expresso também minha sincera gratidão aos profissionais Renato, Egonn e Eduardo, pela colaboração, disponibilidade e suporte prestados durante o fornecimento e encaminhamento do material, tornando possível a realização desta etapa experimental.

Aos meus filhos, Nicolý e Filipe, minha maior motivação e razão de perseverança. Que este trabalho sirva de exemplo de dedicação e amor ao conhecimento — que vocês cresçam acreditando que sonhos se constroem com amor, coragem e esforço. Ao meu marido, Gilberto, pelo companheirismo, paciência e apoio incondicional em todos os momentos. Sua compreensão e incentivo foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

Ao meu orientador, Hygor Victor Aristides Rossoni, expresso minha profunda gratidão pela orientação sempre segura, pela paciência diante dos desafios encontrados e pelo incentivo constante que tornou possível cada etapa deste percurso.

Ao coorientador, Marihus Altoé Baldotto, pelas contribuições técnicas e pelo apoio essencial que enriqueceram este trabalho.

Agradeço à Professora Lilian, do setor de Floricultura, por ter disponibilizado o espaço e por todo o apoio durante a condução do experimento. Sua atenção e colaboração foram essenciais para que esta etapa da pesquisa fosse realizada com sucesso. Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus Bambuí*, pela oportunidade de realização do Mestrado Profissional em Sustentabilidade e Tecnologia Ambiental. À Universidade Federal de Viçosa (UFV), pela parceria e colaboração que possibilitaram a execução das atividades.

Ao Laboratório de Solos (*Campus Florestal*- UFV), pela disponibilidade do espaço e dos equipamentos essenciais para a condução das análises.

À Aline, pela amizade, companheirismo e ajuda constante em todas as etapas deste trabalho, sua presença foi essencial para que este projeto se concretizasse.

À minha família, pelo amor e apoio inabalável, especialmente à minha mãe, cuja força, dedicação e exemplo de vida sempre me inspiraram a seguir em frente com determinação.

À turma do mestrado, pela amizade, troca de experiências e parceria construída ao longo dessa jornada, cada aprendizado compartilhado tornou este caminho mais leve e significativo.

*Cuidar da terra é também cuidar do futuro. Toda
pesquisa é uma semente que plantamos
hoje (Almeida, 2026).*

RESUMO GERAL

O uso de bioossólidos, resíduos provenientes de estações de tratamento de esgoto e da agroindústria, tem se destacado como uma estratégia sustentável para a melhoria da fertilidade do solo, aumento da produtividade agrícola e promoção da economia circular. O presente estudo teve como objetivo avaliar os efeitos da aplicação de bioossólidos Classe II, provenientes da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) de Nova Serrana–MG, sobre as propriedades químicas e físicas de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, bem como sobre o desenvolvimento inicial da cultura do milho, considerando diferentes doses de aplicação e distintos períodos de incubação do resíduo no solo. A pesquisa foi conduzida por meio de Revisão Sistemática de Literatura e experimentos de campo, com aplicação de doses de bioossólidos ao solo e um bioensaio com as doses propostas com correção do solo. Foram avaliados parâmetros como matéria orgânica, carbono orgânico, capacidade de troca catiônica (CTC), crescimento inicial, biomassa acumulada e alocação de nutrientes nas plantas. Evidenciou-se que a aplicação de bioossólidos promove melhorias na qualidade do solo, incluindo incremento de matéria orgânica, carbono estável, capacidade de retenção hídrica e fertilidade. Além disso, contribui para a mitigação das mudanças climáticas e recuperação de áreas degradadas. Ressaltou-se a necessidade de monitoramento de contaminantes, como metais pesados, e de avaliação de longo prazo para garantir segurança ambiental e sustentabilidade econômica. Os resultados experimentais indicaram respostas positivas de matéria orgânica e carbono orgânico às doses agronômicas aplicadas, com efeito máximo significativo estatisticamente entre 100 e 150 t ha⁻¹. A CTC aumentou significativamente o acúmulo, especialmente para Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺, mostrando desde a correção inicial até sua estabilização. A faixa de aplicação com dose agronômica entre 80-120 t ha⁻¹ foi identificada como dose que maximiza o valor da variável do ponto de vista estatístico. A aplicação de bioossólidos impactou positivamente, aumentando o crescimento radicular, a biomassa acumulada e a relação raiz/parte aérea. Doses intermediárias (20-40 t ha⁻¹), combinadas com correção do solo, apresentaram os melhores resultados, significativos estatisticamente, enquanto doses elevadas, acima de 120 t ha⁻¹, sem correção, provocaram efeitos agronômicos fitotóxicos. Observou-se aumento do carbono orgânico, que é um indicativo ambiental e agronômico do manejo adequado de bioossólidos. Em síntese, o estudo confirma que os bioossólidos podem ser aplicados de maneira segura e eficiente em sistemas agrícolas, promovendo ganhos agronômicos, benefícios ambientais e contribuição para a sustentabilidade, desde que respeitadas as doses recomendadas, monitorados contaminantes e consideradas as características locais do solo e clima.

Palavras-chave: fertilidade do solo, economia circular, gestão de resíduos, desempenho agronômico.

GENERAL ABSTRACT

The use of biosolids, residues derived from wastewater treatment plants and agro-industrial processes, has emerged as a sustainable strategy for improving soil fertility, increasing agricultural productivity, and promoting the circular economy. This study aimed to evaluate the effects of applying Class II biosolids, obtained from the Wastewater Treatment Plant (WWTP) of Nova Serrana–MG, on the chemical and physical properties of a Red-Yellow Latosol, as well as on the initial development of maize crops, considering different application rates and incubation periods of the residue in the soil. The research was conducted through a Systematic Literature Review and field experiments, involving the application of biosolid doses to the soil and a bioassay using the proposed doses combined with soil correction. Parameters such as organic matter, organic carbon, cation exchange capacity (CEC), initial growth, accumulated biomass, and nutrient allocation in plants were evaluated. The results demonstrated that the application of biosolids improves soil quality, including increases in organic matter, stable carbon, water retention capacity, and overall fertility. Additionally, it contributes to climate change mitigation and the recovery of degraded areas. The need for monitoring contaminants, such as heavy metals, and for long-term evaluation to ensure environmental safety and economic sustainability was also emphasized. Experimental results indicated positive responses of organic matter and organic carbon to the applied agronomic doses, with a statistically significant maximum effect observed between 100 and 150 t ha⁻¹. The CEC showed a significant increase, particularly for Ca²⁺, Mg²⁺, and K⁺, demonstrating accumulation from initial correction through stabilization. The application range between 80 and 120 t ha⁻¹ was identified as the optimal agronomic dose to maximize the variable from a statistical perspective. The application of biosolids positively influenced root growth, accumulated biomass, and the root-to-shoot ratio. Intermediate doses (20–40 t ha⁻¹), combined with soil correction, yielded the best statistically significant results, whereas higher doses above 120 t ha⁻¹ without correction led to phytotoxic agronomic effects. An increase in organic carbon was observed, serving as an environmental and agronomic indicator of proper biosolid management. In summary, the study confirms that biosolids can be safely and efficiently applied in agricultural systems, promoting agronomic gains, environmental benefits, and contributions to sustainability, provided that recommended doses are followed, contaminants are monitored, and local soil and climate conditions are taken into account.

Keywords: soil fertility, circular economy, waste management, agronomic performance.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Biossólidos: benefícios e limitações.....	36
Tabela 2. Viés econômico da utilização de biossólidos	44
Tabela 3. Limites para substâncias potencialmente tóxicas	48
Tabela 4. Análise da amostra de solo utilizada – Latossolo Vermelho Distrófico.....	64
Tabela 5. Tratamentos propostos	65
Tabela 6. Estatística descritiva pH.....	116
Tabela 7. Teste de normalidade pH	116
Tabela 8. Estatística descritiva cálcio	117
Tabela 9. Teste de normalidade cálcio.....	117
Tabela 10. Estatística descritiva Alumínio.....	117
Tabela 11. Teste de normalidade Alumínio	117
Tabela 12. Estatística descritiva Acidez total.....	118
Tabela 13. Teste de normalidade Acidez total	118
Tabela 14. Teste de normalidade e correlação Acidez total x Alumínio.....	118
Tabela 15. Estatística descritiva Potássio.....	118
Tabela 16. Teste de normalidade Potássio	119
Tabela 17. Estatística descritiva Fósforo	119
Tabela 18. Teste de normalidade Fósforo	119
Tabela 19. Estatística descritiva MO	119
Tabela 20. Teste de normalidade MO.....	120
Tabela 21. Estatística descritiva CO	120
Tabela 22. Teste de normalidade CO.....	120
Tabela 23. Análise da amostra de solo utilizada – Latossolo Vermelho Distrófico.....	127
Tabela 24. Tratamentos propostos	130
Tabela 25. Teste de normalidade	133
Tabela 26. Teste Kruskal–Wallis	134
Tabela 27. Coeficiente de Correlação de Spearman *	140
Tabela 28. Médias dos tratamentos por agrupamento.....	173

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma de prisma apontando o percurso metodológico de buscas de informações bibliográficas nas diferentes fases da revisão sistemática	29
Figura 2. Experimento	66
Figura 3. Relação dose resposta do pH em função aos tratamentos*	71
Figura 4. Relação dose resposta do Alumínio em função aos tratamentos*	77
Figura 5. Relação dose resposta do Acidez total em função aos tratamentos*	79
Figura 6. Heatmap interação da Acidez total em função aos Alumínio nos tratamentos*.	84
Figura 7 - Densidade Conjunta interação ¹ da Acidez total em função aos Alumínio nos tratamentos	85
Figura 8. Relação dose resposta do Cálcio em função aos tratamentos*	87
Figura 9. Relação dose resposta do Magnésio em função aos tratamentos*	91
Figura 10. Relação dose resposta do Potássio em função aos tratamentos*	93
Figura 11. Relação dose resposta do Fósforo em função aos tratamentos.....	96
Figura 12. Relação dose resposta do MO em função aos tratamentos.....	101
Figura 13. Relação dose resposta do CO em função aos tratamentos.....	104
Figura 14. Equações de regressão.....	116
Figura 15. Experimento.....	130
Figura 16. Altura da planta em resposta aos tratamentos.....	135
Figura 17. Comprimento da maior folha em resposta aos tratamentos.....	136
Figura 18. Diâmetro do caule em resposta aos tratamentos.....	137
Figura 19. Altura da maior folha em resposta aos tratamentos.....	138
Figura 20. Matriz de correlação de Spearman - Heatmap.....	139
Figura 21. MSPA em resposta aos tratamentos.....	141
Figura 22. MSR em resposta aos tratamentos.....	142
Figura 23. Razão MSR/MSPA em resposta aos tratamentos.....	143
Figura 24. LMF em resposta aos tratamentos.....	173
Figura 25. MFPA em resposta aos tratamentos.....	173
Figura 26. MFR em resposta aos tratamentos.....	174

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	16
1.1 Relevância e Justificativa	17
1.2 Questão e Hipóteses de Pesquisa	18
1.3. Motivações Pessoais	19
2. OBJETIVOS	20
2.1. Geral.....	20
2.2. Específicos	20
3. ESTRATÉGIAS DE ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO E DE DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA	21
4. DESCRIÇÃO DO OBJETO DE PESQUISA	22
REFERÊNCIAS.....	23
CAPÍTULO 1. POTENCIAL DE APLICAÇÃO NO SOLO E APROVEITAMENTO AGRÍCOLA DE BIOSSÓLIDOS: Uma Análise Sistemática	25
1. INTRODUÇÃO	27
2. MATERIAL E MÉTODOS	29
2.1 Revisão Sistemática de Literatura.....	29
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
3.1 Uso de lodo de esgoto na agricultura	35
3.2 Aspectos de toxicidade e impacto ambiental	39
3.3 Dinâmica dos estoques de carbono em solos tratados com bioossólidos	41
3.4 Viés econômico do uso de bioossólidos.....	44
3.5. Potencial agrônomo e restrições ambientais do uso de bioossólidos	47
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	53
5. REFERÊNCIAS.....	54
CAPÍTULO 2. IMPACTO DA APLICAÇÃO DE BIOSSÓLIDOS DE ESGOTO SANITÁRIO NAS PROPRIEDADES QUÍMICAS DO SOLO.....	57
RESUMO.....	57
ABSTRACT.....	58
1. INTRODUÇÃO	59
2. MATERIAL E MÉTODOS	62
2.1. Caracterização do Objeto de Pesquisa	62
2.2. Características físico-químicas do solo.....	64
2.3. Análises químicas	67
2.4. Teor de MO	68
2.5. Acidez total.....	68
2.6. Análise estatística.....	69
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	70
3.1 pH 70	

3.2. Al^{3+}	75
3.3. Acidez total ($\text{H}+\text{Al}$)	78
3.4. Interação pH, Al^{3+} e Acidez total ($\text{H}+\text{Al}$)	81
3.5. Cálcio	85
3.6. Magnésio	87
3.7. Potássio	90
3.8. Fósforo	93
3.9. Interação Cálcio, Magnésio e Potássio.....	96
3.10. Matéria orgânica	98
3.11. Carbono orgânico	101
3.12. Correlação pH e nutrientes.....	104
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	108
5. REFERÊNCIAS.....	109
APÊNDICE I	113
CAPÍTULO 3. EFEITO DA APLICAÇÃO DE BIODSÓLIDOS DE ESGOTO SANITÁRIO CLASSE II NO DESENVOLVIMENTO INICIAL DA CULTURA.....	118
RESUMO.....	118
ABSTRACT.....	119
1. INTRODUÇÃO	120
2. MATERIAL E MÉTODOS	122
2.1. Caracterização do Objeto de Pesquisa	122
2.2. Características físico-químicas do solo utilizado.....	123
2.3. Bioensaio.....	124
2.4. Análises biométricas	126
2.5. Análises estatísticas.....	127
3. RESULTADOS.....	128
4. DISCUSSÃO	141
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	145
6. REFERÊNCIAS.....	147
CAPÍTULO 4. PRODUTO TÉCNICO - TECNOLÓGICO	151
RESUMO EXECUTIVO	155
1. APRESENTAÇÃO	156
2. DESENVOLVIMENTO	158
2.1. Experimento I – Avaliação da qualidade do solo após aplicação de biossólidos	158
2.2. Experimento II – Avaliação do desenvolvimento inicial do milho.....	159
2.3. Análises estatísticas.....	159
3. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	160
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	163
5. REFERÊNCIAS.....	164

6. RECOMENDAÇÕES	166
7. APÊNDICE II	167
ANEXO I.....	169
ANEXO II	174

1. INTRODUÇÃO GERAL

O crescimento expressivo da geração de resíduos sólidos urbanos e agroindustriais, nas últimas décadas, tem imposto desafios à sustentabilidade ambiental e à gestão dos recursos naturais. Diante desse cenário, os bio sólidos oriundos de estações de tratamento de esgoto (ETE) e de cadeias agroindustriais destacam-se justamente por seu elevado teor de nutrientes, como nitrogênio, fósforo, potássio e de matéria orgânica, características que atestam seu potencial agrônomo. No entanto, esse potencial esbarra em entraves normativos, sanitários e socioambientais, somados à ausência de critérios técnicos consolidados. Essa conjuntura limita o aproveitamento seguro e eficiente desses materiais, fazendo com que um recurso promissor se converta, com frequência, em um passivo ambiental recorrente (Gonçalves, 1998; Pereira *et al.*, 2023).

Além do aproveitamento agrônomo, a utilização de bio sólidos se alinha a estratégias de economia circular, em que resíduos são transformados em insumos valiosos, contribuindo para a redução da dependência de fertilizantes químicos e para a mitigação dos impactos ambientais decorrentes do manejo inadequado desses materiais (Araújo *et al.*, 2022; Leitão, 2015). De acordo com a literatura científica e a legislação brasileira (CONAMA n.º 375/2006), bio sólidos são lodos de esgoto que passaram por processos de tratamento e estabilização - físicos, químicos e/ou biológicos - com o objetivo de reduzir a carga de patógenos, odores e a atividade biológica, tornando-os aptos para uso agrícola controlado.

O contexto brasileiro é particularmente relevante nesse cenário; o país é um dos maiores produtores agrícolas do mundo com quantidade significativa de resíduos gerados por atividades agropecuárias e urbanas. Dados recentes do Sistema Nacional de Informações em Saneamento (SNIS, 2023) indicam que a cobertura média de tratamento de esgoto nos maiores municípios do país é inferior a 70%, resultando em quantidades expressivas de bio sólidos que exigem manejo adequado para evitar riscos ambientais e à saúde pública (Oliveira *et al.*, 2025).

Nesse sentido, a aplicação de bio sólidos no solo deve considerar fatores como tipo de solo, características climáticas, dose aplicada e composição química do resíduo, visando maximizar os benefícios agrônomo e minimizar possíveis efeitos adversos, incluindo a lixiviação de metais pesados e a presença de contaminantes químicos (Boudjabi ; Chenchouni, 2021; Trannin *et al.*, 2005).

Diversos estudos destacam que a incorporação de bio sólidos ao solo pode melhorar propriedades físicas, químicas e biológicas, como agregação, capacidade de retenção hídrica,

aeração e incremento de matéria orgânica, além de favorecer o crescimento inicial das culturas e a produtividade agrícola (Araújo *et al.*, 2022; Maia *et al.*, 2018; Monteiro *et al.*, 2019). Ademais, a aplicação desses resíduos contribui para o aumento do estoque de carbono orgânico no solo, reforçando seu papel na mitigação de mudanças climáticas e na recuperação de áreas degradadas (Freitas *et al.*, 2023; Liu *et al.*, 2022). Entretanto, para que tais benefícios sejam alcançados de forma segura, é fundamental respeitar normas técnicas e regulamentações, como a ABNT NBR 13.979:2015 e a Resolução CONAMA n.º 498/2020, que estabelecem padrões de segurança para o uso de biossólidos em atividades agrícolas (ABNT, 2015; Emmanouil *et al.*, 2024).

Diante desse contexto, o presente estudo teve como objetivo geral avaliar os efeitos da aplicação de biossólidos de Classe II provenientes de estações de tratamento de esgoto (ETE) sobre a fertilidade do solo e os parâmetros agronômicos da cultura do milho, considerando critérios de eficiência agrônômica, segurança ambiental e sustentabilidade no manejo desse resíduo. Nesse sentido, a pesquisa buscou responder à seguinte questão norteadora: “de que maneira a utilização de biossólidos influencia as propriedades físico-químicas do solo e quais são os potenciais riscos e benefícios dessa prática para a promoção de sistemas agrícolas sustentáveis?”

A investigação foi conduzida por meio de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) combinada com estudos de campo, a fim de identificar com precisão o potencial agrônômico, os riscos ambientais e a contribuição dos biossólidos para a economia circular nos setores agropecuário e agroindustrial. Dessa forma, espera-se que os resultados deste estudo forneçam subsídios técnicos e científicos para orientar práticas de manejo seguras e sustentáveis de biossólidos, promovendo a integração de resíduos urbanos e agroindustriais em sistemas produtivos mais resilientes e ambientalmente responsáveis.

1.1 Relevância e Justificativa

A relevância deste estudo fundamenta-se na necessidade crescente de aprimorar o manejo e a destinação final de resíduos como os biossólidos provenientes de ETEs, considerando o crescente volume de resíduos oriundos de estações de tratamento de esgotos urbanos e de atividades agropecuárias, que apresentam elevada carga de nutrientes e matéria orgânica. O uso adequado desses resíduos como fertilizantes ou condicionadores de solo representa uma oportunidade de aumentar a eficiência na reciclagem de nutrientes, reduzir a dependência de fertilizantes químicos e minimizar os impactos ambientais decorrentes do

descarte inadequado. Por outro lado, o manejo inadequado de bioossólidos pode gerar impactos ambientais significativos, como a contaminação do solo e dos corpos hídricos (Pereira *et al.*, 2023; Spadotto, 2006).

Sob a perspectiva ambiental, o uso agrícola de bioossólidos contribui para a reciclagem de nutrientes, a melhoria da qualidade física e química do solo e a redução da pressão sobre recursos naturais não renováveis utilizados na produção de fertilizantes minerais. A avaliação de parâmetros como fertilidade do solo, retenção hídrica e incremento dos teores de carbono e nitrogênio é essencial para compreender os impactos dessa prática e assegurar que sua adoção ocorra de maneira segura e ambientalmente responsável. Nesse sentido, o atendimento às normas técnicas e regulamentações vigentes, como a ABNT NBR 13.979:2015, torna-se fundamental para mitigar riscos ambientais e sanitários, garantindo a proteção dos ecossistemas e da saúde pública (ABNT, 2015; Emmanouil *et al.*, 2024).

Do ponto de vista econômico, o reaproveitamento de bioossólidos na agricultura apresenta potencial para reduzir os custos de produção agrícola, especialmente no que se refere à aquisição de fertilizantes químicos, cujo preço é influenciado por fatores externos e pela dependência de insumos importados. A utilização desses resíduos como fonte alternativa de nutrientes pode aumentar a eficiência produtiva, favorecer a rentabilidade das culturas e fortalecer a sustentabilidade econômica dos sistemas agrícolas, particularmente em contextos de agricultura familiar e de pequena e média escala.

No âmbito social, o manejo adequado de bioossólidos contribui para a melhoria da gestão de resíduos urbanos, reduzindo problemas associados à disposição inadequada e promovendo benefícios diretos à qualidade de vida da população. Além disso, práticas agrícolas sustentáveis baseadas na economia circular fortalecem o compromisso social do setor agropecuário, atendendo às demandas da sociedade por modelos produtivos mais responsáveis, inclusivos e alinhados aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente aqueles relacionados à segurança alimentar, saneamento, consumo responsável e ação climática (ONU, 2015; FAO, 2021).

Dessa forma, este estudo justifica-se pela necessidade de desenvolver e avaliar estratégias técnicas, ambientais, econômicas e sociais que viabilizem o uso seguro e eficiente de bioossólidos na agricultura, contribuindo para a redução de impactos ambientais, o fortalecimento da sustentabilidade da produção agrícola e o avanço do conhecimento científico sobre o aproveitamento sustentável de resíduos (Maia *et al.*, 2018; Pereira *et al.*, 2023).

1.2 Questão e Hipóteses de Pesquisa

O presente estudo teve como foco investigar o uso de biossólidos como insumo agrícola, considerando seus efeitos sobre a fertilidade do solo, o desenvolvimento inicial e a produtividade de culturas, bem como os impactos químicos associados à aplicação desses resíduos. A problemática central decorre da necessidade de compreender de forma integrada os benefícios agronômicos e os possíveis riscos ambientais decorrentes do manejo inadequado de biossólidos, dado o crescente volume de resíduos provenientes de estações de tratamento de esgotos urbanos e de atividades agropecuárias, ricos em nutrientes e matéria orgânica. Apesar do potencial desses resíduos para reduzir a dependência de fertilizantes químicos e promover práticas sustentáveis, ainda existem lacunas no conhecimento sobre a dose agronômica ideal, os efeitos saturantes e os impactos econômicos e ambientais do seu uso.

Dessa forma, a partir da premissa de que a aplicação de biossólidos pode aumentar a fertilidade do solo, supõe-se que a aplicação adequada desses materiais possa promover o aumento da produtividade agrícola de forma sustentável, segura e financeiramente viável, equilibrando os benefícios agronômicos com a mitigação de impactos ambientais.

1.3. Motivações Pessoais

As motivações pessoais para a realização deste estudo estão relacionadas à minha formação como Técnica e à experiência profissional adquirida ao longo dos anos no trabalho com substâncias químicas presentes no solo.

O ingresso no mestrado representa uma oportunidade de aprofundar meus conhecimentos sobre a química do solo e suas interações com insumos orgânicos, especialmente biossólidos, tema que atualmente venho explorando em pesquisas sobre o desenvolvimento inicial e a eficiência agronômica, assim como na análise química do solo após aplicação desses materiais. Esse interesse nasce da convicção de que a ciência aplicada pode oferecer soluções sustentáveis para o manejo agrícola, promovendo o reaproveitamento de resíduos ricos em nutrientes e contribuindo para a redução do uso de fertilizantes químicos, ao mesmo tempo em que fortalece práticas de economia circular e proteção ambiental.

Dessa forma, o presente estudo integra a experiência prática acumulada na área de saneamento à investigação acadêmica sistematizada, promovendo o aprofundamento técnico-científico sobre o uso agronômico de biossólidos. A pesquisa contribui para o avanço de soluções sustentáveis no setor agrícola, ao fomentar a valorização de resíduos, a eficiência no uso de nutrientes e a mitigação de impactos ambientais.

2. OBJETIVOS

2.1. Geral

O presente estudo tem como objetivo geral avaliar os efeitos da aplicação de biossólidos Classe II, provenientes da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) de Nova Serrana–MG, sobre as propriedades químicas e físicas de um Latossolo Vermelho-Amarelo, bem como sobre o desenvolvimento inicial da cultura do milho, considerando diferentes doses de aplicação e distintos períodos de incubação do resíduo no solo.

2.2. Específicos

- a) Desenvolver uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) com o propósito de identificar, analisar e sintetizar criticamente as evidências científicas disponíveis acerca do uso de biossólidos;
- b) Caracterizar, sob os aspectos químicos e físicos, os biossólidos Classe II provenientes da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) de Nova Serrana–MG, quanto aos teores de nutrientes, matéria orgânica e potencial de mineralização;
- c) Avaliar os efeitos da aplicação de doses crescentes de biossólidos (0, 10, 20, 40, 80, 100, 160 t ha⁻¹) sobre as propriedades químicas e físicas do Latossolo Vermelho-Amarelo, incluindo pH, carbono orgânico e disponibilidade de nitrogênio, CTC, fósforo e potássio, após períodos de incubação de 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300, 330 e 360 dias;
- d) Analisar o desenvolvimento inicial da cultura do milho (*Zea mays* L.) submetida à aplicação de biossólidos, por meio da avaliação de parâmetros de crescimento e nutrição, como matéria seca, altura de plantas, diâmetro do caule;
- e) Elaborar um relatório técnico conclusivo sobre o uso sustentável de biossólidos como fertilizante em Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico.

3. ESTRATÉGIAS DE ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO E DE DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA

O presente trabalho foi estruturado em quatro capítulos, e cada um deles foi desenvolvido de acordo com um objetivo específico. Os resultados obtidos ao longo do estudo servirão de base para a elaboração de duas publicações em periódicos científicos, bem como para a produção de um relatório técnico, com o propósito de disseminar os achados de forma ampla e sistemática.

4. DESCRIÇÃO DO OBJETO DE PESQUISA

O objeto de pesquisa deste estudo foi o biossólido classe II, um resíduo sólido proveniente do tratamento de esgoto sanitário, da unidade ETE Nova Serrana/MG. O município apresenta população estimada superior a 100 mil habitantes e economia fortemente baseada no polo calçadista, com predominância de pequenas e médias indústrias e expressiva geração de empregos no setor manufatureiro (IBGE, 2026). O crescimento urbano acelerado nas últimas décadas demandou ampliação da infraestrutura de saneamento, especialmente no que se refere à coleta e ao tratamento de esgotos sanitários (SNIS, 2023).

A ETE Nova Serrana é estruturada para o tratamento de esgoto predominantemente doméstico, sendo composta por reatores anaeróbios de fluxo ascendente (UASB), filtros biológicos percoladores e decantadores secundários, tecnologias amplamente utilizadas no Brasil devido à sua eficiência e viabilidade econômica (Metcalf & Eddy, 2014; Von Sperling, 2016). A estação possui capacidade nominal de 120 L/s e opera com vazão média de aproximadamente 111 L/s, com lançamento do efluente final no córrego Fartura e disposição do lodo gerado em aterro localizado na própria área da ETE, conforme diretrizes de manejo e disposição de lodos de esgoto (Conama, 2006).

O biossólido apresenta elevada concentração de matéria orgânica e nutrientes essenciais, como nitrogênio, fósforo e potássio, que podem ser aproveitados na agricultura. Este biossólido passou por processos de estabilização e desidratação, reduzindo o potencial patogênico e facilitando sua aplicação segura ao solo, conforme demonstrado no laudo da COPASA (ANEXO I).

Biossólidos classe II apresentam propriedades físico-químicas específicas que influenciam seu desempenho agrônômico, incluindo teor de umidade, pH, capacidade de retenção de água e composição nutricional, condições mínimas para um bom desempenho agrônômico. Além disso, são considerados material de interesse ambiental, pois sua correta utilização contribui para a reciclagem de nutrientes, diminuição da disposição em aterros e promoção da sustentabilidade agrícola.

O estudo busca analisar a aplicação desse biossólido no solo, investigando seus efeitos sobre as propriedades químicas do solo e o desenvolvimento inicial de culturas agrícolas, como o milho, a fim de avaliar seu potencial como fertilizante orgânico eficiente e seguro.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, V *et al.* **Sewage sludge and its agricultural potential**. Research, Society and Development, v. 11, n. 3, e14711326200, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i3.262001>. Acesso em: 13 abr. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13979:2015**. Tanques sépticos, Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos. Projeto, construção e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

BOUDJABI, A.; CHENCHOUNI, H. **On the sustainability of land applications of sewage sludge: How to apply the sewage biosolid in order to improve soil fertility and increase crop yield?**. Environmental Science and Pollution Research, v. 28, n. 10, p. 13046-13056, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131122> BRASIL. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). 2023.

EMMANOUIL, C; GIANNAKIS, I; KYZAS, G Z. **Terrestrial bioassays for assessing the biochemical and toxicological impact of biosolids application derived from wastewater treatment plants**. Science of The Total Environment, [S.l.], v. 931, p. 172718, 25 jun. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172718>.

FREITAS, F I M C *et al.* **Mapeamento científico e tecnológico do uso de bio sólidos na recuperação de áreas degradadas e/ou susceptíveis à degradação**. Meio Ambiente, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.47402/ed.ep.c2311416423515>. Acesso em: 13 abr. 2025.

GONÇALVES, R. F. (1998) **Caracterização, técnica de remoção e reciclagem agrícola do lodo de lagoas de estabilização**. Curitiba: PROSAB/FINEP, (Edital 01/96).

LEITÃO, N. C. **Economia circular**: conceitos, práticas e desafios para a sustentabilidade. São Paulo: Atlas, 2015.

LIU, Y Y; PTACEK, C J.; BEAUCHEMIN, S; MACKINNON, T; BLOWES, D W. **Effect of composting and amendment with biochar and woodchips on the fate and leachability of pharmaceuticals in biosolids destined for land application**. Science of the Total Environment, v. 802, p. 151193, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151193>. Acesso em: 24 ago. 2025.

MAIA, F C V *et al.* **Qualidade física do solo após aplicação de lodo de esgoto**. Universidade Federal de Mato Grosso, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.31413/nativa.v6i4.5088>. Acesso em: 13 abr. 2025.

MONTEIRO, S. M.; MOREIRA, M. S.; BARROSO, M. A. **Características físico- hídricas de substratos formulados com lodo de esgoto na produção de mudas de acácia-negra**. Ciência Florestal, v. 29, n. 3, p. 848-861, 2019. DOI: 10.5902/1980509834590. Acesso em: 13 out. 2025

OLIVEIRA, Gesner et al. **Ranking do Saneamento 2025**: estudo atualizado com foco nos 100 municípios mais populosos do Brasil. Versão corrigida. São Paulo: Instituto Trata Brasil, 2025. Disponível em: https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2025/07/Versao-Final-de-Estudo-da-GO-Associados-Ranking-do-Saneamento-de-2025_Rio-Corrigido-V4.pdf. Acesso em 12 abr. 2025.

ONU. **Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. 2015.

PEREIRA, et al. **Potencial de uso agrícola de biossólido oriundo de estação de tratamento de esgoto, Petrolina (PE)**. Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2023v16n4e11698>. Acesso em: 13 abr. 2025.

SPADOTTO, C A. **Gestão de resíduos na produção animal**. In: SPADOTTO, C A.; RIBEIRO, W C. (Org.). Gestão de resíduos na agricultura e agroindústria. São Paulo: FEPAF, 2006. p. 319–317. ISBN 978-85-98187-04-4.

TRANNIN, Isabel Cristina de Barros; SIQUEIRA, José Oswaldo; MOREIRA, Fátima Maria de Souza. **Avaliação agronômica de um biossólido industrial para a cultura do milho**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 40, n. 3, p. 261–269, mar. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2005000300010>. Acesso em: 13 out. 2025.

CAPÍTULO 1. POTENCIAL DE APLICAÇÃO NO SOLO E APROVEITAMENTO AGRÍCOLA DE BIOSSÓLIDOS: Uma Análise Sistemática

RESUMO

Os bioossólidos, derivados de esgotos urbanos e resíduos agropecuários, emergem como alternativa sustentável para a agricultura, promovendo reciclagem de nutrientes e melhoria da qualidade do solo. No Brasil, a aplicação agrícola de bioossólidos assume relevância estratégica diante do elevado volume de lodo gerado nas estações de tratamento de esgoto, considerando que aproximadamente 55% dos municípios brasileiros possuem sistemas de tratamento de esgoto. Esse cenário impõe a necessidade de diretrizes técnicas e marcos regulatórios rigorosos para o manejo, tratamento e destinação final do lodo, de modo a mitigar riscos ambientais. Para a realização deste trabalho, utilizaram-se Revisão Sistemática de Literatura, metodologias como PRISMA e Análise de Conteúdo, além de critérios de seleção e elegibilidade como Qualis CAPES Sucupira e fator de impacto. O *corpus* final foi composto por 12 artigos. Alguns estudos destacaram benefícios como aumento de 25% na retenção hídrica do solo, incremento de 15% no carbono orgânico e redução da dependência de fertilizantes químicos. No entanto, a presença de metais pesados, patógenos e contaminantes orgânicos demanda regulamentação e monitoramento contínuo, conforme a Resolução CONAMA n.º 375/2006 e normas como a ABNT NBR 13.979:2015. A aplicação de doses entre 12 e 20 t/ha melhora propriedades físicas e químicas do solo, como porosidade e CTC, mas varia conforme características edafoclimáticas e origem dos bioossólidos. Apesar dos custos logísticos, a viabilidade econômica é atestada por retornos positivos de até 44,8% sobre o investimento (ROI), aliando benefícios agrônômicos e ambientais. Tecnologias como compostagem, produção de biochar e utilização de bioossólidos como condicionador de solo mitigam riscos de contaminação do solo, uma vez que reduzem o uso de fertilizantes químicos e deposição de rejeitos em aterros. Diante desse cenário, políticas públicas e integração setorial são essenciais para uma expansão segura. Conclui-se que os bioossólidos são estratégicos para a economia circular, exigindo pesquisas contínuas sobre impactos de longo prazo, estabilização de carbono e segurança ambiental.

Palavras-chave: Bioossólidos, fertilidade do solo, sustentabilidade agrícola, economia circular, gestão de resíduos.

ABSTRACT

Biosolids, derived from urban sewage and agricultural waste, are emerging as a sustainable alternative for agriculture, promoting nutrient recycling and improving soil quality. In Brazil, the agricultural application of biosolids is strategically relevant given the high volume of sludge generated in sewage treatment plants, considering that approximately 55% of Brazilian municipalities have sewage treatment systems. This scenario imposes the need for rigorous technical guidelines and regulatory frameworks for the management, treatment, and final disposal of sludge, in order to mitigate environmental risks. This work employed a Systematic Literature Review (SLR) using methodologies such as PRISMA and content analysis, in addition to selection and eligibility criteria such as CAPES Qualis Sucupira and impact factor. The final corpus consisted of 12 articles. Some studies highlighted benefits such as a 25% increase in soil water retention, a 15% increase in organic carbon, and a reduction in dependence on chemical fertilizers. However, the presence of heavy metals, pathogens, and organic contaminants demands regulation and continuous monitoring, according to CONAMA Resolution No. 375/2006 and standards such as ABNT NBR 13.979:2015. Applying doses between 12 and 20 t/ha improves the physical and chemical properties of the soil, such as porosity and cation exchange capacity (CEC), but this varies according to edaphoclimatic characteristics and the origin of the biosolids. Despite logistical costs, economic viability is attested by positive returns of up to 44.8% on investment (ROI), combining agronomic and environmental benefits. Technologies such as composting, biochar production, and the use of biosolids as a soil conditioner mitigate the risks of soil contamination, since they reduce the use of chemical fertilizers and the disposal of waste in landfills. Public policies and sectoral integration are essential for safe expansion. It is concluded that biosolids are strategic for the circular economy, requiring continuous research on long-term impacts, carbon stabilization, and environmental safety.

Keywords: Biosolids, soil fertility, agricultural sustainability, circular economy, waste management.

1. INTRODUÇÃO

Os bio sólidos, provenientes principalmente de estações de tratamento de esgotos urbanos e resíduos agropecuários, têm despertado atenção tanto pelo potencial de reaproveitamento quanto pelos riscos de contaminação ambiental. Seu uso como fertilizante ou insumo industrial destaca-se como uma oportunidade sustentável para o reaproveitamento de recursos no setor agropecuário e agroindustrial (Pereira *et al.*, 2023).

A agropecuária brasileira contribui significativamente para a geração de bio sólidos, especialmente em regiões com alta concentração de produção animal. Além disso, a agroindústria, incluindo o processamento de alimentos, também produz resíduos consideráveis em estações de tratamento de água e esgoto (Spadotto, 2006). Referente ao último censo realizado em 2023 pelo Sistema Nacional de Informações em Saneamento (SNIS), o indicador médio de tratamento de esgoto dos 100 maiores municípios foi de 65,11%, uma leve queda em relação aos 65,55% observados em 2022, resultando em um grande volume de bio sólidos, cuja gestão inadequada pode gerar impactos ambientais significativos (Oliveira *et al.*, 2025).

Nesse cenário, a eficiência na utilização de bio sólidos varia conforme as características climáticas e regionais, tipos de solo, práticas agrícolas locais, bem como as características e origens dos próprios bio sólidos (Trannin *et al.*, 2005). Essa diversidade evidencia a importância de estudos que avaliem os impactos da aplicação de bio sólidos em diferentes contextos edafoclimáticos, bem como a composição dos resíduos e suas interações com o ambiente agrícola (Leoneti *et al.*, 2011; Ribeiro; Ziglio, 2006).

Estudos recentes citaram os benefícios do uso agrícola de bio sólidos no aumento da produtividade (Araújo *et al.*, 2022; Pereira *et al.*, 2023), na recuperação de áreas degradadas (Freitas *et al.*, 2023; Silva *et al.*, 2017) e na melhoria da qualidade do solo, por meio da ciclagem de nutrientes e melhora de sua estrutura (Breda *et al.*, 2020; Maia *et al.*, 2018; Monteiro *et al.*, 2019). Dentre os benefícios do uso de bio sólidos na agricultura, destacam-se a maior retenção de água (Maia *et al.*, 2018; Monteiro *et al.*, 2019), a melhora da aeração e da agregação de partículas do solo (Breda *et al.*, 2020; Monteiro *et al.*, 2019) e também a redução da dependência de fertilizantes químicos (Araújo *et al.*, 2022; Pereira *et al.*, 2023). Sua aplicação pode aumentar indicadores como os teores de carbono e nitrogênio no solo (Boudjabi; Chenchouni, 2021; Kitamura *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2022).

Apesar dos benefícios, existem preocupações relacionadas à presença de componentes tóxicos nos bio sólidos, como metais pesados, resíduos farmacêuticos e produtos

químicos industriais, que podem contaminar o solo, as culturas agrícolas e os recursos hídricos. A bioacumulação desses compostos representa riscos à saúde humana e ao meio ambiente. Por isso, o uso de biossólidos precisa ser regulado, garantindo que atendam a padrões de segurança rigorosos, como os descritos na regulamentação proposta pela ABNT NBR 13.979:2015 (ABNT, 2015; Emmanouil *et al.*, 2024).

O Brasil possui papel central no manejo sustentável de biossólidos, uma vez que é um dos maiores produtores agrícolas do mundo. Alinhado à Agenda 2030 da ONU, o país busca reduzir os impactos ambientais e promover o uso eficiente de recursos naturais. No entanto, a adoção dessa prática enfrenta desafios técnicos, socioambientais e econômicos, como a resistência de agricultores devido ao custo e à percepção de risco (ONU, 2015).

O uso de biossólidos no setor agrícola tem potencial para integrar estratégias de economia circular, diminuindo a dependência de fertilizantes químicos. Para isso, é necessário fortalecer políticas públicas, aprimorar regulamentações e incentivar tecnologias que garantam o manejo seguro e sustentável desses resíduos. Neste contexto, o presente estudo buscou analisar a contribuição científica envolvendo o avanço do conhecimento sobre a aplicação de biossólidos na agricultura, com foco na avaliação de seus impactos ambientais e agrônômicos, incluindo a análise de estoques de carbono no solo como indicador da sustentabilidade do uso desses resíduos, por meio de uma Revisão Sistemática de Literatura (RSL).

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Revisão Sistemática de Literatura

Para a realização deste trabalho, utilizou-se Revisão Sistemática de Literatura (RSL) por meio das plataformas de base de dados e/ou bibliotecas digitais de buscas acadêmicas, como *Scientific Electronic Library OnLine* (SCIELO), Periódicos Capes e *Science Direct*. Além disso, foi empregado o Mendeley (Elsevier 2018) para armazenamento e controle dos artigos selecionados (Quadro 1).

A RSL é um método de pesquisa que busca identificar, avaliar e sintetizar de forma rigorosa e transparente toda a produção científica relevante sobre uma questão ou tema específico. Diferentemente de uma revisão tradicional, que pode ser mais narrativa ou subjetiva, a RSL segue passos predefinidos e critérios claros, garantindo reprodutibilidade e menor viés; entre outras características, as modulações normativas da replicabilidade e da confiabilidade (Kitchenham, 2007).

Quadro 1. Bases de Dados e Bibliotecas Digitais

Base de Dados/Biblioteca Digital	Potencialidades	Sítio Eletrônico
Scientific Electronic Library OnLine (SciELO)	Acesso gratuito a periódicos e artigos científicos, com foco em países da América Latina e Caribe.	https://scielo.org/
Periódicos Capes	Reúne uma ampla gama de periódicos e bases de dados científicas nacionais e internacionais, com acesso a artigos completos em diversas áreas do conhecimento.	https://www.periodicos.capes.gov.br/
Science Direct	Oferece uma vasta coleção de artigos de periódicos e capítulos de livros nas áreas de ciências, tecnologia, medicina e ciências sociais, com foco em pesquisas atuais.	https://www.sciencedirect.com/
Mendeley (Elsevier 2018)	Plataforma para armazenamento, organização e compartilhamento de artigos e referências bibliográficas, além de redes colaborativas entre pesquisadores.	https://www.mendeley.com/

Fonte: A autora (2026).

Para a realização das buscas e seleção dos trabalhos, foram adotados os seguintes filtros: (i) Artigos de revistas científicas avaliadas como superior a C, pelo portal Qualis Capes Periódico; (ii) Artigos publicados no período de 2017 a 2024, em função do escopo de estudo deste trabalho (panorama atual); (iii) Fator de impacto das revistas científicas; (iv) Número de citações bibliográficas; (v) Acesso livre ou artigos suportados pela Comunidade Acadêmica Federada (CAFe), provida pela Rede Nacional de Ensino e Pesquisa (RNP), que disponibiliza artigos gratuitamente para as instituições federais brasileiras associadas. Realizaram-se as buscas dos artigos com base nas palavras-chave e operadores booleanos no marco temporal selecionado, conforme destacado no Quadro 2.

Quadro 2. Bases de Dados e Bibliotecas Digitais

Idioma	Palavras-chave	Operadores Booleanos
Português	biossólidos, fertilidade do solo, caracterização, características, aplicação de biossólidos, impacto ambiental	e
Inglês	<i>biosolid, soil fertility, characterization, characteristics, biosolids application, environmental impact</i>	<i>and</i>

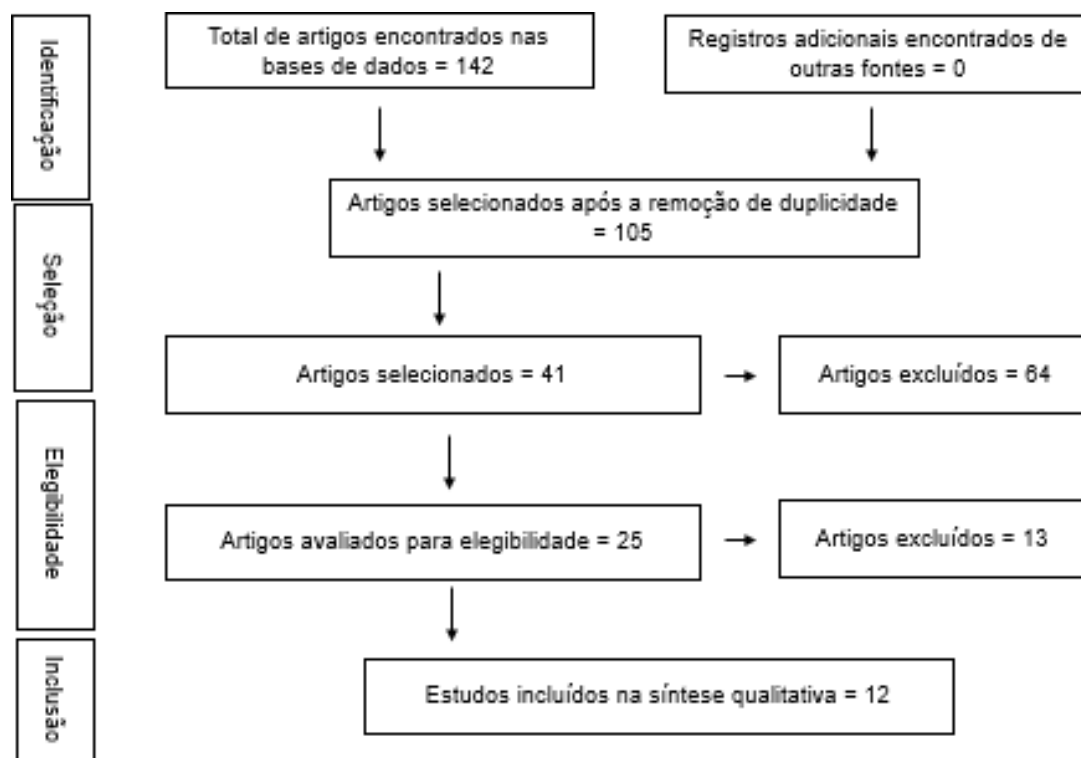
Fonte: A autora (2026).

Para a fase de coleta de dados, optou-se por utilizar uma adaptação *Systematic Reviews and meta-analyses of studies* (PRISMA), proposta por Galvão *et al.* (2015), devido ao grande número de artigos relacionados, sendo que o período para coleta de dados foi definido considerando-se os últimos anos (2017 a 2024).

Foram excluídos da seleção os trabalhos caracterizados como sendo provenientes de literatura cinzenta, sendo esses os que não possuem ampla circulação, não estando ao alcance da comunidade científica, tais como os trabalhos de conclusão de curso, dissertação de mestrado, tese de doutorado, artigos publicados em anais de congresso e informes técnicos ou institucionais, caracterizados, muitas vezes, como pobres em linguagem técnica, com resultados questionáveis e também como, normalmente, escritos em idioma diferente do inglês - idioma científico universal - e sem nenhum fator de impacto.

A partir da coleta de dados para a revisão sistemática da literatura (RSL) nas plataformas previamente listadas, utilizando a sugestão da Metodologia PRISMA, foi encontrado um total de 142 resultados, conforme exposto no fluxograma (Figura 1).

Figura 1. Fluxograma de prisma apontando o percurso metodológico de buscas de informações bibliográficas nas diferentes fases da revisão sistemática



Fonte: A autora (2026).

A seleção criteriosa dos estudos que compõem a RSL seguiu um protocolo sistemático, fundamental para assegurar rigor metodológico, confiabilidade dos resultados e alinhamento com os objetivos da pesquisa. A etapa inicial consistiu na identificação de publicações em múltiplas bases de dados, procedimento que, embora amplie o alcance da busca, resulta inevitavelmente na ocorrência de duplicatas. Assim, a remoção de 37 artigos repetidos constituiu uma fase indispensável para garantir a unicidade da amostra e evitar a superestimação de evidências, assegurando maior precisão e transparência ao processo de revisão.

Na sequência, realizou-se a triagem por título, etapa estratégica voltada à exclusão preliminar de estudos cujo foco temático se distanciava claramente do escopo desta pesquisa. Foram eliminados 66 artigos que abordavam, por exemplo, o tratamento de efluentes industriais, a gestão de resíduos urbanos sem enfoque agrícola ou aplicações em wetlands construídos. Essa fase, embora rápida, desempenha papel central na otimização do processo analítico, permitindo concentrar esforços apenas nos trabalhos potencialmente relevantes e

evitando dispersão em análises que não contribuiriam de forma direta para a discussão proposta.

Posteriormente, a triagem por resumo possibilitou uma avaliação mais aprofundada do conteúdo dos estudos remanescentes. Nessa etapa, 16 artigos foram excluídos por não atenderem aos critérios centrais da pesquisa, apesar de mencionarem biossólidos ou lodo de esgoto. Observou-se que muitos desses trabalhos se restringiam a aspectos microbiológicos, logísticos ou relacionados ao tratamento primário dos resíduos, sem analisar seus efeitos sobre as propriedades do solo ou parâmetros agronômicos de culturas agrícolas. Tal exclusão foi necessária para manter a coerência temática e garantir que a revisão se concentrasse nos impactos agronômicos e ambientais do uso de biossólidos.

A análise do texto completo, associada à aplicação dos critérios de elegibilidade, constituiu a etapa mais crítica e analiticamente densa do processo. Os 23 artigos selecionados até então foram submetidos a uma leitura integral, sendo avaliados quanto à qualidade metodológica, consistência dos resultados e relevância científica. A Análise de Conteúdo, conforme proposta por Bardin (2011), foi utilizada como ferramenta metodológica para a exploração sistemática do material, permitindo a identificação de limitações que justificaram a exclusão final de quatro estudos. Entre os principais problemas detectados, destacaram-se a ausência de clareza metodológica, resultados inconclusivos ou pouco aplicáveis e vieses experimentais, como a falta de grupo-controle ou de replicações estatísticas.

Ao final do processo de triagem, das 142 publicações inicialmente identificadas, 130 foram excluídas com base em critérios explícitos, sistemáticos e metodologicamente fundamentados. O *corpus* final, composto por 12 artigos, reúne estudos que apresentam clareza metodológica, resultados diretamente relacionados aos objetivos desta dissertação e contribuições consistentes para a compreensão da aplicação agronômica segura e sustentável de biossólidos. Esse rigor no processo de seleção confere solidez à discussão subsequente, assegurando que as análises e interpretações estejam apoiadas nas evidências mais robustas e pertinentes disponíveis na literatura científica.

Os principais achados encontram-se no Quadro 3. Após a seleção criteriosa dos artigos, eles foram separados em grupos temáticos, e o resultado foi explorado na RSL.

Quadro 3. Artigos selecionados com base nos critérios de inclusão

Autor(es)	Tipo de Solo	Tipo de Biossólido	Características avaliadas
Caldeira et al., 2018	Substrato (lodo + vermiculita + resíduos)	Lodo de esgoto compostado	Potencial agrícola na qualidade de mudas
Araújo et al., 2022	Latossolo Vermelho-Amarelo (cultivo de Urochloa)	Lodo de esgoto	Potencial agrícola na fertilidade e crescimento de Brachiaria (macro e micronutrientes)
Breda et al., 2020	Solos tropicais (Cerrado – naturalmente pobres)	Lodo de esgoto compostado	Potencial agrícola no desempenho agrônômico (soja)
Bittencourt et al., 2023	(Não específico)	Lodo de esgoto	Sorção de poluentes orgânicos emergentes em lodo/biossólido (caracterização físico-química relevante para risco ambiental)
Emmanouil et al., 2024	(Não específico)	Biossólidos de resíduos urbanos	Impacto bioquímico e toxicológico da aplicação de biossólidos (contexto ecológico e toxicológico)
Freitas et al., 2023	Solo degradado (Neossolo/Latossolo)	Lodo de esgoto	Uso do lodo na recuperação de áreas degradadas e efeito nas características do solo físico-químico (fertilidade, estrutura)
Jardim; Almeida, 2022	Solo/substrato para produção de mudas	Lodo de esgoto + resíduos (substrato com biocarvão ou misturas)	Potencial de uso agrícola e efeito em substratos
Maia et al., 2018	Latossolo (fertilidade em campo)	Lodo de esgoto	Qualidade física do solo após aplicação de lodo (agregação, porosidade)
Monteiro et al., 2019	Solos tropicais (Eucalipto em campo)	Lodo de esgoto	Efeito do lodo nas características físico-hídricas do solo em viveiros e campo
Oliveira, 2017	Solo agrícola (campo)	Lodo de esgoto	Potencial agrícola (fertilidade e produção)
Pereira et al., 2023	Solo de Petrolina (Argissolo/Latossolo)	Biossólido resíduos de ETE	Potencial agrícola (fertilidade e produção)
Silva et al., 2017	Solo florestal (substratos para mudas)	Biossólido de lodo de esgoto	Potencial agrícola na qualidade de mudas

Fonte: A autora (2026).

A taxa de exclusão de 91,5% (130 dos 142 artigos inicialmente identificados) decorreu da aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, definidos com o objetivo de garantir

coerência temática, qualidade metodológica e relevância científica à revisão. A maioria das exclusões esteve associada à duplicidade nas bases pesquisadas e ao desalinhamento dos estudos em relação ao escopo da pesquisa, uma vez que muitos trabalhos abordavam o lodo de esgoto sob perspectivas voltadas exclusivamente ao tratamento, à gestão de resíduos ou a análises microbiológicas e toxicológicas, sem avaliar seus efeitos sobre as propriedades do solo ou parâmetros agronômicos de culturas agrícolas.

O *corpus* final, composto por 12 artigos, apresenta consistência e convergência nos resultados, assegurando que as conclusões desta dissertação se baseiem em evidências robustas e metodologicamente confiáveis.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os artigos selecionados foram divididos em quatro linhas de estudo, pois seu agrupamento em compartimentos permite melhor visualização e análise dos trabalhos pesquisados (Quadro 4).

Quadro 4. Linhas de estudo adotadas

Linhas de estudo	Definição
LE A	Uso de lodo de esgoto na agricultura
LE B	Impactos ambientais e riscos do uso de lodo
LE C	Dinâmica dos estoques de carbono em solos tratados com bioossólidos
LE D	Custos de aplicação e utilização

Fonte: A autora (2026).

3.1 Uso de lodo de esgoto na agricultura

Esta linha temática reúne estudos que exploram a aplicação prática do lodo de esgoto tratado (bioossólido) como recurso agrícola, destacando sua viabilidade para fertilização, produção de mudas e melhoria da qualidade física do solo.

Segundo a literatura científica e a legislação brasileira vigente, especialmente a Resolução CONAMA n.º 375/2006 (Brasil, 2006), os bioossólidos correspondem a lodos de esgoto submetidos a processos de tratamento e estabilização de natureza física, química e/ou biológica, destinados à redução da carga de patógenos, da atividade biológica residual e de odores.

Tais procedimentos visam garantir condições mínimas de segurança sanitária e ambiental, possibilitando sua aplicação agrícola de forma controlada e tecnicamente orientada, desde que atendidos os critérios de qualidade, monitoramento e manejo estabelecidos pelas normas regulatórias. Sua eficácia depende diretamente da composição do material, que varia conforme a origem, o tratamento na estação de esgoto (ETE) e os processos de estabilização adotados (Quadro 5).

Quadro 5. Artigos selecionados com base nos critérios preestabelecidos na temática LE A: Uso de lodo de esgoto na agricultura

Autor(es)	Artigo	Revista	Qualis (Capes)	Fator de Impacto
Caldeira et al., 2018	<i>Solid urban waste in the production of Aegiphila sellowiana Cham. Seedlings</i>	AGRIAMBI	A4	2.5
Maia et al., 2018	Qualidade física do solo após aplicação de lodo de esgoto	Nativa	B4	0.3
Monteiro et al., 2019	Características físico-hídricas de substratos formulados com lodo de esgoto na produção de mudas de acácia-negra	Ciência Florestal	B2	0.4
Pereira et al., 2023	Potencial de uso agrícola de biossólido oriundo de estação de tratamento de esgoto, Petrolina (PE)	Revista em Agronegócio e Meio Ambiente	A4	0.2
Breda et al., 2020	<i>Successive sewage sludge fertilization: Recycling for sustainable agriculture</i>	Waste Management	A1	1.7

LE: Linha de estudo

Fonte: A autora (2026).

Os biossólidos apresentam composição variável quanto aos teores de matéria orgânica (MO), nutrientes, metais pesados e patógenos, variação essa diretamente relacionada à origem do esgoto, às características da estação de tratamento de esgoto (ETE) e ao tipo de tratamento empregado (Monteiro *et al.*, 2019). De modo geral, a MO representa uma fração expressiva desses resíduos, variando entre 40 e 70% da matéria seca, o que reflete o grau de estabilização do lodo ao final do processo de tratamento (Monteiro *et al.*, 2019; Maia *et al.*, 2018). A elevada presença de MO confere aos biossólidos potencial significativo como condicionadores de solo, uma vez que sua incorporação contribui para a melhoria da estrutura física, o aumento dos estoques de carbono e a elevação da capacidade de troca catiônica (CTC), além de favorecer a retenção de água e a aeração do solo (Monteiro *et al.*, 2019).

A disponibilidade de nutrientes nos biossólidos também apresenta elevada variabilidade, sendo influenciada pela origem do esgoto, pelo tipo de tratamento adotado na ETE e pelo grau de estabilização da matéria orgânica. O nitrogênio ocorre predominantemente

nas formas orgânica e amoniacal, com teores totais que podem variar entre 20 e 60 g kg⁻¹, dos quais apenas uma fração se torna prontamente disponível às plantas, em função da taxa de mineralização no solo (Maia *et al.*, 2018; Monteiro *et al.*, 2019). O fósforo, por sua vez, é encontrado em concentrações geralmente elevadas, variando entre 10 e 30 g kg⁻¹, porém sua disponibilidade é fortemente condicionada à forma química predominante e às interações com óxidos de ferro e alumínio, especialmente em solos tropicais altamente intemperizados (Pereira *et al.*, 2023; Spadotto, 2006). O potássio ocorre em menores teores, normalmente entre 2 e 10 g kg⁻¹, em razão de sua elevada solubilidade e das perdas durante os processos de tratamento do esgoto, apresentando liberação mais imediata, porém limitada para suprir integralmente as exigências nutricionais das culturas agrícolas (Monteiro *et al.*, 2019; Oliveira, 2017).

No que se refere aos metais pesados, suas concentrações variam principalmente em função da contribuição de efluentes industriais ao esgoto sanitário. Entretanto, biossólidos destinados ao uso agrícola, geralmente, apresentam teores abaixo dos limites estabelecidos pela legislação, com valores médios de Zn (300–3.000 mg kg⁻¹), Cu (100–1.500 mg kg⁻¹), Pb (50–300 mg kg⁻¹), Cd (1–10 mg kg⁻¹) e Cr (50–1.000 mg kg⁻¹) (Monteiro *et al.*, 2019; ABNT, 2015). A presença de patógenos, por sua vez, depende do grau de higienização do material, sendo significativamente reduzida em biossólidos Classe II submetidos a processos como digestão anaeróbia, compostagem ou caleação, embora ainda sejam necessárias restrições e cuidados específicos para seu uso agrícola (Monteiro *et al.*, 2019; ABNT, 2015).

Além dos efeitos físicos e químicos, a incorporação da MO dos biossólidos ao solo pode estimular a atividade biológica, favorecendo o desenvolvimento de microrganismos benéficos e promovendo um ambiente edáfico mais equilibrado e funcional para o crescimento das plantas. Esse efeito é particularmente relevante em solos empobrecidos ou degradados por atividades antrópicas, nos quais os biossólidos podem atuar como condicionadores, melhorando simultaneamente a estrutura, a fertilidade e a capacidade de recuperação da vegetação (Monteiro *et al.*, 2019; Freitas *et al.*, 2023).

Caldeira *et al.* (2018) demonstraram que a utilização de resíduos sólidos urbanos na produção de mudas de *Aegiphila sellowiana* constitui uma alternativa viável e sustentável, contribuindo para a redução do volume de resíduos destinados à disposição final. De forma semelhante, Monteiro *et al.* (2019) observaram que substratos formulados com lodo de esgoto para a produção de mudas de acácia-negra promoveram melhorias significativas na retenção de água e na aeração, resultando em maior crescimento das plantas. Maia *et al.* (2018), por sua vez, evidenciaram que a aplicação de lodo de esgoto em solos agrícolas favorece a melhoria de atributos físicos, como densidade, porosidade e resistência à penetração, reforçando a eficiência

dos bioossólidos como condicionadores do solo. Os principais benefícios e limitações do uso de bioossólidos estão previstos na Tabela 1, a seguir.

Tabela 1. Bioossólidos: benefícios e limitações

Autores	Dose que maximiza o valor da variável (t/ha)	Principais Benefícios	Limitações
Liu et al. (2022)	15	↑ Matéria Orgânica (MO): +10%, ↑ CTC: +15%	Metais pesados
Pamuru et al. (2024)	20	↑ Retenção de Água: +25%, ↑ Estrutura do Solo: +20%, ↑ CTC: +18%	Custo de transporte
Pereira et al. (2023)	12	↑ Nutrientes: +30%, ↑ Teor de MO: +25%	Patógenos
Freitas et al. (2023)	16	↑ Qualidade do solo: +20%, ↑ Fertilidade: +22%	Risco de saturação
Silva et al. (2017)	14	↑ Crescimento de plantas: +35%, ↑ Biomassa: +40%	Acúmulo de substâncias tóxicas
Bittencourt et al. (2017)	17	↑ Eficiência nutricional do solo: +28%	Reação com pH do solo

Fonte: A autora (2026).

A análise comparativa dos estudos evidencia que a dose que maximiza o valor da variável de aplicação de bioossólidos no solo variou, de modo geral, entre 12 e 20 t ha⁻¹, sendo essa variação fortemente condicionada pelo objetivo agrônomo, pelas características do solo e pelo tipo de bioossólido utilizado. Os efeitos do uso do bioossólido foram amplamente discutidos sob a perspectiva da fertilidade do solo e da disponibilidade de nutrientes. Pereira *et al.* (2023) demonstraram que a aplicação de 12 t ha⁻¹ de bioossólido proveniente de estação de tratamento de esgoto em Petrolina (PE) promoveu incrementos expressivos nos teores de nitrogênio total (17,84%), fósforo (0,02 g kg⁻¹) e potássio (0,15 g kg⁻¹), ressaltando, entretanto, a necessidade de monitoramento contínuo quanto à presença de patógenos. De forma semelhante, Silva *et al.* (2017) observaram resposta positiva no crescimento vegetal e no acúmulo de biomassa com a aplicação de 14 t ha⁻¹, embora tenham destacado o risco potencial de acúmulo de substâncias tóxicas em aplicações sucessivas.

Em doses intermediárias, Freitas *et al.* (2023) verificaram que a aplicação de 16 t ha⁻¹ favoreceu significativamente a fertilidade e a qualidade do solo, refletindo em melhorias

nos atributos químicos e físicos. No entanto, os autores alertam que aplicações excessivas podem levar à saturação do solo, especialmente em ambientes com baixa capacidade de drenagem ou elevada argilosidade. Pamuru *et al.* (2024) relataram ganhos substanciais na retenção de água, na estruturação do solo e no aumento da capacidade de troca catiônica (CTC), na dose de 20 t ha⁻¹ apontando, contudo, o elevado custo logístico do transporte como principal entrave à adoção em larga escala. Bittencourt *et al.* (2017), por sua vez, destacaram o aumento da eficiência nutricional, fortemente condicionado às alterações no pH do solo decorrentes da aplicação do biossólido.

De forma integrada, os resultados indicam que a definição da dose ideal de biossólidos não pode ser generalizada, devendo considerar as características edáficas locais, o histórico de uso da área, o tipo de biossólido e os objetivos do sistema produtivo. Embora doses mais elevadas apresentem potencial para maximizar benefícios físicos e químicos do solo, elas também ampliam os riscos ambientais, como acúmulo de metais, patógenos e desequilíbrios nutricionais. Assim, a adoção de doses intermediárias, aliada ao monitoramento contínuo dos atributos do solo e à avaliação do custo-benefício operacional, emerge como estratégia mais segura e sustentável para o uso agrônomo de biossólidos em sistemas agrícolas.

3.2 Aspectos de toxicidade e impacto ambiental

Aspectos de toxicidade e impacto ambiental também foram levantados em diferentes estudos (Quadro 6). Estudos como o de Emmanouil *et al.* (2024) demonstram que, embora os biossólidos possam melhorar as propriedades do solo, certos componentes químicos presentes nesses materiais podem ser tóxicos. Esses compostos incluem metais pesados (como cádmio, chumbo e mercúrio), resíduos farmacêuticos, produtos químicos industriais e até patógenos que podem ser transportados para as culturas agrícolas ou contaminar os recursos hídricos. A bioacumulação desses compostos nas plantas ou na fauna local pode representar um risco para a saúde humana e ambiental a longo prazo. Como o processo de tratamento não elimina todos os contaminantes, o uso de biossólidos precisa ser regulado de forma rigorosa, garantindo que os parâmetros de segurança sejam respeitados.

Quadro 6. Artigos selecionados com base nos critérios preestabelecidos na temática LE B: Aspectos de toxicidade e impacto ambiental

Autor(es)	Artigo	Revista	Qualis (Capes)	Fator de Impacto
Jardim; Almeida, 2022	Caracterização do biocarvão produzido a partir do lodo de esgoto doméstico, visando à disposição agrícola	Revista DAE	B1	-
Silva et al., 2017	<i>Potential impacts of using sewage sludge biochar on the growth of plant forest seedlings</i>	Ciência Rural	A4	-
Bittencourt et al., 2023	Sorção de poluentes orgânicos emergentes em lodo de esgoto	Eng Sanit Ambient	A4	0.5
Emmanouil; Giannakis; Kyzas, 2024	<i>Terrestrial bioassays for assessing the biochemical and toxicological impact of biosolids application derived from wastewater treatment plants</i>	Science of The Total Environment	A1	8

LE: Linha de estudo

Fonte: A autora (2026).

Jardim e Almeida (2022) ressaltam a necessidade de um monitoramento contínuo da qualidade dos bio sólidos, principalmente no que diz respeito à presença de metais pesados, resíduos industriais e patógenos. Eles destacam que a produção de biocarvão a partir de lodo de esgoto pode ajudar a mitigar alguns dos impactos negativos, já que o processo de pirólise (aquecimento em alta temperatura sem oxigênio) pode reduzir a toxicidade de certos compostos, promovendo a transformação de substâncias químicas em formas mais estáveis e menos bioativas. No entanto, isso não elimina o risco de poluição se não for feito corretamente.

A necessidade de controle rigoroso é reforçada por experiências práticas, como a descrita por Bittencourt *et al.* (2017), que detalham o processo de gestão do uso agrícola de lodo de esgoto no Paraná, onde a higienização dos bio sólidos por Estabilização Alcalina Prolongada (EAP) elevava o pH do material a 12, com período de cura de 30 dias, alcançando-se uma redução média de 89% nos níveis de parâmetros inorgânicos em relação aos limites estabelecidos pela Resolução SEMA 021/09 do Estado do Paraná.

A prática de monitoramento das áreas agrícolas após aplicação, exigida pela legislação estadual do Paraná (SEMA n.º 021/09), mostra que, quando bem regulada, a aplicação de biossólidos pode se tornar uma solução eficaz para o destino final de resíduos urbanos, aliando benefícios econômicos e ambientais à segurança dos sistemas produtivos. No entanto, a expansão dessa prática ainda enfrenta barreiras relacionadas à infraestrutura, custos logísticos e desconfiança por parte dos agricultores, especialmente em regiões com menor articulação entre os setores de saneamento e agricultura.

A eficácia e segurança do uso de biossólidos dependem de uma gestão rigorosa e de um monitoramento contínuo, o que envolve análises laboratoriais periódicas para verificar a presença de contaminantes, controle das taxas de aplicação conforme as necessidades das plantas e a capacidade do solo, e o acompanhamento da resposta vegetal para evitar toxicidade (Araújo *et al.*, 2022).

Solos degradados, frequentemente, apresentam elevados níveis de contaminantes, como metais pesados e patógenos, que podem ser transferidos para as plantas ou para os ecossistemas locais. Portanto, a aplicação de biossólidos deve ser feita de forma controlada, com a análise prévia da sua composição e a avaliação dos riscos ambientais (Caldeira *et al.*, 2018).

Os biossólidos, quando tratados e compostados corretamente, podem ser aplicados para ajudar na recuperação de áreas contaminadas, estabilizando os contaminantes e promovendo a regeneração do solo sem prejudicar a saúde ambiental ou humana (Emmanouil *et al.*, 2024; Jardim; Almeida, 2022).

3.3 Dinâmica dos estoques de carbono em solos tratados com biossólidos

Os artigos desta linha realizam um mapeamento científico-tecnológico do uso de biossólidos em áreas susceptíveis à degradação, evidenciando seu potencial para regeneração ambiental e contribuição à mitigação das mudanças climáticas (Quadro 7).

Quadro 7. Artigos selecionados com base nos critérios preestabelecidos na temática LE C: Dinâmica dos estoques de carbono em solos tratados com biossólidos

Autor(es)	Artigo	Revista	Qualis (Capes)	Fator de Impacto
Freitas et al., 2023	Mapeamento científico e tecnológico do uso de biossólidos na recuperação de áreas degradadas e/ou susceptíveis à degradação	Meio Ambiente	B3	-
Jardim; Almeida, 2022	Caracterização do biocarvão produzido a partir do lodo de esgoto doméstico, visando à disposição agrícola	Revista DAE	B1	-
Silva et al., 2017	<i>Potential impacts of using sewage sludge biochar on the growth of plant forest seedlings</i>	Ciência Rural	A4	-
Monteiro et al., 2019	Características físico-hídricas de substratos formulados com lodo de esgoto na produção de mudas de acácia-negra	Ciência Florestal	B2	0.4

LE: Linha de estudo

Fonte: A autora (2026).

Os biossólidos também apresentam, em sua composição, as substâncias húmicas, como os ácidos húmicos e fúlvicos. Essas substâncias desempenham um papel crucial na melhoria da qualidade do solo, pois, além de promoverem o sequestro de carbono, ajudam a estabilizar o solo, aumentando a sua resistência à erosão e favorecendo a retenção de nutrientes. As substâncias húmicas também contribuem para a sustentabilidade agrícola ao melhorar a capacidade do solo de reter e liberar nutrientes de forma eficiente, beneficiando as plantas a longo prazo (Monteiro *et al.*, 2019; Silva *et al.*, 2017).

A valoração dos biossólidos, especialmente aqueles oriundos de lodo de esgoto, pode representar uma estratégia vantajosa tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico, desde que sejam adotados cuidados rigorosos na gestão e aplicação (Garcia *et al.*, 2010; Monteiro *et al.*, 2019). Uma alternativa promissora para mitigar os riscos associados ao uso de biossólidos é a produção de biocarvão, que pode ser gerado a partir do lodo de esgoto, através de processos de pirólise. Esse método transforma os compostos químicos presentes no lodo em

formas mais estáveis e menos bioativas, reduzindo a toxicidade dos bio sólidos e aumentando sua segurança para a aplicação agrícola. Além disso, a adição de biocarbão ao solo pode potencializar os benefícios do uso de bio sólidos, como a melhoria na retenção de carbono e a estabilização de contaminantes, promovendo um ciclo mais sustentável de reaproveitamento de resíduos (Jardim; Almeida, 2022).

Além dos impactos positivos da aplicação de bio sólidos, Liu *et al.* (2022) demonstraram que o efeito estabilizador do carbono no solo é uma característica importante do processo. A interação entre os compostos orgânicos dos bio sólidos e os minerais do solo resulta na formação de complexos argila-húmicos, que são mais resistentes à decomposição microbiana, o que contribui para o armazenamento de carbono de longo prazo. O estudo indicou que, após a aplicação de bio sólidos, os estoques de carbono orgânico no solo aumentaram entre 1,5 e 2 t C/ha por ano, com um impacto significativo na estrutura do solo, melhorando sua capacidade de retenção de nutrientes e água.

Freitas *et al.* (2023) avaliaram a aplicação de bio sólidos em solos tropicais, destacando os benefícios da introdução de MO para o aumento dos estoques de carbono, além da melhoria da fertilidade e da retenção de água. Os autores observaram que a aplicação de 20 t/ha de bio sólido em solo tropical resultou em um aumento de 25% na capacidade de retenção de água, o que facilitou a recuperação de áreas degradadas. O estoque de carbono orgânico no solo aumentou em até 15% nas primeiras safras após a aplicação, com uma liberação mais gradual de nutrientes como nitrogênio e fósforo, contribuindo para a melhoria da fertilidade do solo. A presença de substâncias húmicas, provenientes dos bio sólidos, também desempenhou um papel importante na estabilização do carbono no solo, promovendo um efeito duradouro na qualidade e saúde deste.

Com base nos resultados obtidos por diversos estudos sobre o impacto da aplicação de bio sólidos no solo, é possível sugerir algumas propostas para estudos futuros que possam aprofundar o conhecimento sobre esses processos e expandir suas aplicações práticas. Uma linha promissora é a avaliação dos efeitos a longo prazo da aplicação de bio sólidos em diferentes tipos de solo, especialmente em solos tropicais, com foco na sustentabilidade e na recuperação de áreas degradadas. A continuidade de estudos como o de Freitas *et al.* (2023), que mostraram melhorias significativas na capacidade de retenção de água e no estoque de carbono, pode fornecer dados valiosos para o manejo sustentável de solos agrícolas.

Outro aspecto importante é a investigação sobre a dinâmica do carbono a partir da interação entre os bio sólidos e os minerais do solo, com ênfase na estabilidade do carbono a longo prazo, como observado por Liu *et al.* (2022). A compreensão dessa interação pode

melhorar a eficácia das práticas de sequestro de carbono, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas. Além disso, estudos sobre os impactos ambientais do uso contínuo desses materiais, incluindo a bioacumulação de contaminantes, como metais pesados, são essenciais para garantir a segurança do seu uso em larga escala, conforme indicado por Silva *et al.* (2017) e Boudjabi e Chenchouni (2021).

Além dos benefícios diretos no aumento dos teores de carbono orgânico, como evidenciado por Boudjabi e Chenchouni (2021), a aplicação de biossólidos também contribui para melhorias na fertilidade do solo. No entanto, o sucesso dessas práticas depende fortemente do tipo de solo e das condições climáticas locais; em solos mais arenosos, os efeitos da aplicação de biossólidos são menos pronunciados, com ganhos de apenas 1,2 t C/ha no primeiro ano de aplicação.

3.4 Viés econômico do uso de biossólidos

Esta linha engloba análises técnicas, econômicas e regulatórias relacionadas à aplicação de biossólidos. Os estudos abordam desde a sorção de poluentes emergentes até avaliações toxicológicas e críticas a normas (como a Resolução CONAMA n.º 498/2020). Os trabalhos destacam desafios como custos operacionais, riscos associados a contaminantes e a necessidade de diretrizes claras para garantir a segurança e a viabilidade econômica do uso agrícola do lodo (Quadro 8).

O lodo de esgoto, quando tratado adequadamente, torna-se um biossólido com características que permitem seu uso agrícola, principalmente devido ao seu alto teor de MO, nitrogênio e fósforo. A compostagem, processo que transforma a matéria fresca em húmus, é fundamental nesse contexto, pois transforma os resíduos em uma fonte estável de nutrientes. Embora o valor agrônômico do composto seja frequentemente associado ao teor de nutrientes minerais, seu valor vai além disso, já que também melhora as propriedades físicas e químicas do solo, promovendo uma estrutura mais saudável e sustentável (Gonçalves, 1998). A utilização de biossólidos na agricultura pode, portanto, reduzir a dependência de fertilizantes químicos, oferecendo uma alternativa mais ecológica e sustentável (Silva *et al.*, 2020).

Quadro 8. Artigos selecionados com base nos critérios preestabelecidos na temática LE C: Dinâmica dos estoques de carbono em solos tratados com bioossólidos

Autor(es)	Artigo	Revista	Qualis (Capes)	Fator de Impacto
Freitas et al., 2023	Mapeamento científico e tecnológico do uso de bioossólidos na recuperação de áreas degradadas e/ou susceptíveis à degradação	Meio Ambiente	B3	-
Silva et al., 2017	<i>Potential impacts of using sewage sludge biochar on the growth of plant forest seedlings</i>	Ciência Rural	A4	-
Araújo et al., 2022	<i>Sewage sludge and its agricultural potential</i>	<i>Research, Society and Development</i>	C	0.11
Pereira et al., 2023	Potencial de uso agrícola de bioossólido oriundo de estação de tratamento de esgoto, Petrolina (PE)	Revista em Agronegócio e Meio Ambiente	A4	0.2

LE: Linha de estudo

Fonte: A autora (2026).

O uso de bioossólidos, além de ser uma solução de descarte sustentável para as estações de tratamento de esgoto, apresenta benefícios diretos para a agricultura, como a substituição de fertilizantes nitrogenados e fosfatados - elementos não renováveis (Araújo *et al.*, 2022). Vários estudos demonstraram que a utilização de lodo de esgoto aumentou a produtividade das culturas de forma equivalente ou superior à dos fertilizantes convencionais (Tabela 2).

Tabela 2. Viés econômico da utilização de bioossólidos

Autores	Custo de Aplicação (\$/ha)	Economia (\$/ha)	Retorno sobre o investimento (%)
Pereira et al. 2023	150	200	33%
Freitas et al. 2023	160	220	37,50%
Silva et al. 2017	145	210	44,80%
Araújo et al. 2022	140	180	28,60%

Fonte: A autora (2026).

A aplicação agrícola de bioossólidos apresenta vantagens econômicas significativas em relação ao método convencional de adubação química. De acordo com os dados apresentados, os custos de aplicação variam entre US\$ 140 e 160 por hectare, enquanto a economia gerada pelo uso de bioossólidos chega a US\$ 180 a 220 por hectare. Isso resulta em um retorno sobre o investimento que varia de 28,6% a 44,8%, dependendo do estudo analisado (Pereira *et al.*, 2023; Freitas *et al.*, 2023; Silva *et al.*, 2017; Araújo *et al.*, 2022).

Em comparação, o método convencional de adubação, geralmente, envolve custos mais elevados, devido à compra e transporte de fertilizantes químicos, e não gera benefícios adicionais ao solo, como o aumento da matéria orgânica, melhoria da estrutura do solo e retenção de água, que são proporcionados pelo uso de bioossólidos. Além disso, os bioossólidos contribuem para a diminuição de resíduos urbanos destinados a aterros sanitários, oferecendo um retorno ambiental aliado ao econômico.

A viabilidade econômica da aplicação de bioossólidos na agricultura é um aspecto crucial para a adoção dessa prática em larga escala. A análise dos custos e benefícios econômicos da utilização de bioossólidos pode ser determinada pela comparação entre o custo de aplicação por hectare e as economias obtidas com a redução da necessidade de fertilizantes químicos.

Conforme os estudos de Pereira *et al.* (2023), o custo médio de aplicação de bioossólidos é de US\$ 150/ha, enquanto as economias com fertilizantes podem alcançar US\$ 200/ha, resultando em um retorno sobre investimento (ROI) de 33%. De forma semelhante, Freitas *et al.* (2023) reportam um custo de US\$ 160/ha, economia de US\$ 220/ha e ROI de 37,5%, enquanto Silva *et al.* (2017) observaram um ROI ainda maior, de 44,8%, com custo de US\$ 145/ha e economia de US\$ 210/ha. Araújo *et al.* (2022) apontam um custo de US\$ 140/ha, economia de US\$ 180/ha e ROI de 28,6%. Esses dados demonstram que a aplicação de bioossólidos não apenas reduz os custos em comparação ao método convencional de fertilização química, mas também oferece retorno econômico consistente e adicional, aliado aos benefícios agrônômicos do aumento de matéria orgânica e melhoria da estrutura do solo.

É imprescindível ressaltar que os cálculos considerem variáveis regionais, como os custos de transporte e os riscos associados à presença de patógenos ou substâncias tóxicas, que podem impactar o custo final e a eficácia a longo prazo da aplicação dos bioossólidos. Dessa forma, a viabilidade econômica dependerá de uma análise detalhada do contexto local, considerando tanto os custos diretos quanto os benefícios ambientais e produtivos a longo prazo.

No entanto, os custos de produção e aplicação de bioossólidos podem variar de

acordo com a tecnologia empregada, a logística e a distância entre as estações de tratamento e as áreas de aplicação. Um estudo realizado pela Embrapa em 2020 indicou que o custo médio de transporte de biossólidos pode variar entre R\$ 15,00 e R\$ 25,00 t/ha, incluindo transporte, aplicação e incorporação ao solo, chegando a R\$ 293,56 por hectare. Embora os biossólidos sejam, muitas vezes, fornecidos gratuitamente pelas estações de tratamento, os custos de transporte e manejo, especialmente em áreas mais distantes, podem representar um obstáculo significativo para os agricultores.

Entretanto, as alternativas de processamento do lodo de esgoto têm grande impacto nos custos totais. Tecnologias como Wetlands Construídos (WCL) e secagem solar apresentam os menores custos operacionais unitários, com uma redução de até 60% em relação aos sistemas que destinam os lodos a aterros sanitários. A secagem térmica e a compostagem, embora eficazes, têm custos operacionais e de implantação mais elevados.

Ao comparar os custos totais - Despesas de capital (CAPEX) + Despesas operacionais (OPEX) - os Sistemas de tratamento e aproveitamento de resíduos (WCL) e de secagem solar se mostraram significativamente mais econômicos, além de mais sustentáveis ambientalmente, devido ao reaproveitamento dos resíduos e à redução da dependência de métodos de destinação tradicionais, como aterros sanitários (Boratto, 2023).

3.5. Potencial agronômico e restrições ambientais do uso de biossólidos

A presença de MO é um dos pilares relacionados aos benefícios dos biossólidos, pois contribui para a estruturação do solo, aumentando a porosidade, a retenção de água e a capacidade de troca catiônica (CTC). Essas melhorias, por sua vez, favorecem o desenvolvimento de culturas como *Aegiphila sellowiana* e acácia-negra, conforme demonstram os estudos de Caldeira *et al.* (2018) e Monteiro *et al.* (2019). Além disso, a incorporação de biossólidos pode elevar os estoques de carbono no solo, tema que dialoga com a Linha de estudo C, embora o foco aqui seja a aplicação agronômica.

A MO do solo é um indicador sensível das mudanças causadas pelas práticas de uso e ocupação do solo, com o estoque e as formas de carbono orgânico estreitamente relacionados às características químicas e ao manejo adotado (Baldotto *et al.*, 2010). Nos solos tropicais, como os Latossolos, as limitações incluem baixa CTC, intensa fixação de fosfatos nas partículas sólidas e, conseqüentemente, baixa disponibilidade na solução do solo, assim como outros nutrientes, além da alta concentração de alumínio tóxico. Essas limitações podem ser mitigadas com o aumento do carbono orgânico, que melhora a CTC, reduz a adsorção de fósforo e

complexa o alumínio, minimizando sua toxicidade (Santos *et al.*, 2010).

Embora a aplicação de biossólidos traga benefícios imediatos, como o aumento da MO, da CTC e da retenção de água (Pamuru *et al.*, 2024; Liu *et al.*, 2022), a avaliação dos impactos a longo prazo é essencial para garantir a sustentabilidade da técnica. Segundo Freitas *et al.* (2023), a aplicação contínua de biossólidos pode afetar a saturação dos solos com determinados nutrientes, o que, se não controlado, pode comprometer a eficácia do uso e gerar desequilíbrios no ecossistema do solo. Os autores demonstraram que doses de 16 t/ha são eficazes na melhoria da qualidade do solo, mas alertam sobre o risco de saturação, o que pode reduzir a eficácia a longo prazo.

Silva *et al.* (2017) observaram que doses de 14 t/ha favorecem o crescimento das plantas e o aumento de biomassa, mas destacam o risco do acúmulo de substâncias tóxicas. Já Bittencourt *et al.* (2023) recomendaram uma dose de 17 t/ha para otimizar a eficiência nutricional do solo, mas destacaram o desafio de ajustar o pH do solo, especialmente em determinadas regiões. Esses dados indicam a complexidade e a variabilidade da aplicação de biossólidos, reforçando a importância de análises locais para otimizar os benefícios e mitigar as limitações associadas à sua utilização.

Os biossólidos contêm nutrientes essenciais, como nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), que podem ser aproveitados pelas plantas, promovendo seu crescimento e produtividade. Um levantamento com mais de 240 amostras indicou que esses resíduos apresentam, em média, 4,74 % de N, 2,27 % de P e 0,31 % de K (matéria seca) (Oun *et al.*, 2014). Esses nutrientes são liberados lentamente no solo, o que favorece uma fertilização mais sustentável, diminuindo a necessidade de fertilizantes químicos e reduzindo os impactos ambientais da agricultura (Caldeira *et al.*, 2018).

Segundo Freitas *et al.* (2023), os biossólidos ajudam na ciclagem de nutrientes, promovendo uma recuperação gradual da fertilidade do solo, ao mesmo tempo em que reduzem a necessidade de fertilizantes químicos e contribuem para a sustentabilidade agrícola. Seu uso pode resultar em aumentos de até 25% na capacidade de retenção de água e até 40% de incremento na disponibilidade de fósforo e potássio no solo, o que facilita a recuperação gradual da fertilidade. Corroborando esses dados, Maia *et al.* (2018) observaram que a aplicação de biossólidos em um Latossolo Vermelho distrófico promoveu redução da densidade do solo de 1,27 para 1,14 g cm⁻³ e aumento da porosidade total e da microporosidade nas camadas de 0–10 e 10–20 cm de profundidade, especialmente nas doses de 60 a 80 Mg ha⁻¹. Esses resultados demonstram o potencial do biossólido como condicionador do solo, melhorando sua estrutura física e aumentando a capacidade de retenção de água, fatores essenciais para o

desenvolvimento das culturas e a resiliência dos sistemas produtivos frente às variações climáticas.

Além das melhorias físicas e químicas no solo, o uso de biossólidos também se destaca pela contribuição para a reciclagem de MO e para a redução do passivo ambiental associado ao descarte inadequado de lodo de esgoto. Estudos de Boudjabi e Chenchouni (2021) demonstraram que a aplicação de biossólidos pode elevar significativamente os teores de carbono orgânico no solo, com aumentos de até 2,5 t C/ha no primeiro ano de aplicação. Esse efeito foi atribuído à alta quantidade de MO nos biossólidos, que, ao ser incorporada ao solo, contribui para a formação de complexos argila-húmicos, enriquecendo o solo e promovendo o sequestro de carbono.

Liu *et al.* (2022) também investigaram o efeito dos biossólidos na formação e estabilidade do carbono orgânico do solo. Eles observaram que a aplicação de biossólidos pode aumentar a quantidade de carbono armazenado no solo, além de promover a estabilização do carbono a longo prazo, devido à interação entre a MO e os minerais do solo. Silva *et al.* (2017) avaliaram o impacto do uso de um biossólido - o biochar, derivado de lodo de esgoto - na dinâmica do carbono do solo. A aplicação do biossólido aumentou significativamente os estoques de carbono orgânico no solo. As doses aplicadas de 5, 10, 15 e 20 t/ha do biossólido melhoraram a estrutura do solo, aumentando a porosidade e facilitando a retenção de água, o que influenciou positivamente a atividade microbiana e o sequestro de carbono. Nos tratamentos com a aplicação de 20 t/ha, houve uma redução na densidade aparente do solo (de 1,45 g/cm³ para 1,30 g/cm³), indicando também uma melhora na estrutura e na capacidade de retenção de água. Esse efeito de estabilização do carbono é atribuído à capacidade da substância de preservar o carbono no solo, impedindo sua decomposição rápida e promovendo o sequestro de carbono a longo prazo.

De acordo com Araújo *et al.* (2022), a aplicação agrícola de biossólidos representa uma alternativa viável e de baixo custo para o reaproveitamento de resíduos urbanos, reduzindo o volume destinado a aterros sanitários e minimizando os impactos ambientais. No entanto, a Resolução CONAMA n.º 375/2006 estabelece limites para substâncias potencialmente tóxicas e critérios de qualidade sanitária e agrônômica, sendo um marco regulatório fundamental para assegurar a viabilidade ambiental do uso agrícola do lodo tratado. Esses limites variam conforme a classe do biossólido (Classe A ou Classe B) e são expressos em miligramas por quilograma de sólidos totais (mg/kg, base seca) (Tabela 3).

Tabela 3. Limites para substâncias potencialmente tóxicas

Substância Inorgânica	Limite Classe I (mg/kg)	Limite Classe II (mg/kg)
Arsênio (As)	41	75
Cádmio (Cd)	39	85
Chumbo (Pb)	300	840
Cobre (Cu)	1.500	4300
Cromo (Cr)	1.000	3.000
Merúrio (Hg)	17	57
Molibdênio (Mo)	50	75
Níquel (Ni)	420	420
Selênio (Se)	36	100
Zinco (Zn)	2.800	7500

Fonte: Brasil (2006).

Esses limites visam evitar a contaminação do solo e das plantas, promovendo o uso seguro dos bio sólidos na agricultura. É importante ressaltar que os bio sólidos classificados como Classe A atendem aos critérios de qualidade sanitária e agrônômica estabelecidos pela resolução, permitindo sua aplicação em áreas agrícolas destinadas à produção de alimentos. Já os bio sólidos da Classe B atendem apenas aos critérios de qualidade agrônômica, sendo sua aplicação restrita a áreas não destinadas à produção de alimentos (Brasil, 2006).

Em estudos realizados por Pereira *et al.* (2023), o bio sólido avaliado, oriundo de ETE, apresentou um teor de nitrogênio total de 17,84%, superando o limite mínimo de 0,5% estabelecido pela Instrução Normativa n.º 25 do MAPA para uso agrícola. Isso confirma que o resíduo pode ser destinado a fins agrícolas, como fertilizante, o que é corroborado por outros autores. É importante observar que o excesso de nitrogênio pode afetar negativamente as relações N/K e N/P no solo, prejudicando o desenvolvimento das raízes e prolongando o ciclo de cultivo, o que pode reduzir a produtividade das colheitas.

Bittencourt *et al.* (2017) evidenciam o potencial prático da aplicação agrícola de bio sólidos como estratégia ambientalmente sustentável e tecnicamente viável. No período de três anos, no estado do Paraná, foram aplicadas 107.416 toneladas de lodo de esgoto higienizado por Estabilização Alcalina Prolongada (EAP) em uma área total de 5.529 hectares agrícolas, com destaque para a Região Metropolitana de Curitiba, que foi responsável por 54% da destinação total. Essa quantidade expressiva demonstra não apenas a capacidade de reaproveitamento do resíduo, mas também a existência de uma estrutura de gestão eficiente, envolvendo projetos agrônômicos, monitoramento laboratorial e conformidade com a

legislação ambiental vigente, como a Resolução CONAMA n.º 375/2006. Além disso, o estudo aponta que, mesmo com a maior disponibilidade de áreas agrícolas no interior do Estado, a adesão ao uso agrícola do biofóssólido ainda é incipiente, o que revela a necessidade de políticas de incentivo e maior integração entre as esferas do saneamento, agricultura e meio ambiente.

A viabilidade do uso de biofóssólidos como insumo agrícola está condicionada ao cumprimento de critérios técnicos e legais que assegurem sua qualidade sanitária, ambiental e agrônômica. Nesse sentido, a Resolução CONAMA n.º 375/2006 estabelece limites máximos para metais pesados, patógenos e contaminantes orgânicos, bem como diretrizes para aplicação no solo, exigindo análises periódicas e controle da origem do material. Segundo Freddi (2023), o monitoramento desses parâmetros é essencial para garantir a segurança da prática, uma vez que a presença de compostos como cádmio, chumbo e mercúrio, mesmo em concentrações moderadas, pode representar riscos à saúde humana e ao meio ambiente, especialmente em cultivos destinados à alimentação.

A origem dos biofóssólidos e a forma como o esgoto é tratado nas ETEs determinam a quantidade desses metais presentes no lodo. Quando aplicados em solos agrícolas, podem ser absorvidos pelas plantas, representando riscos à saúde humana e à fauna local. A regulamentação rigorosa sobre os limites de metais pesados nos biofóssólidos e o monitoramento constante são necessários para garantir que seu uso não cause danos ao meio ambiente ou à saúde pública (Silva *et al.*, 2017).

Ademais, a pesquisa de Silva *et al.* (2017) com biochar derivado de lodo de esgoto complementa esses achados, mostrando que a adição de biochar também pode desempenhar um papel crucial na estabilização do carbono no solo. As doses aplicadas variaram entre 5 e 20 t/ha e, nos tratamentos com a maior dose, observou-se uma redução de 0,15 g/cm³ na densidade aparente do solo, indicando uma melhora substancial em sua estrutura física. Esse efeito é fundamental, pois a diminuição da densidade aparente está diretamente relacionada à maior porosidade, o que facilita a infiltração de água e promove um ambiente mais favorável à atividade microbiana e à retenção de carbono. Além disso, a combinação de biofóssólidos com biochar, conforme proposto por Silva *et al.* (2017), pode ser uma estratégia eficiente para otimizar a retenção de carbono e melhorar a sustentabilidade dos solos agrícolas, aumentando os estoques de carbono a longo prazo sem comprometer a produtividade agrícola.

Esses resultados sugerem que tanto a aplicação de biofóssólidos quanto o uso de biochar derivado de lodo de esgoto são práticas promissoras para o manejo sustentável do solo, com benefícios ambientais e agrônômicos, ajudando a mitigar os efeitos das mudanças climáticas por meio do sequestro de carbono, ao mesmo tempo em que melhoram a qualidade

do solo e a produtividade agrícola. Contudo, a eficácia dessas práticas depende de uma gestão adequada das doses e do monitoramento contínuo das propriedades do solo, como demonstrado pelos estudos mencionados.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com bases nos estudos consultados, foi possível compreender a relevância das aplicações que os bioossólidos podem ter, sendo válido ressaltar que o Brasil é um grande produtor de resíduos devido à sua natureza agrícola. A aplicação de bioossólidos no solo tem se mostrado uma estratégia promissora para a recuperação e melhoria da qualidade do solo, especialmente nos tropicais. Os estudos demonstraram benefícios significativos, como o aumento do estoque de carbono orgânico, a melhoria da estrutura do solo, a retenção de água e a fertilidade.

A introdução desses materiais no solo não apenas promove o sequestro de carbono, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas, mas também facilita a recuperação de áreas degradadas, ao aumentar a capacidade de retenção de água e disponibilizar nutrientes essenciais, como nitrogênio e fósforo. No entanto, é essencial monitorar os possíveis riscos associados à presença de contaminantes, como metais pesados, que podem afetar a saúde do solo e das plantas.

Embora o custo inicial de implementação e transporte de bioossólidos seja considerável, a redução no uso de fertilizantes químicos e a melhoria da fertilidade do solo proporcionam benefícios econômicos a longo prazo, resultando em maior produtividade e em uma agricultura mais sustentável.

Portanto, embora os resultados sejam promissores, é crucial dar continuidade a estudos que abordem os impactos de longo prazo da aplicação de bioossólidos e biochar, focando na estabilidade do carbono e na segurança ambiental.

5. REFERÊNCIAS

ARAÚJO, V et al. ***Sewage sludge and its agricultural potential***. Research, Society and Development, v. 11, n. 3, e14711326200, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i3.262001>. Acesso em: 13 abr. 2025.

BALDOTTO MA, CANELA MC, CANELLAS LP, DOBBSS LB ; VELLOSO ACX. ***Redox index of soil carbon stability***. Revista Brasileira de Ciências do Solo, 34:1543- 1551, 2010.

BARDIN, L. **Análise de conteúdo**. 3. ed. Lisboa: Edições 70, 2011.

BITTENCOURT, V F Alves Silva et al. **Sorção de poluentes orgânicos emergentes em lodo de esgoto**. Eng Sanit Ambient, 2023. DOI: 10.1590/S1413- 41520201600100119334. Acesso em: 13 abr. 2025.

BORATTO, R. D. S. **Análise e comparação técnica e econômica de alternativas de processamento de lodo de estações de tratamento de esgotos sanitários para uso em solos**. Revista Digital de Agricultura e Engenharia, v. 240, n. 2134, p. 18-35, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.36659/dae.2023.018>. Acesso em: 10 ago. 2025

BOUDJABI, A.; CHENCHOUNI, H. ***Effects of sewage sludge application on soil organic carbon stocks and fertility in an arid region of Algeria***. Environmental Science and Pollution Research, v. 28, n. 10, p. 13046-13056, 2021. DOI: 10.1007/s11356-021-12614-6.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006**. Estabelece critérios e procedimentos para a utilização agrícola de lodos de estações de tratamento de esgoto. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 29 ago. 2006. Disponível em: https://www.normasbrasil.com.br/norma/resolucao-3752-- 006_103464.html. Acesso em: 24 ago. 2025.

BRASIL. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS)**. 2021.

BREDA, C C; SOARES, M B; TAVANTI, R F R; VIANA, D G; FREDDI, O A; PIEDADE, A R; MAHL, D; TRABALLI, R C; GUERRINI, I Al. ***Successive sewage sludge fertilization: Recycling for sustainable agriculture***. Waste Management, v. 109, p. 38–50, 2020. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.04.045.

CALDEIRA, M. V. W.; MOREIRA, R. A.; CARVALHO, G. L. ***Solid urban waste in the production of Aegiphila sellowiana Cham. seedlings***. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 22, n. 12, p. 831-836, 2018. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v22n12p831-836.

EMMANOUIL, C; GIANNAKIS, I; KYZAS, G Z. ***Terrestrial bioassays for assessing the biochemical and toxicological impact of biosolids application derived from wastewater treatment plants***. Science of The Total Environment, [S.l.], v. 931, p. 172718, 25 jun. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172718>. Acesso em: 13 out. 2025.

FREITAS, F I M C et al. **Maapeamento científico e tecnológico do uso de biossólidos na**

recuperação de áreas degradadas e/ou susceptíveis à degradação. Meio Ambiente, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.47402/ed.ep.c2311416423515>. Acesso em: 13 abr. 2025.

GALVÃO, T. F.; TIGUMAN, G. M. B.; SARKIS-ONOFRE, R. **Principais itens para relatar revisões sistemáticas e meta-análises: a recomendação PRISMA.** *Epidemiologia e Serviços de Saúde*, Brasília, v. 24, n. 2, p. 335-342, jun. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.5123/S1679-49742015000200017>. Acesso em: 24 ago. 2025.

GARCIA, G O; GONÇALVES, I Z; MADALÃO, J C; NAZÁRIO, A A; REIS, E F dos. **Crescimento de mudas de eucalipto submetidas à aplicação de biossólidos.** *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, v. 41, n. 1, p. 87-94, jan./mar. 2010.

GONÇALVES, R. F. (1998) **Caracterização, técnica de remoção e reciclagem agrícola do lodo de lagoas de estabilização.** Curitiba: PROSAB/FINEP, (Edital 01/96).

JARDIM, J F M S; ALMEIDA. **Caracterização do biocarvão produzido a partir do lodo de esgoto doméstico, visando à disposição agrícola.** *Revista DAE*, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.36659/dae.2022.049>. Acesso em: 13 abr. 2025.

KITAMURA, N C; LOURENZI, C R; BUENO, A C; PINTO, A L; SOARES, C R F S; GIACHINI, A J. **Biossólido no estabelecimento de espécies herbáceas e nos atributos químicos e microbiológicos em solo impactado pela mineração de carvão.** *Engenharia Sanitária e Ambiental*, São Paulo, v. 25, n. 4, p. 607–617, jul./ago. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1413-415220202504204413>. Acesso em: 02 jul. 2025.

KITCHENHAM, B. **Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering.** Technical Report EBSE-2007-01. Keele: Department of Computer Science, Keele University, 2007.

LEONETI, A B; PRADO, E L; OLIVEIRA, S V W B. **Saneamento básico no Brasil: considerações sobre investimentos e sustentabilidade para o século XXI.** *Revista de Administração Pública*, Rio de Janeiro, v. 45, n. 2, p. 331–348, abr. 2011. DOI: 10.1590/S0034-76122011000200003.

LIU, Y Y; PTACEK, C J.; BEAUCHEMIN, S; MACKINNON, T; BLOWES, D W. **Effect of composting and amendment with biochar and woodchips on the fate and leachability of pharmaceuticals in biosolids destined for land application.** *Science of the Total Environment*, v. 802, p. 151193, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151193>. Acesso em: 24 ago. 2025.

MAIA, F C V *et al.* **Qualidade física do solo após aplicação de lodo de esgoto.** Universidade Federal de Mato Grosso, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.31413/nativa.v6i4.5088>. Acesso em: 13 abr. 2025.

MONTEIRO, S. M.; MOREIRA, M. S.; BARROSO, M. A. **Características físico- hídricas de substratos formulados com lodo de esgoto na produção de mudas de acácia-negra.** *Ciência Florestal*, v. 29, n. 3, p. 848-861, 2019. DOI: 10.5902/1980509834590.

OLIVEIRA, G *et al.* **Ranking do Saneamento 2025: estudo atualizado com foco nos 100 municípios mais populosos do Brasil.** Versão corrigida. São Paulo: Instituto Trata Brasil,

2025. Disponível em: https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2025/07/Versao-Final-de-Estudo-da-GO-Associados-Ranking-do-Saneamento-de-2025_Rio-Corrigido-V4.pdf. Acesso em: 13 out. 2025

ONU. **Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. 2015.

PAMURU, S T; MORASH, J; LEA-COX, J D.; RISTVEY, AG.; DAVIS, A P.; AYDILEK, A H. ***Nutrient transport, shear strength and hydraulic characteristics of topsoils amended with mulch, compost and biosolids***. Science of The Total Environment, [S.l.], v. 931, p. 172718, 25 jun. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172718>. Acesso em: 13 abr. 2025.

PEREIRA, *et al.* **Potencial de uso agrícola de biossólido oriundo de estação de tratamento de esgoto, Petrolina (PE)**. Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2023v16n4e11698>. Acesso em: 13 abr. 2025.

RIBEIRO, W C.; ZIGLIO, L. Produção de resíduos e sociedade de consumo. In: SPADOTTO, C A. (org.). **Gestão de resíduos na agricultura e agroindústria**. Botucatu: FEPAF, 2006. p. 289–363.

SANTOS, DR. **Fertilidade do solo e nutrição de plantas**. UFSM, 2010. Disponível em: https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/16178/Curso_Agric-Famil-Sustent_Fertilidade-Solo-Nutricao-Plantas.pdf?sequence=1. Acesso em: 24 ago. 2025.

SILVA, F. C.; OLIVEIRA, J. L.; VARGAS, L. K. ***Potential impacts of using sewage sludge biochar on the growth of plant forest seedlings***. Ciência Rural, v. 47, n. 7, 2017. DOI: 10.1590/0103-8478cr20160064.

SILVA, M. V. CHAER, G. M. SANTOS LELES, P. S. DOS RESENDE, A.S. DE, SILVA, E.V. DA, ; BARROS, T. D. O. C. **Uso de biossólido em plantios de espécies da Mata Atlântica**. Scientia Forestalis, 48(126), 1-14, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.18671/scifor.v48n126.16>. Acesso em: 13 abr. 2025.

SPADOTTO, Cláudio A. Gestão de resíduos na produção animal. In: SPADOTTO, C A.; RIBEIRO, W C. (Org.). **Gestão de resíduos na agricultura e agroindústria**. São Paulo: FEPAF, 2006. p. 319–317. ISBN 978-85-98187-04-4.

TRANNIN, Isabel Cristina de Barros; SIQUEIRA, José Oswaldo; MOREIRA, Fátima Maria de Souza. **Avaliação agronômica de um biossólido industrial para a cultura do milho**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 40, n. 3, p. 261–269, mar. 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2005.v40.6953>. Acesso em: 13 abr. 2025.

CAPÍTULO 2. IMPACTO DA APLICAÇÃO DE BIOSSÓLIDOS DE ESGOTO SANITÁRIO NAS PROPRIEDADES QUÍMICAS DO SOLO

RESUMO

A qualidade do solo é fundamental para a sustentabilidade da agricultura, para altas produtividades e rentabilidades, pois determina sua capacidade de manutenção da vida vegetal. Alterações negativas nas características do solo podem levar à degradação, comprometendo sua fertilidade. Nesse contexto, o uso de bioossólidos surge como uma alternativa promissora, pois fornece nutrientes e matéria orgânica, melhorando as propriedades do solo. O objetivo deste capítulo foi avaliar os efeitos da aplicação de bioossólidos na fertilidade do solo. O experimento foi conduzido em condições controladas para avaliar os efeitos da aplicação de bioossólidos na fertilidade do solo. Utilizou-se delineamento experimental com sete tratamentos, incluindo um controle, sem bioossólidos, e seis doses crescentes (10 a 160 t ha⁻¹), com amostragens mensais, durante o período de um ano. Os resultados indicaram respostas positivas de matéria orgânica e carbono orgânico às doses aplicadas, com efeito máximo entre 100 e 150 t ha⁻¹. A capacidade de troca catiônica (CTC) aumentou significativamente o acúmulo, especialmente para Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺, evidenciando melhorias na retenção de nutrientes essenciais. O comportamento temporal apresentou fases de correção inicial, instabilidade durante a mineralização e estabilização posterior, indicando a necessidade de monitoramento contínuo. A faixa de aplicação de 80-120 t ha⁻¹ mostrou-se adequada para otimizar benefícios sem comprometer a segurança ambiental.

Palavras-chave: Fertilidade do solo. CTC. Carbono orgânico.

ABSTRACT

Soil quality is fundamental to agricultural sustainability, high productivity, and profitability, as it determines the soil's capacity to support plant life. Negative changes in soil characteristics can lead to degradation, compromising its fertility. In this context, the use of biosolids emerges as a promising alternative, as they provide nutrients and organic matter, improving soil properties. The objective of this chapter was to evaluate the effects of biosolid application on soil fertility. The experiment was conducted under controlled conditions to assess these effects. An experimental design with seven treatments was used, including a control without biosolids and six increasing doses (10 to 160 t ha⁻¹), with monthly sampling over a one-year period. The results indicate positive responses of organic matter and organic carbon to the applied doses, with a maximum effect observed between 100 and 150 t ha⁻¹. The cation exchange capacity (CEC) showed a significant increase, particularly for Ca²⁺, Mg²⁺, and K⁺, demonstrating improvements in the retention of essential nutrients. The temporal behavior showed phases of initial correction, instability during mineralization, and subsequent stabilization, indicating the need for continuous monitoring. The application range of 80–120 t ha⁻¹ proved to be suitable for optimizing benefits without compromising environmental safety.

Keywords: Soil fertility. CTC. Organic carbon.

1. INTRODUÇÃO

A exploração dos recursos naturais tem se intensificado nas últimas décadas, refletindo-se na utilização global equivalente a quase dois planetas Terra, evidenciando a urgência em adotar práticas produtivas mais sustentáveis (WWF, 2022). A disposição inadequada de resíduos como os de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) representa riscos ambientais, sociais e econômicos, reforçando a necessidade de soluções que conciliem sustentabilidade e produtividade (Abreu *et al.*, 2019; Cabreira *et al.*, 2017). Nesse contexto, a economia circular surge como alternativa estratégica, propondo um ciclo contínuo de uso em que resíduos se tornam matéria-prima para novos processos produtivos, reduzindo impactos ambientais e promovendo eficiência econômica (Leitão, 2015).

Os biossólidos gerados pelas ETEs possuem alto teor de nutrientes essenciais, como nitrogênio, fósforo e potássio, além de expressiva quantidade de matéria orgânica, podendo atuar como condicionadores de solo (Pereira, 2023; Shi *et al.*, 2022; Haynes, 2005). Estudos indicam que a aplicação desses resíduos ao solo aumenta a capacidade de retenção hídrica, melhora a agregação do solo e reduz sua densidade, beneficiando diretamente o desenvolvimento das culturas (Aggelides ; Londra, 2000; Melo *et al.*, 2004). Para um país como o Brasil, quarto maior consumidor mundial de fertilizantes em 2018, desses mais de 80% de origem estrangeira, a utilização de biossólidos representa não apenas uma solução ambiental, mas também estratégica, para reduzir custos e aumentar a autossuficiência na produção agrícola (Brasil, 2020).

Condicionadores do solo são materiais, de origem orgânica ou inorgânica, adicionados ao solo com a finalidade de melhorar suas propriedades físicas, químicas e/ou biológicas, sem necessariamente atuar como fertilizantes diretos. De modo geral, esses materiais promovem a melhoria da agregação das partículas do solo, aumentando sua porosidade, reduzindo a compactação e favorecendo o desenvolvimento radicular. Além disso, podem contribuir para o aumento da capacidade de troca catiônica (CTC), retenção de umidade e estímulo à atividade biológica, criando condições mais favoráveis ao crescimento das plantas (Von Sperling, 2014; Malavolta, 2006).

Além dos benefícios agrônômicos, a aplicação de biossólidos atende a princípios de sustentabilidade e gestão de resíduos, conforme a Política Nacional de Resíduos Sólidos, que prevê a reutilização, reciclagem, compostagem, recuperação e aproveitamento energético de materiais, de modo a minimizar impactos ambientais e riscos à saúde pública (Brasil, 2010). Dessa forma, os biossólidos podem ser considerados insumos estratégicos para integrar práticas

de agricultura sustentável e economia circular, transformando resíduos urbanos em produtos de valor econômico e ambiental.

No entanto, a aplicação desses materiais exige atenção quanto à sua composição química variável, pois existem, além do valor agrônomo, os potenciais riscos de aplicação, incluindo lixiviação de nutrientes, fitotoxicidade de metais pesados e acidificação do solo (Camargo *et al.*, 1999; Trannin *et al.*, 2005). A literatura aponta que, embora a adição de biossólidos aumente o teor de matéria orgânica, isso pode resultar em impactos ambientais negativos, especialmente em solos tropicais altamente intemperizados (Melo *et al.*, 1994; Santos *et al.*, 2003).

A discussão sobre os efeitos dos biossólidos nas propriedades físicas do solo também é de grande relevância. A aplicação contínua desses resíduos pode promover melhorias na porosidade, densidade e agregação do solo, especialmente em áreas degradadas ou com baixo teor de matéria orgânica (Ortega *et al.*, 1981). Contudo, em solos já estruturados, os efeitos podem ser inconsistentes, exigindo avaliação detalhada da interação entre o tipo de biossólido, a dose aplicada e o tipo de solo (Marciano *et al.*, 2001; Gonçalves; Ceretta, 1999). Tais variabilidades reforçam a necessidade de estudos regionais que considerem as características locais do solo e as propriedades químicas e físicas dos biossólidos.

Do ponto de vista econômico e social, a valorização dos biossólidos pode contribuir para a redução de custos com insumos agrícolas, aumentando a produtividade das culturas e promovendo alternativas de manejo sustentável (Pereira *et al.*, 2023; Spadotto, 2006). A utilização adequada desses resíduos permite que atividades urbanas, tradicionalmente associadas a problemas de destinação de resíduos, passem a gerar insumos agrícolas de elevado valor, alinhando-se a estratégias de responsabilidade socioambiental e sustentabilidade no setor agropecuário.

Além disso, a incorporação de biossólidos atua como ferramenta para incrementar a matéria orgânica, melhorar a capacidade de troca de cátions, elevar o pH e disponibilizar nutrientes essenciais para o desenvolvimento das plantas, favorecendo a produtividade e a qualidade das culturas (Haynes, 2005; Düring *et al.*, 2003). No cenário de produção de alimentos, que depende da manutenção e melhora constante da fertilidade do solo, os biossólidos vêm a ser uma alternativa viável aos fertilizantes químicos (Freitas, 2023).

Dessa forma, a problemática que orienta este estudo consiste em compreender até que ponto a aplicação de biossólidos pode ser utilizada como estratégia sustentável para melhoria da fertilidade do solo, sem comprometer a segurança ambiental, considerando as respostas químicas e físico-químicas do solo frente a diferentes doses e condições de manejo.

A ausência de informações consolidadas sobre doses adequadas, comportamento temporal dos nutrientes e potenciais riscos ambientais reforça a necessidade de estudos que forneçam subsídios técnicos e científicos para o uso seguro e eficiente dos bio sólidos na agricultura (Freitas *et al.*, 2023; Emmanouil *et al.*, 2024).

Considerando este panorama, o presente estudo teve como objetivo caracterizar, sob os aspectos químicos e físicos, os bio sólidos Classe II provenientes da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) de Nova Serrana–MG quanto aos teores de nutrientes, matéria orgânica e potencial de mineralização.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização do Objeto de Pesquisa

O bio sólido utilizado no experimento é proveniente do município de Nova Serrana (MG), localizado na região Centro-Oeste de Minas Gerais. Possui área territorial de aproximadamente 283 km² e população estimada em 105.500 habitantes (IBGE, 2022). De acordo com o Atlas de Desenvolvimento Humano, o Município possui IDHM de 0,712, índice considerado médio, e, segundo o *United Nations Development Programme* (PNUD) (2013, p. 42), “reflete o avanço de municípios em processo de consolidação econômica e urbana”. O crescimento demográfico e econômico está fortemente associado à expansão da indústria calçadista, setor responsável por impulsionar a geração de renda, emprego e fluxo migratório na região.

Do ponto de vista socioeconômico, Nova Serrana apresenta estrutura produtiva predominantemente industrial, com destaque para o setor de fabricação de calçados, que constitui o principal motor econômico do município (Prefeitura de Nova Serrana, 2023). Essa característica influencia diretamente a demanda por serviços de saneamento e a produção de efluentes, devido ao elevado consumo de água e à presença de pequenas e médias indústrias conectadas ao sistema público de esgotamento. Em relação ao saneamento básico, os dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento indicam que o município possui cobertura superior a 90% no abastecimento de água tratada (Brasil, 2023).

Quanto ao esgotamento sanitário, registra-se que 81,7% do esgoto são coletados e cerca de 73,8% são tratados, configurando desempenho intermediário. O Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento (SNIS) (Brasil, 2023, p. 118) destaca que “a ampliação do tratamento é essencial para a melhoria das condições ambientais em municípios de médio porte”. Em Nova Serrana, a ETE adota um arranjo composto por reator anaeróbio, filtro biológico percolador, decantação secundária e etapa físico-química, tecnologia adequada para efluentes predominantemente domésticos, mas que também responde às cargas provenientes da indústria calçadista. O lodo gerado pela ETE municipal apresenta características próprias, decorrentes dos processos de tratamento.

O reator anaeróbio contribui para a produção de um lodo parcialmente estabilizado, enquanto o tratamento aeróbio subsequente gera lodo secundário com maior fração de biomassa microbiana. Como observado na literatura, o lodo de esgoto apresenta, de modo geral, “elevado teor de matéria orgânica e concentrações significativas de nitrogênio e

fósforo” (Andreoli; Von Sperling; Fernandes, 2014, p. 67), sendo potencialmente adequado para uso como condicionador de solo, desde que atenda aos requisitos legais. Em Nova Serrana, esse lodo pode, ainda, sofrer influência de descargas industriais características do setor calçadista, o que demanda monitoramento constante quanto à presença de compostos orgânicos específicos e metais.

A destinação e o manejo desse material são regulamentados pela Resolução CONAMA n.º 498/2020 (Brasil, 2020), que estabelece critérios para produção, classificação e aplicação agrícola de biossólidos. Conforme o CONAMA (Brasil, 2020, p. 4), “a utilização de biossólidos em solos somente poderá ocorrer após tratamento e comprovação de sua segurança ambiental”. Assim, qualquer proposta de uso agrícola do lodo gerado no município requer análises físico-químicas e microbiológicas, além de conformidade com o Plano Municipal de Saneamento e com os limites normativos de metais pesados, patógenos e compostos tóxicos.

A coleta do material foi realizada conforme os procedimentos da ABNT NBR 10007:2004 e POP 231 (Brasil, 2004; Copasa, 2019). Após análises laboratoriais, o material foi classificado como Resíduo Não Perigoso – Classe II A – Não Inerte, conforme a ABNT NBR 10004:2004. Essa norma estabelece critérios para a classificação de resíduos sólidos de acordo com seus potenciais riscos ao meio ambiente e à saúde pública, possibilitando seu gerenciamento de forma adequada. Os resultados dessas análises encontram-se no ANEXO I.

A amostra foi caracterizada como resíduo sólido do lodo digerido e desaguado. O processo de desaguamento ocorreu em leitos de secagem pavimentados, sem cobertura, até atingir teor mínimo de 60% de sólidos. Tal procedimento está em conformidade com a Resolução CONAMA n.º 498/2020, que estabelece essa etapa para a obtenção de biossólido classe B, com ênfase na redução de patógenos. Após análises laboratoriais, o material foi classificado como Resíduo Não Perigoso, Classe II A, não inerte, conforme a ABNT NBR 10004:2004. Essa norma estabelece critérios para a classificação de resíduos sólidos de acordo com seus potenciais riscos ao meio ambiente e à saúde pública, possibilitando seu gerenciamento de forma adequada.

Para fins de caracterização do material, o biossólido apresenta estado físico sólido, com 70,3% de umidade e 29,7% de sólidos totais, valores típicos de lodos digeridos e compatíveis com aplicação agrícola condicionada. O pH de 5,79 indica caráter levemente ácido, característica comum em biossólidos de origem sanitária, especialmente quando não submetidos à alcalinização, o que reforça a necessidade de correção do solo quando aplicados em ambientes agrícolas.

Do ponto de vista sanitário, o material atende aos requisitos para enquadramento

como Classe II, uma vez que apresenta ausência de líquidos livres e de inflamabilidade, não corrosividade, não reatividade e ausência de ovos viáveis de helmintos ($< 0,01$ ovo g^{-1} de sólidos totais), atendendo integralmente aos limites máximos permitidos pela legislação ambiental brasileira para uso agrícola controlado.

Quanto aos contaminantes inorgânicos, os teores de arsênio ($< 0,17$ mg kg^{-1}) e mercúrio ($< 0,0038$ mg kg^{-1}) encontram-se muito abaixo dos limites estabelecidos pelo CONAMA (Brasil 2006), indicando baixo risco toxicológico associado à presença de metais potencialmente tóxicos. Da mesma forma, os compostos cianetados (cianeto livre, total e de hidrogênio) apresentaram concentrações inferiores aos limites de detecção, reforçando a segurança química do material.

Sob o aspecto nutricional, o bio sólido apresenta elevada concentração de nitrogênio total (9.533 mg kg^{-1}), predominantemente na forma de nitrogênio orgânico (9.063,9 mg kg^{-1}), o que favorece a liberação gradual desse nutriente no solo. O fósforo total (1.131,1 mg kg^{-1}), o potássio total (198,48 mg kg^{-1}), o cálcio total (4.668,4 mg kg^{-1}) e o magnésio total (383,2 mg kg^{-1}) evidenciam o potencial fertilizante e condicionador do solo, especialmente em Latossolos de baixa fertilidade natural. O elevado teor de enxofre total (9.988,1 mg kg^{-1}) também contribui para a nutrição vegetal, desde que respeitadas as doses agronômicas recomendadas.

2.2. Características físico-químicas do solo

Para fins de padronização e controle experimental, foram feitas análises de capacidade de campo do solo (densidade, sólidos totais, sólidos voláteis e umidade) do bio sólido. A quantidade de bio sólido adicionado ao solo refere-se à base seca do material. O solo utilizado foi um latossolo vermelho-amarelo (Tabela 4).

Tabela 4. Análise da amostra de solo utilizada – Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico

pH	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	SB	t	T	V	m	M. Org.	C. Org.	N. NH ₄ ⁺
H ₂ O	mg/dm ³				cmolc/dm ³					%		dag/kg		g/kg
4,8	1,59	39,34	0,1	0	0,98	3,03	0,1	1,11	3,13	3,24	90,93	2,22	1,28	0,76

Fonte: A autora (2026)

As análises químicas do solo foram realizadas seguindo metodologias convencionais utilizadas em laboratórios de fertilidade, com o objetivo de determinar os macronutrientes disponíveis, a acidez potencial e os teores de matéria orgânica e carbono orgânico. Para a determinação de fósforo (P) e potássio (K), utilizou-se o extrator Mehlich-1, solução ácida amplamente empregada para solos brasileiros, especialmente aqueles de baixa capacidade de troca catiônica. As amostras foram agitadas com o extrator, filtradas e posteriormente analisadas: o P foi determinado por espectrofotometria, e o K, por fotometria de chama.

Os teores de cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e alumínio (Al^{3+}) trocáveis foram obtidos utilizando-se solução de KCl 1 mol L^{-1} como extrator. Após a extração, Ca e Mg foram quantificados, geralmente, por titulação complexométrica ou espectrofotometria de absorção atômica, enquanto o Al foi determinado por titulação com solução padronizada de NaOH. A acidez potencial ($\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$) foi determinada por meio do extrator de acetato de cálcio $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ em pH 7,0, metodologia que permite estimar a fração de acidez não trocável presente nos colóides do solo.

Com base nos teores trocáveis determinados, calculou-se a Soma de Bases (SB), obtida pelo somatório de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Na^+ (quando analisado). A capacidade de troca catiônica efetiva (t) foi estimada pela soma da SB com o Al^{3+} trocável, enquanto a capacidade de troca catiônica a pH 7,0 (T) foi determinada a partir da soma entre SB e $\text{H}^+ + \text{Al}$. A saturação por bases (V%) foi calculada pela relação entre SB e T, expressa em porcentagem, representando o percentual de cargas negativas do solo ocupadas por bases trocáveis. A saturação por alumínio (m%), por sua vez, foi obtida pela razão entre o Al^{3+} trocável e t, também expressa em porcentagem. A matéria orgânica do solo (MO) foi determinada por métodos colorimétricos após oxidação via dicromato de potássio ou pelo método de Walkley-Black, conforme procedimento adotado pelo laboratório de análise. A partir do valor de MO, estimou-se o carbono orgânico (C. Org) mediante o fator de conversão adequado ao método empregado.

Os tratamentos foram distribuídos em delineamento experimental em blocos casualizados (DBC), com quatro repetições cada, a fim de minimizar a variabilidade do solo e permitir análises estatísticas confiáveis. Cada parcela experimental recebeu a dose correspondente de biossólidos, previamente caracterizados quanto ao teor de nutrientes, matéria orgânica e presença de possíveis contaminantes (metais pesados, resíduos químicos). O experimento foi conduzido com o objetivo de avaliar os efeitos da aplicação de biossólidos na fertilidade do solo. Foram definidos sete tratamentos distintos, organizados com base na proporção de biossólidos aplicados ao solo (Tabela 5).

Tabela 5. Tratamentos propostos

Tratamento	Descrição	Dose de Biossólidos (t ha ⁻¹)	Solo (L)	Biossólidos (g)	Água (L)
T1	Solo puro (controle)	0	5	0	2
T2	Solo + biossólidos	10	5	112,1	2,2
T3	Solo + biossólidos	20	5	224,2	2,2
T4	Solo + biossólidos	40	5	442,4	2,2
T5	Solo + biossólidos	80	5	896,9	2,2
T6	Solo + biossólidos	100	5	1112,1	2,2
T7	Solo + biossólidos	160	5	1793,7	2,2

Fonte: A autora (2026).

O experimento foi conduzido no Setor de Solos da Universidade Federal de Viçosa, *Campus Florestal*. As amostras de solo agrícola foram acondicionadas em sacos plásticos com a finalidade de avaliar o efeito da aplicação de biossólidos sobre as propriedades do solo. O biossólido utilizado apresentava teor de umidade de 77,7%, enquanto a capacidade de campo do solo foi determinada em 44%. Para padronização experimental, cada unidade experimental recebeu 5 litros de solo.

As doses de biossólido aplicadas em cada tratamento foram calculadas com base na recomendação por hectare, sendo, posteriormente, ajustadas de modo proporcional ao volume de solo contido em cada vaso. A fim de manter a umidade do solo próxima à capacidade de campo, foram adicionados 2,2 litros de água por vaso. O tratamento controle (T1), por não receber biossólido, recebeu 2,0 litros de água.

Figura 2. Experimento



Fonte: A autora (2026).

Os biossólidos foram incorporados ao solo por meio de homogeneização mecânica, garantindo distribuição uniforme, e, em seguida, distribuídos em sacos plásticos de 5 litros (Figura 2). A condução do experimento ocorreu no período de 12 meses, com coletas e análises mensais. Foram conduzidas análises químicas e físicas do solo, incluindo teores de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, alumínio, metais, acidez total, carbono orgânico, matéria orgânica, pH, CTC e capacidade de retenção de água.

2.3. Análises químicas

A análise de Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} trocáveis no solo, geralmente, seguiu protocolos padronizados pela EMBRAPA (1997). Os teores de cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e alumínio (Al^{3+}) trocáveis foram determinados a partir da extração com solução de KCl 1 mol L^{-1} . As amostras dos tratamentos (10 cm) foram agitadas com 100 mL do extrator por 5 minutos e, após repouso de 16 horas, foram retiradas alíquotas de 25 mL do sobrenadante para análise de cálcio, magnésio e alumínio, respectivamente. As concentrações de Ca^{2+} e Mg^{2+} foram obtidas por titulação complexométrica com EDTA padronizado, enquanto o Al^{3+} foi quantificado por titulação com solução de NaOH padronizada, utilizando azul de bromotimol como indicador. O procedimento foi conduzido em triplicata, com realização de provas em branco.

Os teores disponíveis de fósforo (P) e potássio (K) foram determinados utilizando-se o extrator Mehlich-1 (HCl $0,05 \text{ mol L}^{-1}$ + H_2SO_4 $0,0125 \text{ mol L}^{-1}$) na proporção solo: solução de 1:10. As amostras dos tratamentos (10 cm 3) foram agitadas com 100 mL do extrator por 5 minutos e, após repouso de 16 horas, o fósforo foi quantificado por espectrofotometria de

absorção molecular, empregando-se o método do azul de molibdênio. O potássio, por sua vez, foi determinado por fotometria de chama. As análises seguiram o protocolo descrito pela Embrapa (1997), sendo realizadas em triplicata.

O nitrogênio total do solo foi determinado pelo método Kjeldahl, que consiste na digestão de aproximadamente 0,5 g de amostra com ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4), na presença de catalisadores de selênio, sulfato de cobre e sulfato de potássio, para conversão da matéria orgânica em íons amônio (NH_4^+). O material digerido foi alcalinizado com hidróxido de sódio (NaOH) e destilado em aparelho de Kjeldahl. O destilado foi recolhido em solução de H^3BO^3 (20 g L^{-1}), misturado a uma solução de verde de bromocresol e vermelho de metila e, posteriormente, titulado com solução de HCL $0,05 \text{ mol L}^{-1}$, até que a solução indicadora em ácido bórico assumisse uma coloração vermelha. Os teores de nitrogênio foram verificados em triplicata, com realização de provas em branco, conforme os procedimentos descritos por e Black (1983), Embrapa (1997).

2.4. Teor de MO

O teor de carbono orgânico foi quantificado segundo o método proposto por Walkley, conforme descrito pela Embrapa (1997). Para tanto, aproximadamente 0,5 g de solo, previamente triturado em gral de porcelana e pesado em balança analítica com precisão de quatro casas decimais, foi transferido para erlenmeyers de 125 mL. Em seguida, adicionaram-se 10 mL de solução de dicromato de potássio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) e 25 mL de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4 p.a.), promovendo-se a oxidação química da matéria orgânica em temperatura ambiente. Após o resfriamento da mistura, acrescentaram-se 40 mL de água destilada e 10 mL de ácido fosfórico (H_3PO_4 p.a.), prosseguindo-se com a titulação utilizando sulfato ferroso amoniacal $[(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$ como titulante. A detecção do ponto final foi realizada com solução de difenilamina 1% em meio ácido. Todas as análises foram conduzidas em triplicata, sendo realizadas provas em branco paralelamente, na ausência de solo. O teor de MO é determinado por meio de cálculos, em que o valor de carbono orgânico encontrado é multiplicado por 3,724.

2.5. Acidez total

A acidez total do solo ($\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$) foi determinada por meio de extração com solução de acetato de cálcio $0,5 \text{ mol L}^{-1}$, ajustada a pH 7,0. As amostras dos tratamentos (5 cm 3) foram

agitadas com 75 mL do extrator por 10 minutos e deixadas em repouso de 16 horas. Após esse repouso, foram tiradas alíquotas de 25 mL, e, em seguida, procedeu-se à titulação do extrato com solução padronizada de hidróxido de sódio (NaOH), utilizando fenolftaleína como indicador. O procedimento seguiu a metodologia descrita pela Embrapa (1997).

2.6. Análise estatística

Os dados obtidos foram inicialmente submetidos à verificação dos pressupostos estatísticos de normalidade e homogeneidade de variâncias, por meio do teste de Shapiro–Wilk, para avaliação da normalidade, e do teste de Levene, para análise da homocedasticidade. Os resultados indicaram violação do pressuposto de normalidade, caracterizando os conjuntos de dados como não paramétricos.

Devido à não normalidade dos dados, optou-se por não utilizar a análise de variância (ANOVA), que requer distribuição normal dos resíduos. Em substituição, foi aplicado o teste não paramétrico de Kruskal–Wallis, adequado para comparação de três ou mais grupos independentes quando os pressupostos paramétricos não são atendidos. Esse teste permitiu avaliar a existência de diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos, considerando o nível de significância previamente estabelecido.

A relação entre as doses de biossólido e as variáveis avaliadas foi investigada por meio de modelos de regressão quadrática, ajustados com base nos valores observados, permitindo a análise da tendência dose–resposta e a estimativa de doses associadas a máximos ou mínimos técnicos quando aplicável. As análises estatísticas e a elaboração dos gráficos e figuras foram realizadas no *software* estatístico R.

Essa abordagem possibilitou a interpretação dos efeitos das diferentes doses de biossólido sobre os atributos químicos do solo e o desempenho inicial das plantas, respeitando as limitações impostas pela natureza não paramétrica dos dados e assegurando rigor estatístico às inferências realizadas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 pH

O pH é um dos indicadores mais sensíveis da qualidade química do solo e um modulador decisivo da disponibilidade de nutrientes, da toxicidade de elementos como alumínio e da atividade microbiana. Por isso, sua resposta à adição de matéria orgânica residual é um parâmetro central para avaliar a viabilidade agronômica do biofertilizante.

O pH dos biofertilizantes é um dos fatores mais importantes a serem considerados, pois influencia diretamente a disponibilidade de nutrientes no solo e a atividade microbiana. Segundo Abreu *et al.* (2019) e Bittencourt *et al.* (2017), biofertilizantes com pH próximo à neutralidade tendem a exercer efeito corretivo em solos ácidos, promovendo o aumento da saturação por bases e ampliando a disponibilidade de cátions essenciais, como cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}). Em contrapartida, em solos alcalinos, o impacto do biofertilizante sobre o pH é menos expressivo, embora possa contribuir para a estabilidade química e biológica do sistema, mantendo condições favoráveis à atividade microbiana e ao equilíbrio dos nutrientes.

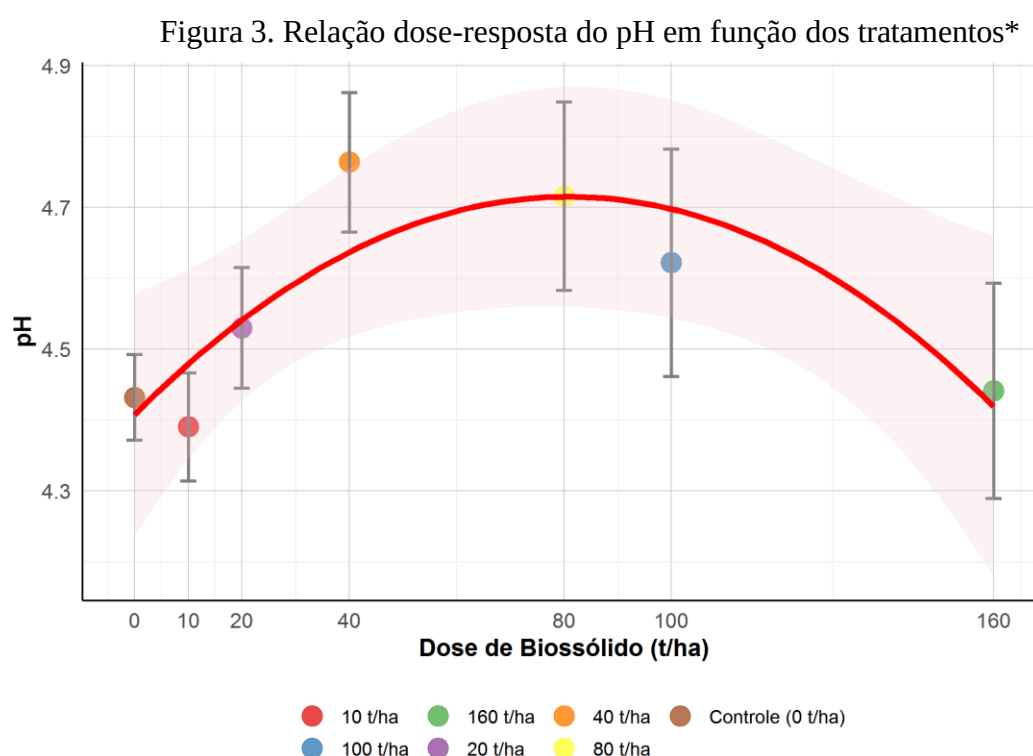
A análise estatística descritiva dos valores de pH (APÊNDICE I) evidencia um comportamento não linear em resposta às doses crescentes de biofertilizantes. O tratamento controle (T1) apresentou média de pH de 4,432, servindo como referência para comparação, enquanto os tratamentos com aplicação do resíduo mostraram incremento inicial nos valores médios, com destaque para T4 (40 t ha⁻¹), que apresentou o maior valor médio (4,764), sugerindo efeito corretivo moderado da acidez do solo nessa faixa de dose. A partir de 80 t ha⁻¹, observou-se tendência de estabilização e posterior redução dos valores médios de pH, como verificado nos tratamentos T6 e T7, indicando possível saturação do efeito alcalinizante do biofertilizante.

O aumento progressivo do desvio padrão e do coeficiente de variação (CV), especialmente nas doses mais elevadas ($\geq 80 \text{ t ha}^{-1}$), revela maior heterogeneidade dos dados, possivelmente associada à intensificação dos processos de mineralização da matéria orgânica e à variabilidade na liberação de íons no solo. Esses resultados reforçam que, embora a aplicação de biofertilizantes possa contribuir para a modificação do pH do solo, doses elevadas tendem a aumentar a variabilidade do sistema, exigindo maior controle e monitoramento para garantir a estabilidade química do solo.

Os resultados mostram que as respostas do pH não são lineares e apresentam grande variabilidade temporal (Figura 3). A amplitude total de 3,64 a 6,2 confirma que o solo investigado possui acidez naturalmente elevada, mas também que o biofertilizante, dependendo da

coleta, pode contribuir para elevações moderadas no pH. O pH médio geral de 4,5 reforça a predominância de condições ácidas, coerentes com solos tropicais de textura média a arenosa e com baixos teores de bases trocáveis, como os latossolos. Nesse sentido, a expectativa inicial seria a de que a matéria orgânica e os cátions presentes no biossólido atuassem como agentes amenizadores da acidez, ainda que de forma limitada.

A análise de regressão quadrática (Figura 3) aplicada aos dados de pH em função das doses de biossólidos indica uma tendência de elevação discreta do pH do solo à medida que aumentam as doses aplicadas, com valor ótimo estimado em 56,05 t ha⁻¹, correspondente a um pH de 4,41. Embora o coeficiente de determinação ($R^2 = 0,4434$) sugira que parte da variação do pH possa ser explicada pelo modelo, o baixo R^2 ajustado (0,1651) e a não significância estatística do teste F ($p = 0,3098$) indicam que a relação entre dose e pH é fraca e marcada por elevada variabilidade. Esse comportamento sugere que, nas condições avaliadas, a aplicação de biossólidos exerce efeito limitado sobre a acidez do solo, possivelmente em função da baixa capacidade tamponante do material ou da predominância de formas orgânicas ainda não mineralizadas.



*Em que $R^2 = 0,443$ e equação $y = 4,323 + 0,003x$.

Fonte: A autora (2026).

O pH constitui o eixo regulador da disponibilidade de nutrientes no solo (Quadro 9). A literatura descreve três padrões possíveis após a aplicação de biossólidos: elevação, redução ou estabilidade relativa. Murtaza *et al.* (2011) destacam que o pH tende a aumentar quando o biossólido é rico em Ca e Mg, compostos capazes de neutralizar H^+ na solução do solo. Esse padrão é típico em materiais com teor elevado de carbonatos ou compostos alcalinos - situação compatível com os valores altos de Ca e Mg. Nesses casos, a adição de cátions básicos provoca deslocamento de cargas na CTC, restaura sítios de adsorção saturados por Al^{3+} e reduz a acidez potencial.

Quadro 9. Efeito da aplicação de biossólidos

Propriedade do Solo	Efeito da aplicação de biossólidos	Referências
Capacidade de troca catiônica (CTC)	Aumentada	Bolan et al. (2012); Ramos, Paulino ; Crusciol (2018):
Condutividade elétrica (EC)	Aumentada	Lugo-Avilés et al. (2024); Carmo et al. (2016)
Macronutrientes (N, P, K, S)	Aumentados	Silva-Leal et al. (2021), Rodriguez et al. (2020)
pH do solo	Variável	Lugo-Avilés et al. (2024); Murtaza ; Haynes (2011)
Carbono total / orgânico	Aumentado	Wijesekara et al. (2021)
Produtividade / rendimento	Aumentada	Sepúlveda-Varas et al. (2011), Rodriguez et al. (2020)

Fonte: A autora (2026).

A dose que maximiza o valor da variável calculada como o ponto de máximo das equações apresenta variações estatísticas muito amplas, de valores negativos até estimativas acima de 280 t/ha. Doses negativas não têm interpretação agrônômica direta, mas indicam que, naquele momento específico, a melhor resposta ocorreu em valores próximos ao do tratamento controle, demonstrando que a aplicação de biossólido não contribuiu para a elevação do pH. Já valores muito altos, como os observados na Coleta 1, apontam para uma tendência de incremento do pH que, embora exista, é suave demais para estabilizar dentro das doses avaliadas no experimento (até 160 t/ha). Isso sugere que a curva, em alguns momentos, se comporta quase linearmente, dificultando a determinação de um ponto de máximo real dentro da faixa

experimental.

Mesmo diante dessa variabilidade, há um padrão consistente entre as coletas intermediárias, pois a maioria apresenta doses ótimas situadas entre 50 e 90 t/ha, com pH ótimo aproximado entre 4,3 e 5,6. Essa faixa intermediária é particularmente relevante porque corresponde a um intervalo agronomicamente plausível e condizente com o potencial alcalinizante moderado do biossólido. Tais resultados corroboram a literatura, que aponta para a necessidade de doses relativamente elevadas de biossólido para alterar significativamente a acidez em solos muito intemperizados (Kabirinejad; Hoodaji, 2012; Barbosa *et al.*, 2017).

Os resultados dos testes estatísticos indicam que os pressupostos clássicos de normalidade e homogeneidade de variâncias não foram atendidos. O teste de Shapiro-Wilk apresentou estatística de 0,9233 com $p < 0,001$, evidenciando que os resíduos não seguem distribuição normal. De forma semelhante, o teste de Levene resultou em $p = 0,0057$, rejeitando a hipótese de homogeneidade das variâncias entre os tratamentos. Esses achados sugerem a presença de assimetria, heterocedasticidade e possível influência de valores extremos.

Esses resultados corroboram os encontrados por Lugo-Avilés *et al.* (2024), que classificam a resposta do pH como variável. A baixa explicação do modelo ($R^2=0,4434$) é um testemunho experimental da complexidade apontada por esses autores. O efeito limitado de correção observado sugere que o biossólido utilizado possuía um poder alcalinizante moderado, atuando mais como um condicionador que mantém a estabilidade química do que como um corretivo potente, como o calcário. A dose de 80 t/ha, embora alta, é consistente com a necessidade de doses elevadas para solos altamente intemperizados, como os Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos.

Esses achados permitem argumentar que o biossólido exerce um efeito positivo, porém limitado, sobre o pH do solo. Em termos agrônômicos, doses acima de 80 t/ha parecem ser suficientes para alcançar elevações moderadas, embora incapazes de corrigir plenamente a acidez de um solo altamente ácido. Além disso, a baixa explicação do modelo reforça que o pH, isoladamente, não deve ser utilizado como único parâmetro para definir doses de biossólido, sendo necessário integrar outras variáveis, como teor de bases, acidez potencial, saturação por bases e dinâmica de nutrientes.

A ação alcalinizante de biossólidos sobre solos ácidos é real, porém condicionada por fatores temporais, ambientais e pelo tipo de material aplicado, que modulam a liberação de bases e a redução da acidez. Estudos demonstram que a elevação do pH e a neutralização do alumínio no solo dependem da dose aplicada, do grau de estabilização do biossólido e do tempo decorrido após a aplicação. Por exemplo, aplicações mais elevadas de biossólido estabilizado

resultaram em aumentos significativos do pH, enquanto doses menores apresentaram efeitos discretos, limitados às camadas superficiais do solo (Ricci *et al.*, 2010; Barcelar *et al.*, 2001). Além disso, a mineralização da matéria orgânica contida no bio sólido influencia diretamente a liberação de bases, tornando os efeitos sobre o pH progressivos e dependentes das condições de incubação e do ambiente (Reis; Rodella, 2002).

A forte relação inversa entre o pH e a concentração de alumínio é central na química de solos ácidos. A redução do Al^{3+} ocorre por mecanismos bem descritos na literatura, a precipitação, na qual o aumento moderado do pH induz a hidrólise do Al^{3+} e sua precipitação como $\text{Al}(\text{OH})_3$; e Complexação Orgânica, em que a matéria orgânica presente no bio sólido forma complexos estáveis com o alumínio, diminuindo sua atividade tóxica na solução do solo. Observa-se que a acidez total apresenta uma dose que maximiza o valor da variável menor que a necessária para reduzir o Al^{3+} , indicando que os íons H^+ são neutralizados primeiro, enquanto a diminuição do alumínio, que representa a principal fração da acidez potencial em solos muito ácidos, requer um aporte maior de bases (Malavolta, 1987).

Esses achados corroboram os resultados observados por Pereira *et al.* (2023), que destacam a importância do controle do pH na gestão ambiental e agrônômica dos bio sólidos. O ajuste adequado do pH é, portanto, essencial para otimizar os benefícios agrônômicos da aplicação, garantir a segurança ambiental e assegurar o equilíbrio entre a fertilização e a conservação dos ecossistemas. Tranin *et al.* (2008) indicam que a aplicação de bio sólidos pode elevar o pH de solos ácidos em até duas unidades de pH, promovendo melhoria da fertilidade química e aumento da capacidade de troca catiônica.

A adição de bio sólido a solos ácidos tem potencial para modificar a acidez e alterar os teores de alumínio trocável, embora esses efeitos variem conforme a dose, o tipo de solo e o grau de intemperismo. Um estudo conduzido com lodo de esgoto demonstrou aumento de pH nas camadas superficiais do solo (0–5 cm e 5–10 cm) após aplicação, ainda que os teores de Al trocável e de bases como Ca, Mg e K nem sempre tenham apresentado resposta significativa, resultado que revela a complexidade e a dependência das variáveis edáficas e do manejo (Barcelar *et al.*, 2001). Em consonância, Mello Cunha *et al.* (2015) revelam que, em solos tropicais ácidos, a quantificação tradicional de alumínio trocável via KCl pode superestimar as frações realmente trocáveis, uma vez que parte do alumínio extraído pode não corresponder a formas realmente disponíveis.

3.2. Al^{3+}

Os testes estatísticos indicam que os resultados dos teores de alumínio não atendem aos pressupostos de normalidade e homogeneidade de variâncias. O teste de Shapiro–Wilk apresentou estatística de 0,9477 com $p < 0,001$, evidenciando desvio significativo da distribuição normal, enquanto o teste de Levene ($p = 1,71 \times 10^{-19}$) revelou forte heterogeneidade das variâncias entre os tratamentos. Esses resultados sugerem elevada assimetria e dispersão desigual dos valores de Al^{3+} ao longo das doses de biossólidos, possivelmente associadas às alterações no pH e à complexação do alumínio pela matéria orgânica adicionada.

A estatística descritiva (APÊNDICE I) evidencia redução expressiva dos teores médios de alumínio com o aumento das doses de biossólidos até 40–80 t ha⁻¹, passando de 0,926 no controle (T1) para 0,278 em T4 e 0,309 em T5, o que indica efeito positivo do resíduo na atenuação da toxicidade por Al^{3+} , possivelmente em função do aumento do pH e da complexação do alumínio pela matéria orgânica. Entretanto, em doses mais elevadas (100 e 160 t ha⁻¹), observa-se elevação das médias (0,552 e 0,762, respectivamente), sugerindo comportamento não linear e possível reequilíbrio químico do sistema. Os elevados coeficientes de variação, sobretudo a partir de T4 (CV > 79%), associados à presença de valores mínimos iguais a zero e máximos elevados, indicam forte heterogeneidade e distribuição assimétrica. Esses resultados demonstram que, embora os biossólidos sejam eficientes na redução do alumínio trocável em doses intermediárias, aplicações excessivas podem aumentar a variabilidade e comprometer a previsibilidade dos efeitos, reforçando a importância da definição de faixas ótimas de manejo.

Em geral, os resultados mostraram uma tendência de redução do alumínio com o aumento das doses, ainda que essa relação apresente variações entre coletas e coeficientes de determinação relativamente baixos para várias delas. Esse padrão confirma a natureza altamente reativa do alumínio no solo, especialmente em ambientes distróficos, onde pequenas mudanças no pH e na saturação por bases podem gerar respostas rápidas e não linearmente proporcionais.

Para alumínio (Figura 4), nos primeiros tratamentos, T1 (controle) e T2, que representam a menor dose de biossólido, o alumínio manteve-se em níveis compatíveis com solos fortemente ácidos, variando aproximadamente entre 0,5 e 1,2 cmolc/dm³. Esses valores refletem a elevada acidez potencial do solo e indicam um ambiente químico restritivo ao desenvolvimento radicular, visto que o Al^{3+} é tóxico para muitas culturas, reduz a elongação radicular e interfere na absorção de nutrientes essenciais. A permanência de valores mais elevados nas coletas iniciais também sugere que, em baixas doses, o biossólido não exerce efeito

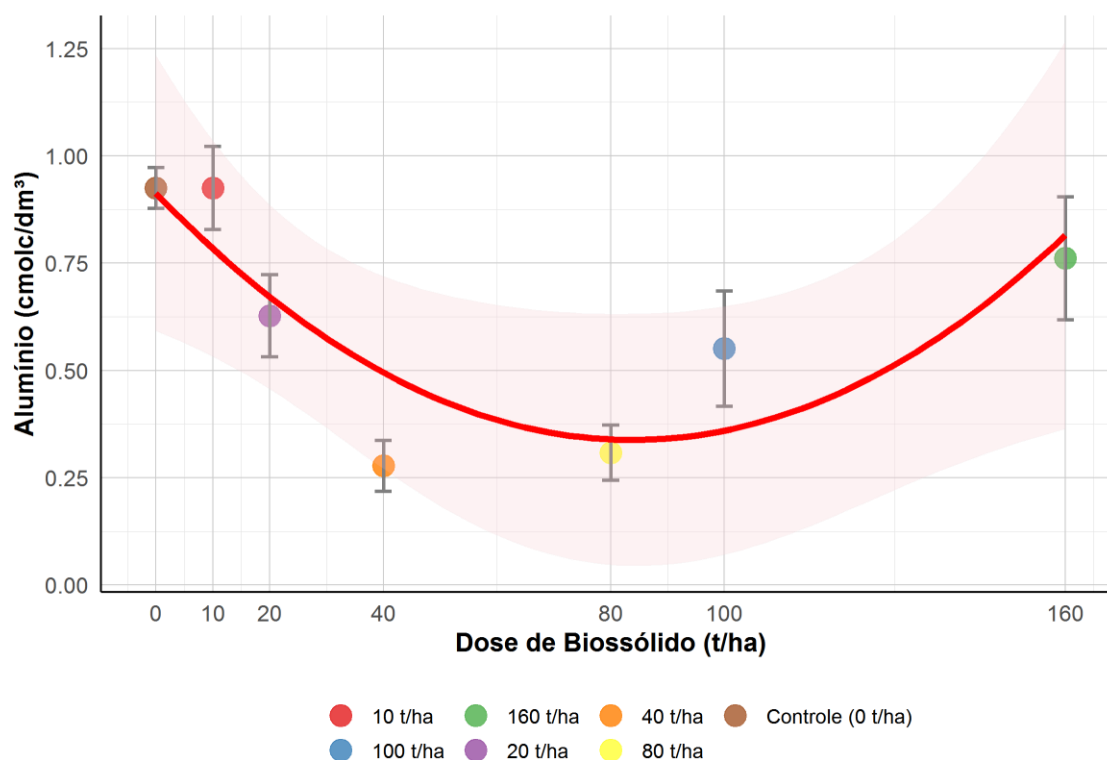
corretivo suficiente para deslocar o alumínio das posições de troca.

A partir dos tratamentos intermediários (T3 a T5), verifica-se uma redução gradativa do alumínio, coerente com o aumento do aporte de matéria orgânica e de bases provenientes do bio sólido. Essa redução está relacionada a dois mecanismos principais: (1) complexação do Al^{3+} por compostos orgânicos, que diminuem sua atividade tóxica na solução do solo (Barbosa *et al.*, 2017), e (2) elevação do pH em função da maior saturação por bases, levando à precipitação de $\text{Al}(\text{OH})_3$ (Resende Junior, 2016). Os modelos ajustados mostram que, para a maior parte das coletas, o ponto de mínimo do alumínio situa-se entre 60 e 100 t/ha, confirmando que as doses mais elevadas promovem condições mais favoráveis à neutralização do alumínio trocável.

Nos tratamentos de maior intensidade (T6 e T7), verifica-se que o alumínio tende a se estabilizar em níveis baixos, mas sem alcançar valores próximos de zero em todas as coletas. Em algumas situações, observa-se, inclusive, elevação leve ou resposta pouco expressiva, o que pode estar relacionado à saturação da capacidade do solo em reter bases ou à variabilidade inerente à dinâmica do alumínio, fator também refletido nos baixos valores de R^2 para parte das regressões. Ainda assim, a tendência geral indica que doses acima de 60 t/ha são capazes de reduzir significativamente o alumínio, sendo que a dose que maximiza o valor da variável geral estimada (83,7 t/ha) coincide com o intervalo em que essa queda se torna mais evidente.

A equação de regressão para alumínio, $y = 0,964 - 0,012x$, $R^2 = 0,823$ (Figura 4), indica uma relação linear negativa significativa entre a dose de bio sólido e os teores de alumínio trocável, evidenciando redução progressiva do Al com o aumento da dose aplicada. O teste F significativo ($p = 0,0312$) confirma que o modelo explica de forma estatisticamente válida a variação observada, enquanto os valores de R^2 (0,8234) e R^2 ajustado (0,7351) indicam elevado poder explicativo, sugerindo que grande parte da variabilidade do alumínio trocável é associada à dose do bio sólido. Esse comportamento é compatível com processos de complexação do Al por matéria orgânica e elevação indireta da saturação por bases, comuns em solos que recebem resíduos orgânicos estabilizados.

Figura 4. Relação dose-resposta do Alumínio em função dos tratamentos*



*Em que $R^2 = 0,823$ e equação, $y = 0,964 - 0,012x$
 Fonte: A autora (2026).

Entretanto, apesar de o procedimento de otimização indicar uma dose que maximiza o valor da variável estimado em 138,17 t/ha, associado a um alumínio mínimo de 0,1 cmolc/dm³, uma vez que o coeficiente quadrático é nulo, descaracteriza a presença de curvatura real no modelo. Assim, a chamada dose que maximiza o valor da variável reflete mais um resultado matemático do método de cálculo do que um ponto de mínimo biologicamente definido. O intervalo de confiança amplo (35,05 a 183,5 t/ha) reforça essa limitação, apontando elevada incerteza na estimativa pontual. Dessa forma, os resultados sustentam a conclusão de que o biossólido exerce efeito mitigador consistente sobre o alumínio trocável, mas não permitem afirmar, com robustez estatística, a existência de um ponto ótimo único de aplicação, sendo mais adequado interpretar o efeito como tendencial e dependente de condições edáficas e ambientais adicionais.

De modo geral, os resultados demonstram que o biossólido tem potencial para reduzir a toxicidade por alumínio em solos ácidos, contribuindo para melhorias estruturais e nutricionais importantes. A dose que maximiza o valor da variável estimada próxima de 83,7 t/ha representa

um valor coerente com sistemas de correção química mediada por resíduos orgânicos ricos em bases, reforçando o papel do bio sólido como alternativa viável para mitigação da acidez e promoção de condições mais favoráveis ao desenvolvimento vegetal.

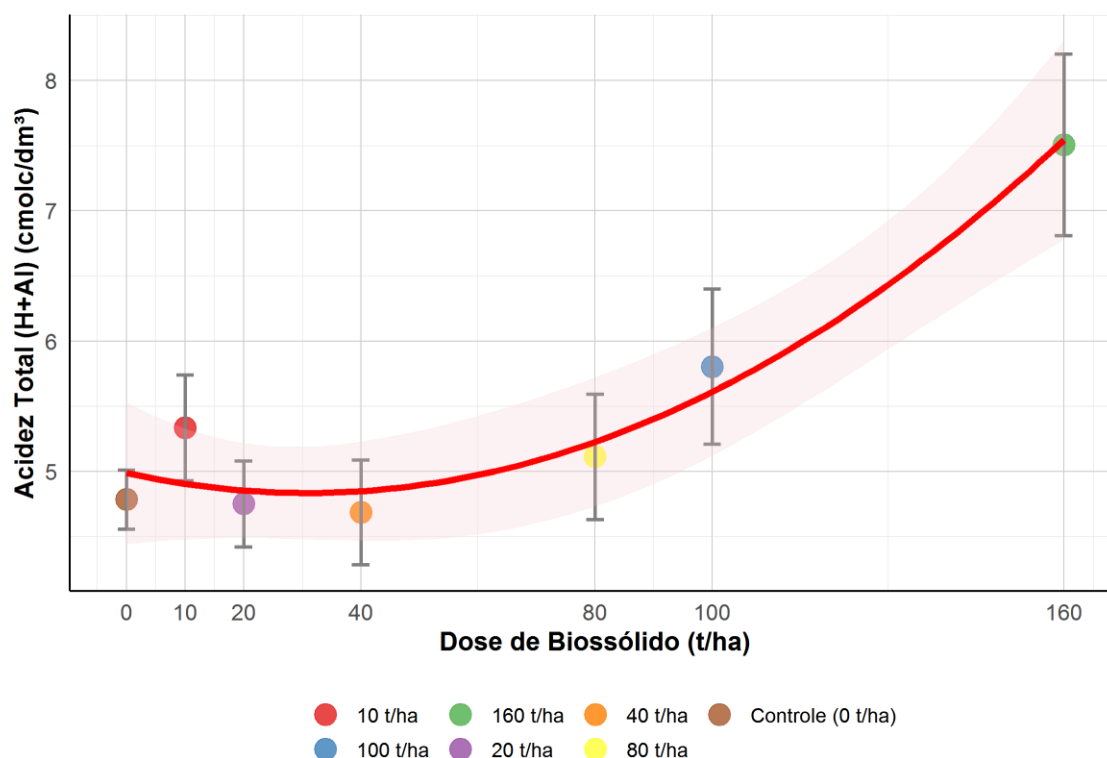
3.3. Acidez total (H+Al)

A avaliação da acidez total (H+Al) (Figura 5) nos diferentes tratamentos revela um comportamento complexo e característico de solos altamente ácidos, em que tanto o hidrogênio trocável quanto o alumínio reativo desempenham papel central na dinâmica química. As variações obtidas ao longo das 13 coletas demonstram que a resposta do solo à aplicação de bio sólido não ocorre de forma linear, refletindo a heterogeneidade do sistema e também a multiplicidade de mecanismos geoquímicos envolvidos na neutralização de acidez. De modo geral, valores médios elevados superiores a 5 cmolc/dm³ confirmam o caráter fortemente ácido do solo, típico de ambientes distróficos, onde a soma de cátions tóxicos domina o complexo de troca.

A análise da acidez total evidencia um comportamento não linear ao longo das doses de bio sólido, marcado por elevada variabilidade intratratamento. Observa-se que o controle (T1) apresenta média de 4,783 cmolc/dm³, enquanto doses intermediárias (10 a 80 t/ha) mantêm valores próximos, sem tendência clara de redução, oscilando entre 4,685 e 5,333 cmolc/dm³. A partir de 100 t/ha, contudo, verifica-se incremento expressivo da acidez total, culminando no tratamento T7 (160 t/ha), que apresentou a maior média (7,507 cmolc/dm³) e mediana (7,995 cmolc/dm³). Esse aumento sugere que, em doses elevadas, o bio sólido pode intensificar componentes da acidez potencial, possivelmente associados à mineralização da matéria orgânica e à liberação de hidrogênio e alumínio ligados aos colóides do solo.

Do ponto de vista estatístico, os resultados dos testes de Shapiro–Wilk ($p < 0,001$) e Levene ($p < 0,001$) indicaram não normalidade, o que confirma a heterogeneidade do comportamento da acidez total entre os tratamentos. Os elevados coeficientes de variação, especialmente em T2 (45,6%) e nos tratamentos de maior dose, reforçam a natureza dinâmica desse atributo químico, fortemente dependente de interações entre pH, alumínio trocável, matéria orgânica e capacidade tampão do solo. Assim, os dados revelam que, embora o bio sólido contribua para a modificação da acidez do sistema, doses elevadas tendem a aumentar a acidez total, exigindo cautela no manejo agrônomo e interpretação integrada com outros parâmetros de fertilidade, como pH, Al³⁺ e saturação por bases.

Figura 5. Relação dose-resposta do Acidez total em função dos tratamentos*



*Em que $R^2 = 0,940$ e equação, $y = 4,988 - 0,010x$
 Fonte: A autora (2026).

A acidez total do solo representa a soma dos íons hidrogênio (H^+) e alumínio trocável (Al^{3+}), constituindo um dos principais parâmetros para avaliação da necessidade de correção da acidez. Segundo Bettiol e Galvão (2006), esse fator é determinante para o crescimento vegetal, uma vez que a presença de Al^{3+} em níveis elevados pode restringir o desenvolvimento radicular e reduzir a absorção de nutrientes essenciais. Nesse contexto, biossólidos com propriedades alcalinas mostram-se eficazes na neutralização parcial da acidez do solo, reduzindo a saturação por alumínio tóxico e aumentando a disponibilidade de cátions básicos como cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e potássio (K^+).

Nos tratamentos de menor dose (T1 a T3), observa-se que a acidez total se mantém em níveis altos, com variações pouco expressivas, indicando que aplicações reduzidas de biossólido não promovem alterações substanciais na disponibilidade de H^+ e Al^{3+} . Isso acontece porque a contribuição de bases e compostos orgânicos ainda é insuficiente para deslocar o alumínio das posições de troca ou reduzir a protonação das superfícies minerais. A presença de equações com dose que maximiza o valor da variável positiva e valores de acidez ainda elevados

confirma que o efeito corretivo é inicial, limitado e condicionado à capacidade do material orgânico de atuar como agente tamponante.

Os bio sólidos podem influenciar outros atributos químicos do solo, como acidez total, pH e teores de carbono orgânico, promovendo melhorias graduais na fertilidade e na capacidade de retenção de nutrientes. Estudos demonstram que a aplicação contínua, mesmo em doses moderadas, aumenta a matéria orgânica do solo, melhora o complexo sortivo e eleva a soma de bases e a porcentagem de saturação por bases (V%) do solo, reforçando o papel dos bio sólidos como insumo sustentável para agricultura (Emmanouil *et al.*, 2024)

Conforme as doses aumentam (T4 e T5), torna-se mais evidente a redução da acidez total em várias coletas, especialmente naquelas cujos modelos indicam dose que maximiza o valor da variável entre 30 e 80 t/ha. Esse comportamento está associado à maior incorporação de matéria orgânica e ao aumento da soma de bases adicionadas, que contribuem tanto para a precipitação do alumínio quanto para a redução da carga positiva do hidrogênio na solução do solo. Esse processo ocorre por meio de reações de neutralização e complexação orgânica, que diminuem a atividade dos cátions ácidos e favorecem uma condição química menos restritiva para o sistema radicular. As coletas 3, 4 e 5 ilustram bem esse fenômeno, mostrando quedas substanciais na acidez total quando as doses se aproximam do ponto de mínimo previsto pelas equações ajustadas.

Além do efeito corretivo sobre o pH, a redução da acidez influencia positivamente a atividade microbiana do solo, estimulando os processos de mineralização da matéria orgânica e a ciclagem de nutrientes. Conforme Trannin, Siqueira e Moreira (2008) e Bittencourt *et al.* (2017), ambientes com acidez elevada tendem a limitar a fixação biológica de nitrogênio e a decomposição de resíduos orgânicos, comprometendo a produtividade e a qualidade biológica do solo. A aplicação de bio sólidos, ao aumentar a saturação por bases e reduzir o alumínio trocável, favorece o equilíbrio químico e cria condições propícias à atuação dos microrganismos benéficos.

Nos tratamentos de maior intensidade (T6 e T7), o comportamento da acidez torna-se mais variável, com algumas coletas apresentando mínimos em doses negativas, o que indica ausência de ponto de inflexão dentro do intervalo experimental. Esse comportamento sugere que, em determinados momentos, a aplicação de doses muito altas não promove redução adicional da acidez, ou até mesmo que o sistema apresenta uma saturação da capacidade de correção. Isso pode ocorrer por dois motivos principais: limite de tamponamento do solo, em que a introdução de matéria orgânica não é mais capaz de neutralizar H^+ ou precipitar Al^{3+} , e decomposição acelerada do material orgânico, que pode liberar ácidos orgânicos

temporariamente, elevando a acidez em algumas coletas. A predominância de modelos com R^2 intermediário reforça a complexidade desses processos e a influência de fatores ambientais que variam entre as coletas.

A análise conjunta das 13 coletas demonstra que, embora algumas apresentem modelos robustos e indicativos de redução clara da acidez com doses intermediárias, outras revelam estabilidade ou sensibilidade elevada a fatores externos. A dose que maximiza o valor da variável geral de 30,8 t/ha representa um ponto médio onde o sistema tende a apresentar redução perceptível da acidez sem que sejam observados efeitos de saturação ou reversão, como ocorre em doses extremas.

De maneira ampla, os resultados demonstram que a aplicação de biossólido tem potencial real para reduzir a acidez total do solo, especialmente quando utilizada em doses intermediárias, que promovem equilíbrio entre neutralização dos cátions ácidos e incremento de matéria orgânica. Contudo, as variações observadas entre as coletas também ressaltam que essa resposta não é estável no tempo e depende significativamente da mineralização da matéria orgânica, da umidade, da temperatura e de interações químicas entre os constituintes do solo. Assim, a incorporação sistemática do biossólido pode ser considerada uma estratégia eficaz de mitigação da acidez, mas deve ser acompanhada de monitoramento contínuo para avaliar a consistência dos efeitos ao longo dos ciclos agrícolas.

3.4. Interação pH, Al^{3+} e Acidez total (H+Al)

A interação entre alumínio trocável (Al), pH e acidez total constitui um dos pilares da compreensão da química de solos ácidos, especialmente em sistemas fortemente intemperizados ou submetidos a condicionantes que favorecem a acidificação. Nos tratamentos avaliados, observa-se uma relação inversa clara entre pH e alumínio, sendo que, quanto menor o pH, maiores são os teores de Al trocável. Esse padrão é consistente com o comportamento químico desse elemento, que se torna solúvel e altamente disponível em ambientes ácidos, intensificando tanto a acidez ativa (representada pelo próprio pH) quanto a acidez potencial, expressa pela acidez total.

O alumínio desempenha papel central na manutenção da acidez do solo, pois sua hidrólise libera íons H^+ , reforçando o caráter ácido do meio; quanto maior a concentração de alumínio disponível, mais baixo tende a ser o pH, instaurando um ciclo de retroalimentação que limita a disponibilidade de nutrientes básicos, eleva a toxicidade e compromete o desenvolvimento radicular das plantas. Em solos ácidos, especialmente com $pH \leq 5,5$, o

alumínio solúvel (Al^{3+}) domina as formas químicas presentes, aumentando sua toxicidade e reduzindo a saturação por bases (Violante *et al.*, 2010; Kopittke; Blamey 2016).

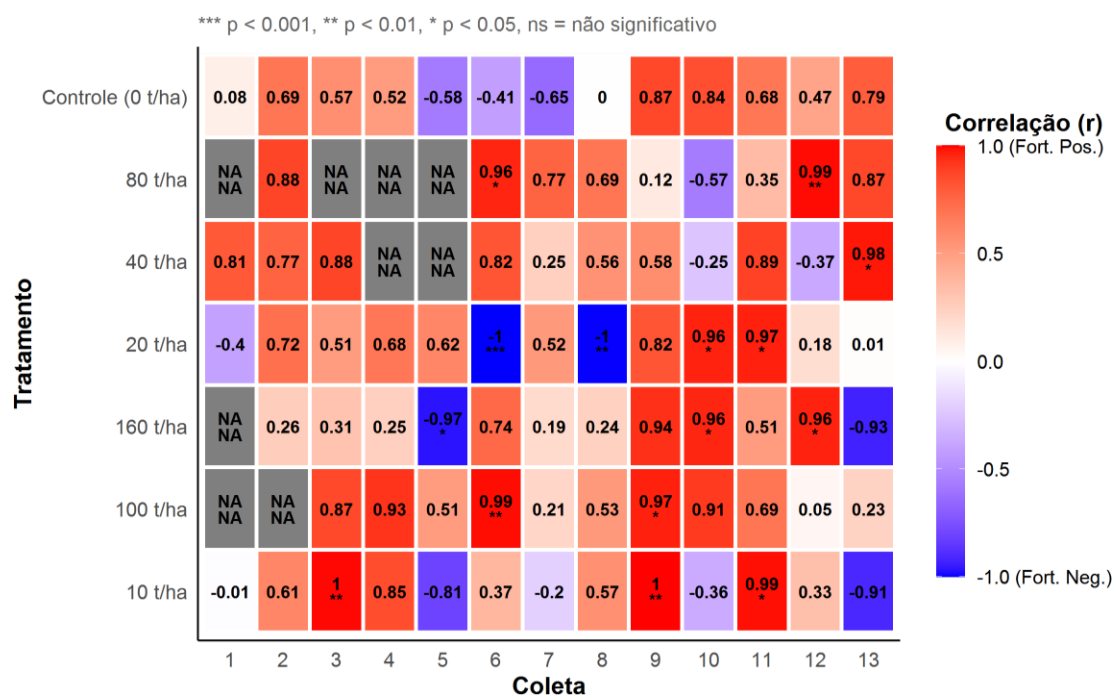
A acidez total do solo é fortemente influenciada pela presença de alumínio trocável, de modo que solos com elevados teores de Al^{3+} apresentam acidez total elevada, baixa saturação por bases e alta ocupação do complexo de troca por alumínio, situação típica de solos distróficos. A toxicidade do alumínio em pH muito baixo compromete a elongação celular, reduz a absorção de cátions essenciais, como Ca^{2+} e Mg^{2+} , e limita o crescimento radicular (Kopittke; Blamey 2016; Santos; Silva 1993).

Além disso, pequenas variações no pH, por exemplo, elevando-o para entre 5,0 e 5,5, podem provocar reduções profundas na solubilidade do Al^{3+} , diminuindo sua disponibilidade e, conseqüentemente, a acidez total do solo (Menzies *et al.*, 1994; Violante *et al.*, 2010). Dessa forma, a interação entre Al, pH e acidez total evidencia a necessidade de práticas de manejo que priorizem a neutralização do alumínio e o aumento da saturação por bases, de modo a restabelecer o equilíbrio químico do solo e melhorar a disponibilidade de nutrientes essenciais às plantas.

A interação entre alumínio trocável e acidez total evidencia um comportamento químico coerente com a dinâmica de solos ácidos, nos quais o alumínio constitui um dos principais componentes da acidez potencial. A correlação de Pearson positiva e de magnitude moderada ($r = 0,505$), altamente significativa ($p < 0,001$), indica que incrementos na acidez total tendem a ser acompanhados por maiores teores de alumínio trocável. Esse resultado é consistente com o entendimento de que a acidez total reflete não apenas a concentração de íons H^+ na solução do solo, mas também o alumínio adsorvido aos colóides, que pode ser progressivamente liberado conforme as condições químicas do sistema se tornam mais ácidas.

Do ponto de vista estatístico, a violação dos pressupostos de normalidade e homocedasticidade para ambas as variáveis reforça a complexidade dessa interação. A distribuição não normal do alumínio e da acidez total sugere influência de processos não lineares, como reações de hidrólise do Al^{3+} , complexação com matéria orgânica e efeitos-tampão do solo. Embora a correlação de Pearson seja robusta e significativa, esses resultados indicam que análises complementares, como a correlação de Spearman ou abordagens multivariadas, são recomendadas para captar, de forma mais fidedigna, a variabilidade intrínseca do sistema edáfico avaliado.

Figura 6. Heatmap interação da Acidez total em função dos Alumínios nos tratamentos*

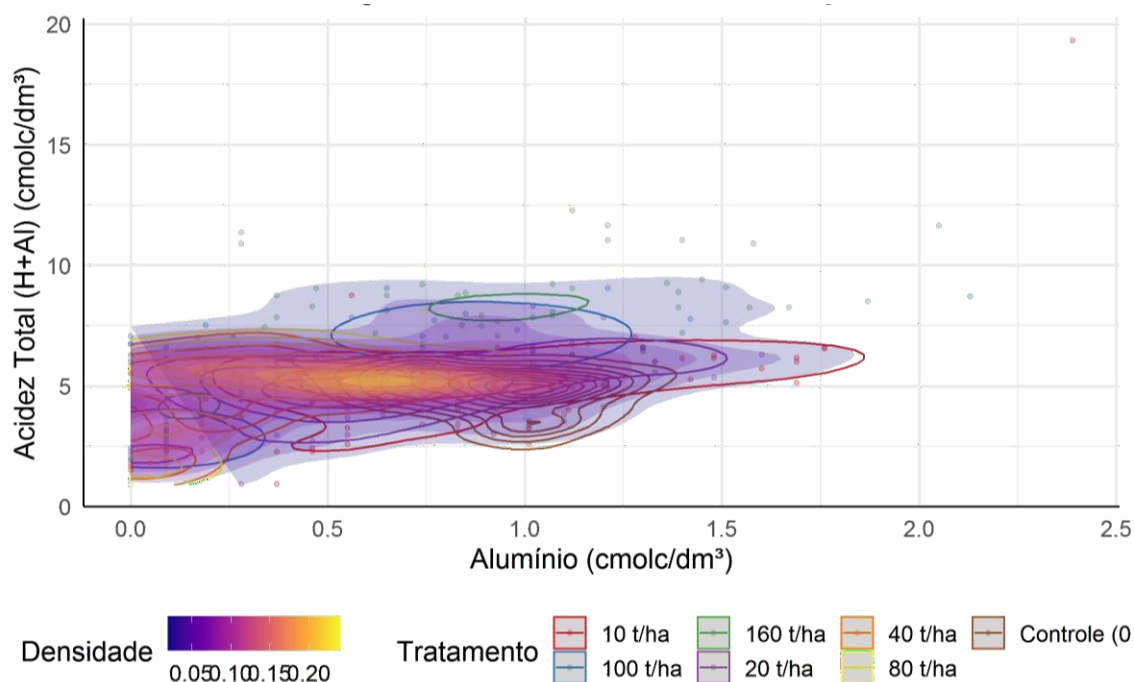


Fonte: A autora (2026).

*Vermelho: correlação positiva, Azul: correlação negativa

A análise do heatmap (Figura 6) e da densidade conjunta¹ (Figura 7) corrobora a existência dessa associação positiva, evidenciando padrões mais intensos em coletas específicas (3, 4 e 6) e em tratamentos intermediários (10, 20 e 80 t/ha). A presença de contornos elípticos moderadamente alongados na distribuição bivariada indica que, apesar da heterogeneidade entre tratamentos, há uma tendência central clara de covariação entre alumínio e acidez total. Esse comportamento sugere que determinadas doses de biossólido modulam simultaneamente ambos os atributos, possivelmente por alterações na capacidade de troca catiônica, no teor de matéria orgânica e na dinâmica do pH do solo.

Figura 7 - Densidade conjunta interação¹ da Acidez total em função dos Alumínio nos tratamentos



Fonte: A autora (2026).

¹ modela a relação de dependência entre variáveis, considerando como elas se comportam juntas, e não isoladamente

Os testes de Shapiro-Wilk revelaram que ambas as variáveis apresentam distribuição não normal, com valores de *p* extremamente baixos. Esse resultado indica a presença de assimetrias, possíveis valores extremos e influência de processos não lineares, especialmente quando modulados por diferentes doses de biossólido e condições ambientais. Adicionalmente, o teste de Levene aponta heterogeneidade de variâncias, evidenciando que a dispersão dos dados não é constante entre os grupos avaliados.

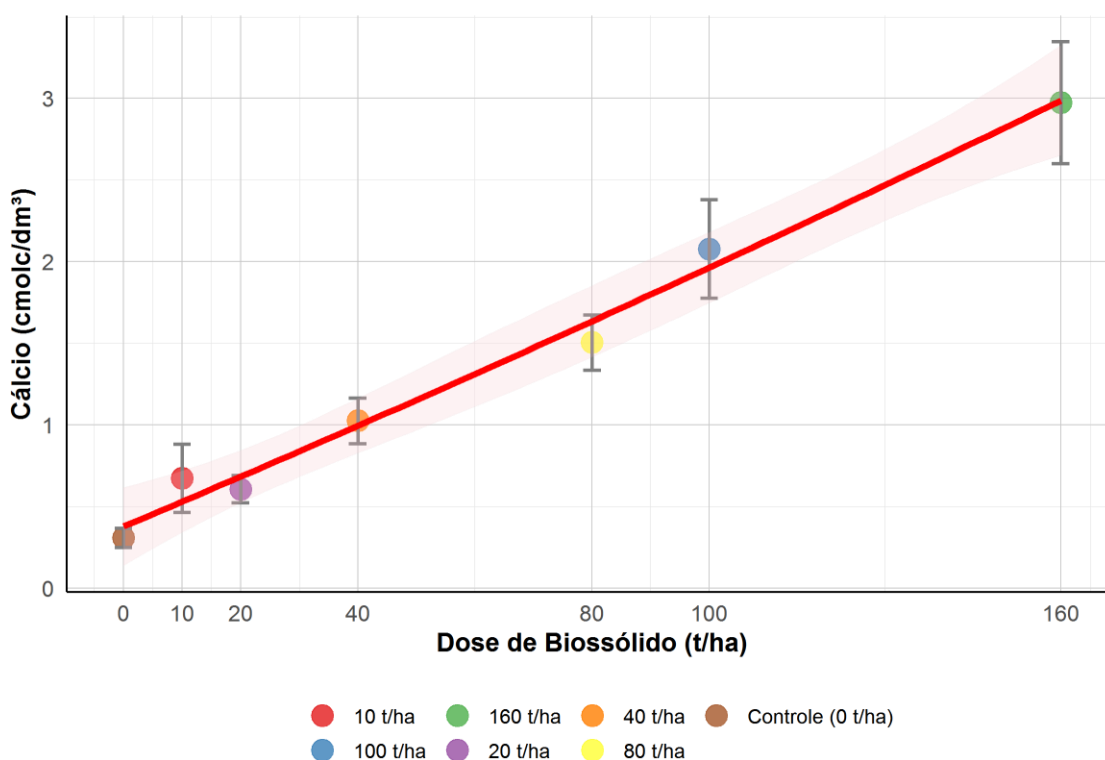
Sob a perspectiva do manejo agrônômico, a correlação positiva observada implica que estratégias voltadas à redução do alumínio trocável tendem, concomitantemente, a influenciar a acidez total do solo. No entanto, é fundamental ressaltar que a correlação não implica causalidade direta, sendo plausível a atuação de fatores adicionais, como textura, mineralogia e atividade microbiana. Assim, recomendam-se o monitoramento integrado desses parâmetros e a adoção de análises estatísticas mais abrangentes, de modo a subsidiar decisões de manejo mais seguras e sustentáveis, especialmente em sistemas que utilizam biossólidos como condicionadores do solo.

A análise dos teores de cálcio no solo (Figura 6) revela um comportamento diretamente influenciado pelos tratamentos aplicados, evidenciando a resposta química do meio diante das diferentes doses testadas. Em geral, observa-se que os valores de cálcio se mantêm baixos nos tratamentos iniciais, com tendência de aumento progressivo à medida que as doses são elevadas. Essa variação é coerente com processos de disponibilização iônica e com a dinâmica de troca catiônica do solo, especialmente em ambientes naturalmente caracterizados por baixa saturação por bases.

3.5. Cálcio

O cálcio é um dos principais cátions fornecidos pelos bio sólidos e exerce papel central na correção da acidez do solo, na estruturação de agregados e na estabilidade física do solo. Bio sólidos com altos teores de Ca aumentam a saturação por bases, reduzindo a toxicidade do alumínio e favorecendo o crescimento radicular. Baldotto *et al.* (2004) destacam que a aplicação de bio sólidos em Latossolos resultou em aumento expressivo de Ca trocável, melhorando a fertilidade química e a capacidade de suporte nutricional para plantas. Nos tratamentos T1 e T2 (Figura 8), verificam-se os menores valores de cálcio, indicando condições típicas de solos ácidos e distróficos, onde a presença desse nutriente tende a ser limitada.

Figura 8. Relação dose-resposta do Cálcio em função dos tratamentos*



*Em que $R^2 = 0,936$ e a equação $y = 0,32 + 0,019x$
Fonte: A autora (2026).

Essa baixa disponibilidade inicial sugere que o sistema possui reduzida capacidade de neutralizar cargas negativas do complexo sortivo, o que se reflete em menor estabilidade estrutural e maior susceptibilidade à acidez ativa e potencial. Tais valores baixos também reforçam o estado nutricional restritivo do solo antes da intervenção.

Com o aumento das doses nos tratamentos subsequentes, nota-se uma elevação gradual dos teores de cálcio, demonstrando que a aplicação dos tratamentos foi capaz de alterar a composição química do solo, enriquecendo-o com cátions básicos. Essa resposta é consistente com o comportamento esperado quando há introdução de materiais ricos em bases cambiáveis ou quando ocorre deslocamento do alumínio trocável, que é reduzido com o avanço dos tratamentos. O incremento do cálcio, portanto, representa não apenas um efeito direto da adição exógena, mas também um efeito indireto associado à melhoria da saturação por bases.

Além disso, o Ca influencia diretamente a disponibilidade de fósforo, pois solos com níveis adequados de cálcio apresentam menor fixação de P e maior eficiência do fertilizante aplicado. A presença de Ca em biossólidos também contribui para a atividade microbiana, já que organismos do solo dependem de condições químicas equilibradas para decomposição da matéria orgânica (Bettiol; Galvão, 2006; Paiva, 2003). Dados obtidos por Trannin *et al.* (2008) mostram que doses elevadas de biossólidos ($20\text{--}40\text{ t ha}^{-1}$) podem elevar o cálcio de 2 mmolc dm^{-3} para até 300 mmolc dm^{-3} em Latossolos. Esse aumento demonstra o potencial dos biossólidos em substituir parcialmente calcários e corretivos minerais, especialmente em solos ácidos de baixa fertilidade.

Nos tratamentos intermediários, como T3 e T4, a elevação do cálcio sugere o início de um processo de reequilíbrio químico, no qual o solo passa a apresentar melhores condições para o desenvolvimento radicular e para o funcionamento biológico. Esse comportamento evidencia que, a partir de determinado ponto, o aporte proporcionado pelos tratamentos começa a superar as perdas por lixiviação ou adsorção limitada, favorecendo a manutenção do nutriente na solução do solo.

Nos tratamentos de maior dose, observa-se uma estabilização nos valores de cálcio, indicando que o sistema pode ter alcançado um limite de retenção ou saturação. Esse fenômeno é comum em solos com capacidade de troca catiônica relativamente baixa, nos quais a adição contínua não gera aumentos proporcionais devido ao preenchimento das cargas disponíveis. Assim, o patamar atingido nas maiores doses sugere que o solo respondeu positivamente, mas

dentro de sua capacidade físico-química intrínseca.

De modo geral, os resultados referentes ao cálcio revelam uma clara tendência de incremento com a aplicação dos tratamentos, refletindo melhoria da fertilidade do solo e redução das condições adversas associadas à acidez. Os teores de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) presentes no bio sólido são igualmente importantes, contribuindo para a correção da acidez do solo e o equilíbrio de cargas na CTC. Shi *et al.* (2022) observaram que mesmo pequenas doses de bio sólido são capazes de suprir as necessidades desses nutrientes, enquanto Carneiro (1995) destaca que o pH ideal para substratos de mudas florestais varia entre 5,0 e 7,0.

A variação observada ao longo dos tratamentos demonstra que o sistema é sensível às alterações químicas promovidas, havendo relação direta entre a magnitude da dose e o teor do nutriente disponível. Esses dados, portanto, reforçam a importância do cálcio como elemento-chave na correção e equilíbrio do solo, além de seu papel fundamental no desenvolvimento das plantas e na estruturação dos agregados.

3.6. Magnésio

A análise dos teores de magnésio (Figura 9) revela um comportamento extremamente variável, refletindo tanto as características intrínsecas do solo quanto a resposta não linear às diferentes doses de bio sólido aplicadas.

Em termos gerais, os valores de magnésio apresentaram grande amplitude, variando de concentrações próximas a zero até valores superiores a 1,5 cmolc/dm³, indicando que o sistema analisado possui elevada suscetibilidade a flutuações químicas e ambientais que interferem na disponibilidade deste cátion bivalente. A média geral, de 0,834 cmolc/dm³, demonstra que, apesar da existência de valores máximos elevados, o padrão predominante é de baixa saturação por magnésio, característica comum em solos ácidos e com baixa capacidade de troca catiônica.

A análise descritiva do magnésio evidencia incremento progressivo dos valores médios à medida que aumentam as doses de bio sólidos, passando de 0,338 cmolc dm⁻³ no tratamento controle (T1) para 1,665 cmolc dm⁻³ no tratamento de maior dose (T7 – 160 t ha⁻¹). Esse comportamento indica aporte efetivo de Mg²⁺ ao solo, coerente com a composição típica dos bio sólidos e com sua capacidade de enriquecer a fase trocável do complexo sortivo. As medianas acompanham essa tendência ascendente, sobretudo a partir de 40 t ha⁻¹, sugerindo que o aumento não se restringe a valores extremos, mas reflete deslocamento real da distribuição dos dados.

Observa-se, entretanto, elevada variabilidade nos tratamentos de menor dose, especialmente no controle e em T2 e T3, conforme evidenciado pelos altos desvios-padrão e coeficientes de variação ($CV > 200\%$). Esse padrão sugere forte influência de heterogeneidades intrínsecas do solo e da liberação inicial do magnésio, possivelmente associada a processos de mineralização irregular e redistribuição iônica. À medida que as doses aumentam, ocorre redução consistente do CV, atingindo 48,9% em T7, o que indica maior estabilidade e homogeneidade do teor de Mg^{2+} em doses mais elevadas de biossólidos.

Do ponto de vista estatístico, o teste de Shapiro-Wilk indica não normalidade ($p < 0,001$), revelando assimetria e possível presença de valores extremos, comuns em atributos químicos do solo. Em contrapartida, o teste de Levene aponta homogeneidade de variâncias ($p = 0,968$), sugerindo que, apesar da não normalidade, a dispersão dos dados é comparável entre os tratamentos. Em conjunto, esses resultados reforçam que a aplicação de biossólidos promove aumento consistente do magnésio trocável, com maior previsibilidade e controle da variabilidade em doses intermediárias e altas, aspecto relevante para o manejo da fertilidade do solo.

A regressão quadrática ajustada para o magnésio (Figura 9) indica uma tendência positiva de resposta às doses de biossólidos, expressa pela equação $y = 4,068 + 0,006x$, sugerindo aumento gradual do teor de Mg^{2+} com o incremento das doses aplicadas. A estimativa da dose que maximiza o valor da variável em $84,2 \text{ t ha}^{-1}$, associada a um valor ótimo de $4,31 \text{ cmolc dm}^{-3}$, indica um ponto de máximo técnico dentro da faixa avaliada, reforçado pelo intervalo de confiança bootstrap ($28,41\text{--}124,57 \text{ t ha}^{-1}$), que caracteriza ampla incerteza, mas mantém a dose que maximiza o valor da variável em níveis intermediários a elevados.

O teste F não significativo ($p = 0,3725$) indica que, estatisticamente, a regressão não apresenta ajuste robusto, sendo mais indicativo de tendência agrônômica do que de uma relação causal consolidada entre dose de biossólido e disponibilidade de magnésio. Especialmente nas coletas 3 a 11, o modelo explica menos de 37% da variação observada, sugerindo forte influência de fatores externos, tais como umidade, dinâmica de lixiviação, mobilidade do magnésio e condições microambientais no solo (ANEXO).

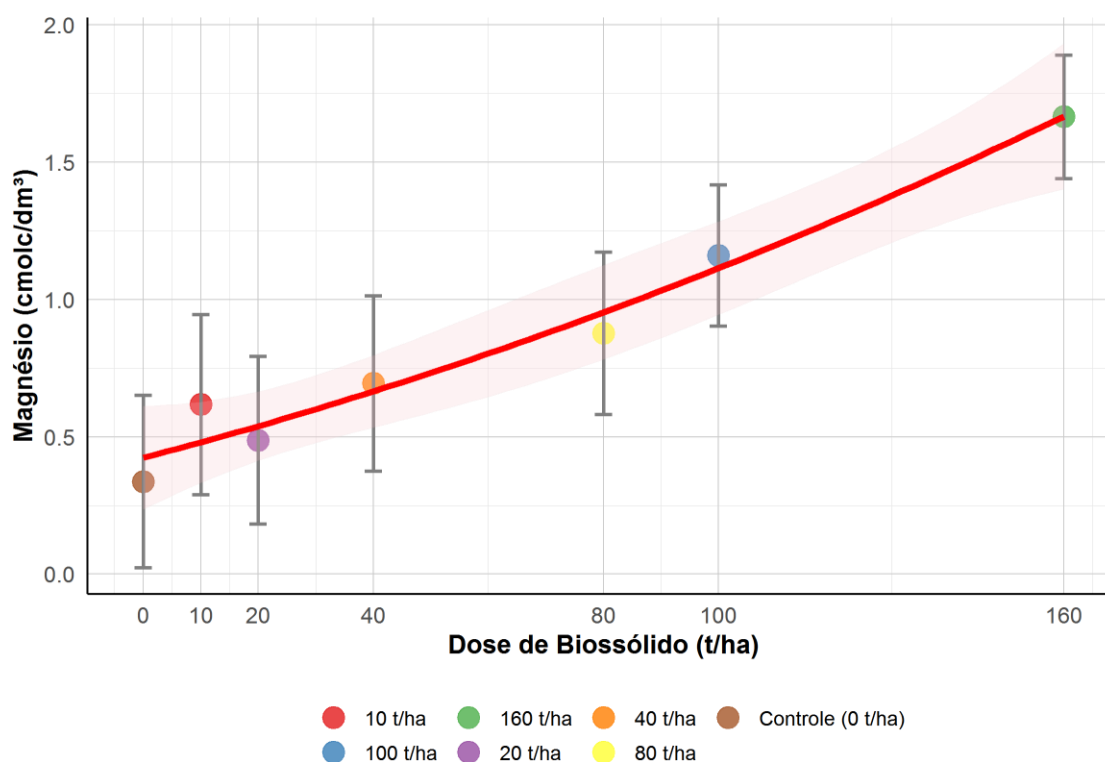
Apesar de toda a variabilidade, há um padrão que se mantém, pois a maioria das coletas aponta coeficiente linear positivo, indicando que, independentemente da inconsistência nas doses ótimas, o aumento da aplicação de biossólido tende a promover incremento nos teores de magnésio. Essa tendência é confirmada pela média geral crescente e pela predominância de valores positivos nos coeficientes lineares das regressões. Assim, embora os modelos não consigam estimar, de maneira robusta, uma dose agronomicamente recomendável, eles

sustentam a conclusão de que o biossólido contribui para a elevação do magnésio no solo, ainda que de forma moderada e com grande oscilação.

A baixa previsibilidade observada (R^2 baixo) indica que o comportamento do magnésio depende mais da interação do solo e da dinâmica ambiental do que da dose aplicada isoladamente. Assim, a recomendação prática é trabalhar com faixas de dose já validadas experimentalmente, evitando extrapolações matemáticas que não encontram respaldo fisiológico ou agrônômico.

O magnésio é essencial para a fotossíntese, pois faz parte da molécula de clorofila e atua na ativação de várias enzimas envolvidas no metabolismo vegetal. Biossólidos com teores adequados de Mg contribuem para o equilíbrio nutricional do solo, aumentando a saturação por bases e reduzindo deficiências comuns em Latossolos, que são solos naturalmente ácidos.

Figura 9. Relação dose-resposta do Magnésio em função dos tratamentos*



*Em que $R^2 = 0,08$ e a equação $y = 4,068 + 0,006x$
 Fonte: A autora (2026).

Baldotto *et al.* (2004) ressaltam que a aplicação de biossólidos promoveu aumento de Mg trocável, embora em menor magnitude que o Ca, dependendo da composição inicial do

resíduo. O Mg presente nos biossólidos também participa de interações com outros cátions, como Ca e K, influenciando a relação cátions trocáveis do solo. Em solos com baixa capacidade de troca, o aporte de Mg pode melhorar a fertilidade e a retenção de nutrientes, prevenindo lixiviação. Segundo Trannin *et al.* (2008), mesmo em doses altas de biossólidos, o aumento de Mg tende a ser mais modesto que o de Ca, indicando que o manejo do Mg deve ser planejado de forma complementar, especialmente quando o solo apresenta deficiências crônicas. Ainda assim, os biossólidos representam fonte confiável de Mg para correção química do solo.

3.7. Potássio

A análise dos resultados para potássio evidencia um comportamento heterogêneo e não normal, fortemente influenciado pelas doses de biossólidos. A estatística descritiva mostra que o tratamento controle (T1) apresentou média de $0,926 \text{ cmolc dm}^{-3}$, valor que se mantém em T2 (10 t ha^{-1}), indicando ausência de resposta imediata nas doses iniciais. A partir de 20 e 40 t ha^{-1} (T3 e T4), observa-se redução expressiva nos valores médios, com destaque para T4 ($0,278 \text{ cmolc dm}^{-3}$), sugerindo possível efeito de diluição, redistribuição do K no complexo de troca ou competição com outros cátions, como Ca^{2+} e Mg^{2+} . Em doses mais elevadas (80 a 160 t ha^{-1}), há recuperação parcial dos teores médios, especialmente em T6 e T7, indicando resposta não linear à aplicação do biossólido.

Os coeficientes de variação elevados, variando de 52% a 95%, caracterizam alta dispersão dos dados, sobretudo nos tratamentos com biossólidos, o que é comum para o potássio em solos, dada sua elevada mobilidade e sensibilidade a processos como lixiviação e absorção rápida pelas plantas (Malavolta, 2006). A ampla diferença entre valores mínimos e máximos reforça essa instabilidade, sugerindo que o potássio responde de forma dinâmica às doses aplicadas e às condições físico-químicas do solo ao longo do tempo.

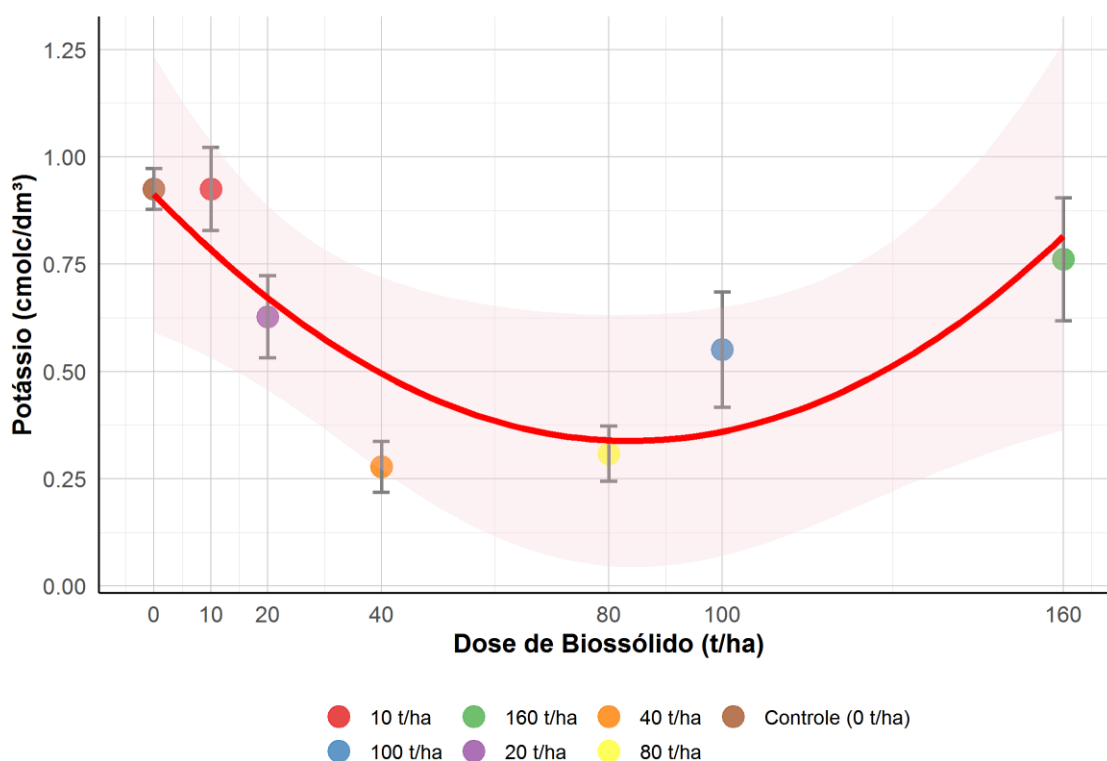
Do ponto de vista estatístico, o teste de Shapiro–Wilk indicou ausência de normalidade, enquanto o teste de Levene confirmou heterogeneidade de variâncias, evidenciando que os dados não atendem aos pressupostos básicos para análises paramétricas clássicas.

Em conjunto, os resultados indicam que a aplicação de biossólidos promove alterações significativas na disponibilidade de potássio, porém com resposta irregular e dependente da dose, caracterizando um padrão não linear. Tal comportamento sugere que o manejo do potássio via biossólidos deve considerar faixas ótimas de aplicação, associadas ao monitoramento contínuo do solo, a fim de maximizar benefícios agrônômicos e evitar perdas

por lixiviação ou desequilíbrios nutricionais.

A análise dos teores de potássio (Figura 10) revela um comportamento mais estável em comparação ao cálcio e ao magnésio, embora ainda apresente variações expressivas influenciadas pelas doses de biossólido e pelas condições ambientais associadas a cada coleta. O potássio médio geral foi de 69,789 mg/dm³, com uma amplitude considerável entre 33,33 e 416,65 mg/dm³, indicando a presença de momentos de acúmulo expressivo do nutriente no sistema. Apesar dessa amplitude, os valores mostram clara tendência de resposta ao aporte do biossólido, sugerindo que a matéria orgânica e a liberação gradual dos componentes minerais contribuíram para elevar, em diferentes intensidades, a disponibilidade de potássio no solo.

Figura 10. Relação dose resposta do Potássio em função dos tratamentos*



*Em que $R^2 = 0,742$ e a equação $y = 0,913 - 0,014x$
 Fonte: A autora (2026).

A análise integrada dos resultados para o potássio evidencia um comportamento altamente variável, porém com resposta sistemática às doses de biossólidos. A estatística descritiva geral indica média de 0,625 cmolc dm⁻³, classificada como alta, mas acompanhada de coeficiente de variação elevado (75,3%), o que caracteriza forte heterogeneidade dos dados. Essa amplitude expressiva (0–2,39 cmolc dm⁻³) sugere influência de fatores adicionais, como

característica intrínseca do solo, dinâmica de liberação do K a partir do bio sólido, lixiviação e interação com outros cátions trocáveis, especialmente cálcio e magnésio.

O potássio é um nutriente altamente móvel no solo e essencial para regulação osmótica, resistência a estresses e qualidade fisiológica das plantas. Bio sólidos ricos em K contribuem significativamente para a fertilidade química, especialmente em solos de baixa fertilidade ou com histórico de esgotamento mineral. Baldotto *et al.* (2004) indicam que a aplicação de bio sólidos aumentou os níveis de K trocável, ainda que o efeito dependa da mineralogia do solo e da quantidade de matéria orgânica presente.

O modelo de regressão quadrática geral (Figura 10) apresentou bom ajuste ($R^2 = 0,7418$), indicando que cerca de 74% da variação do potássio são explicados pela dose aplicada. A curva ajustada é côncava para cima, caracterizando uma relação em que o potássio atinge um valor mínimo técnico na dose estimada de $83,7 \text{ t ha}^{-1}$, correspondente a $0,34 \text{ cmolc dm}^{-3}$, classificado como nível médio. Esse resultado sugere que, até essa faixa, ocorre reorganização do potássio no complexo de troca possivelmente associada à diluição relativa, competição iônica ou redistribuição entre formas trocáveis e não trocáveis antes de incrementos mais consistentes em doses superiores.

A análise por coleta reforça a consistência do padrão dose-resposta, uma vez que todas as 13 coletas apresentaram doses ótimas calculadas, variando entre $63,7$ e $138,2 \text{ t ha}^{-1}$, com média próxima de 87 t ha^{-1} . Observa-se, ainda, uma tendência temporal de redução das doses ótimas, indicando possível efeito cumulativo do bio sólido no solo, com maior eficiência do fornecimento de potássio ao longo do tempo. Do ponto de vista prático, os resultados indicam que doses em torno de $80\text{--}90 \text{ t ha}^{-1}$ representam um intervalo tecnicamente consistente para o manejo do potássio, embora a elevada variabilidade observada justifique monitoramento contínuo e o uso de análises complementares para maior segurança agrônômica e ambiental.

O K dos bio sólidos tem interação direta com a CTC do solo, pois solos com alta matéria orgânica e CTC aumentada retêm melhor o potássio aplicado, reduzindo perdas por lixiviação. Isso é particularmente importante em regiões de alta pluviosidade ou solos arenosos, onde a deficiência de K pode limitar o crescimento vegetal. Trannin *et al.* (2008) observaram aumento de K trocável proporcional à dose de bio sólidos ($20\text{--}40 \text{ t ha}^{-1}$), demonstrando que os bio sólidos podem ser utilizados como fonte complementar ou substitutiva de fertilizantes minerais potássicos em cultivos agrícolas.

Quando se observa a equação geral “Potássio = $0.913 - 0.014x$ ”, nota-se que o modelo indica uma tendência de incremento do potássio com a aplicação do bio sólido, embora a presença do termo quadrático positivo sugira ligeira desaceleração desse aumento em doses

mais elevadas. O $R^2 = 0.7418$ é moderado, indicando que 74% da variação total do potássio podem ser explicados pelas doses aplicadas. Trata-se de um desempenho estatístico superior ao obtido para magnésio e inferior ao observado para parâmetros mais estáveis, como pH. Esse valor reforça que o potássio responde ao bio sólido, mas mantém sensibilidade relativamente alta a fatores ambientais, como precipitação acumulada, dinâmica de mineralização, interação com cálcio e magnésio e possíveis perdas por lixiviação, especialmente plausíveis em solos com baixa CTC ou manejo inadequado da umidade.

O K é nutriente de alta solubilidade e, geralmente, aparece em menores concentrações em bio sólidos secos, como ressaltam Berton e Nogueira (2010). Isso ocorre devido à diluição desses elementos durante o processo de desagregamento do lodo, que é composto por cerca de 99,9% de água. Ainda assim, mesmo em concentrações reduzidas, o K desempenha papel essencial na regulação osmótica e no metabolismo vegetal, sendo considerado um elemento estratégico para o equilíbrio nutricional (Camargo; Bettiol, 2006).

O potássio é um dos nutrientes mais sensíveis à oscilação ambiental entre as treze coletas. Parte disso se deve à sua natureza fisiológica no solo, pois, por ser um cátion monovalente, possui baixa força de adsorção e alta mobilidade, o que facilita tanto seu aumento por mineralização do bio sólido quanto sua redução por transporte na solução do solo. Essa característica explica parcialmente o motivo de as respostas do potássio serem mais variáveis e, ao mesmo tempo, mais responsivas do que as observadas para cálcio, cujas ligações ao complexo coloidal são mais estáveis.

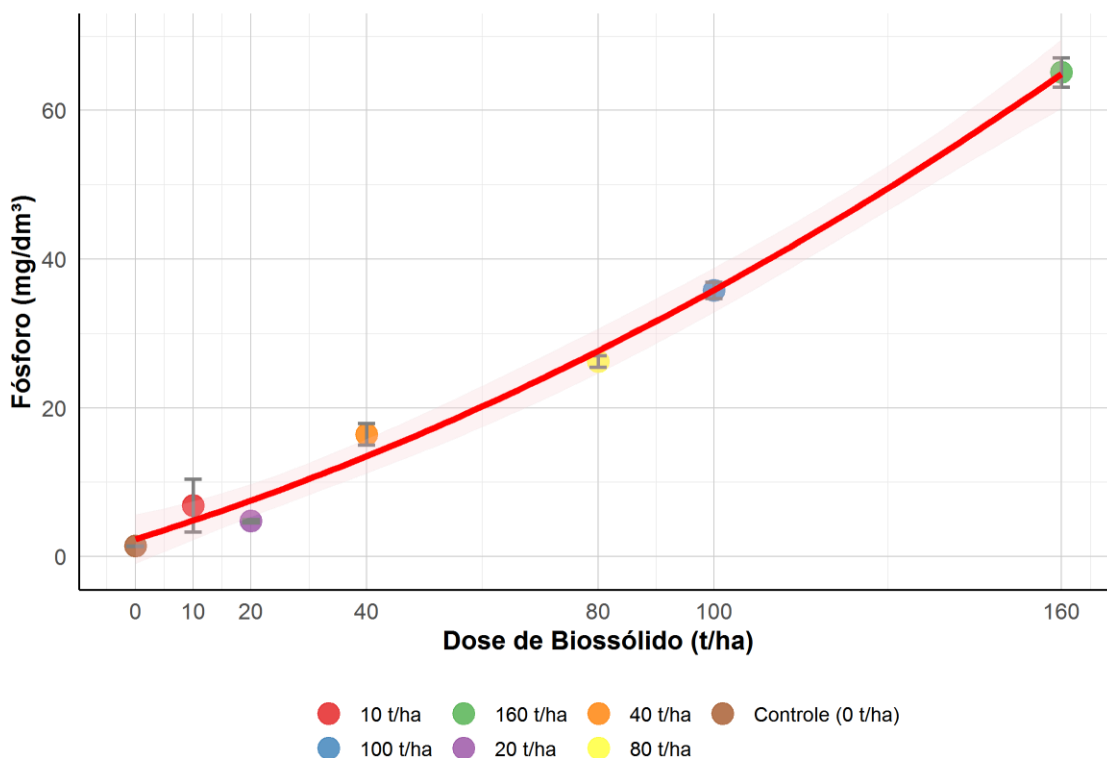
Assim, a análise do potássio confirma que o nutriente é altamente responsivo ao bio sólido, porém de forma sensível às oscilações ambientais e às características do solo. Do ponto de vista agrônomo, os dados sustentam o uso do bio sólido como fonte suplementar de potássio, desde que manejado com atenção às condições de umidade e à capacidade de retenção do solo, para evitar perdas e maximizar a eficiência nutricional.

3.8.Fósforo

A interpretação dos resultados para fósforo (P) evidencia uma resposta fortemente positiva e não linear à aplicação de bio sólidos, acompanhada por elevada variabilidade dos dados. O tratamento controle (T1) apresentou média de apenas $1,397 \text{ mg dm}^{-3}$, caracterizando baixo teor de fósforo disponível. Com a aplicação de bio sólidos, observa-se aumento progressivo dos teores médios, especialmente a partir de 40 t ha^{-1} (T4), com incrementos expressivos em T5, T6 e T7, alcançando $65,1 \text{ mg dm}^{-3}$ em 160 t ha^{-1} , valor classificado como

alto. Esse padrão confirma o elevado potencial dos biossólidos como fonte de fósforo, nutriente tipicamente limitante em solos tropicais altamente intemperizados.

Figura 11. Relação dose-resposta do Fósforo em função dos tratamentos



*Em que $R^2 = 0,992$ e a equação $y = 2,325 + 0,242x + 0,001x^2$

Fonte: A autora (2026).

A estatística descritiva geral revela média global de $22,37 \text{ mg dm}^{-3}$, classificada como nível médio, porém acompanhada de coeficiente de variação extremamente elevado (104,46%), indicando heterogeneidade acentuada entre tratamentos e coletas. Essa variabilidade é particularmente evidente em T2 (10 t ha^{-1}), que apresentou valores máximos muito elevados (até $186,31 \text{ mg dm}^{-3}$), sugerindo ocorrência pontual de acúmulo ou liberação intensa de fósforo, possivelmente associada à mineralização rápida da fração orgânica do biossólido ou à baixa capacidade de adsorção inicial do solo. A amplitude reforça o caráter dinâmico do fósforo e sua forte dependência das condições químicas do solo, como pH, teor de óxidos de Fe e Al e saturação por bases.

Do ponto de vista estatístico, o teste de normalidade indicou distribuição não normal ($p < 0,05$), o que, aliado à elevada dispersão, exige cautela na aplicação de testes paramétricos clássicos. Ainda assim, os modelos de regressão por coleta e o modelo geral,

apresentado na Figura 11, apresentaram coeficientes de determinação muito elevados (R^2 entre 0,62 e 0,99; R^2 geral = 0,992), demonstrando que a dose de biossólidos explica grande parte da variação observada nos teores de fósforo. A equação geral ($\text{Fósforo} = 2,325 + 0,242x + 0,001x^2$) indica relação dose–resposta predominantemente crescente, com aceleração do acúmulo em doses mais elevadas.

Em conjunto, os resultados indicam que o fósforo é o nutriente mais sensível e responsivo à aplicação de biossólidos, apresentando ganhos agronômicos expressivos, porém acompanhados de risco potencial de acúmulo excessivo em doses elevadas. Esse comportamento reforça a necessidade de definição criteriosa de doses, baseada no balanço nutricional da cultura e na capacidade de retenção do solo, além de monitoramento contínuo, a fim de evitar perdas ambientais por escoamento superficial ou lixiviação e assegurar o uso sustentável dos biossólidos como insumo agrícola.

O fósforo é um nutriente essencial para o crescimento das plantas, atuando em processos como fotossíntese, transferência de energia e formação de raízes e flores. Biossólidos são frequentemente ricos em P, principalmente na forma de fosfatos orgânicos e minerais. Baldotto *et al.* (2004) indicam que a aplicação de biossólidos em Latossolos aumentou significativamente a disponibilidade de fósforo no solo, especialmente nas camadas superficiais, favorecendo a absorção pelas plantas e a produtividade agrícola. Além de fornecer P diretamente, os biossólidos também influenciam a dinâmica do fósforo no solo ao aumentar o teor de matéria orgânica e a capacidade de troca catiônica (CTC). Isso reduz a fixação do fósforo em solos altamente intemperizados, comuns no Brasil, permitindo que o P se mantenha mais disponível para as culturas ao longo do tempo.

A presença sistemática de doses ótimas negativas ao longo das coletas é um indicativo direto de que os maiores teores medidos de fósforo ocorreram dentro do intervalo experimental, sobretudo nas doses mais altas (T5, T6, T7), mas que a geometria das curvas geradas pelos modelos quadráticos impossibilita a estimativa de um ponto de máximo real. Quando o termo quadrático é positivo, a curva tende à abertura ascendente, e a função atinge o mínimo no vértice, deslocando qualquer máximo para as extremidades não monitoradas do domínio experimental. Assim, matematicamente, o modelo estima pontos de máxima em doses negativas, mas, agronomicamente, a interpretação correta é que a aplicação crescente de biossólido promove aumento contínuo dos teores de fósforo ao longo das coletas, sem que tenha havido saturação detectável dentro do intervalo estudado.

A análise integrada dos dados reforça a particularidade da dinâmica do fósforo. Trata-se do nutriente mais suscetível à adsorção e fixação em solos ácidos, o que leva a

fenômenos de acúmulo inicial seguido de redução da disponibilidade, ou vice-versa, dependendo da saturação dos sítios de adsorção e da qualidade do material orgânico aplicado. O bioossólido, ao adicionar tanto matéria orgânica quanto fósforo prontamente disponível, atua reduzindo a força de adsorção ao competir com cargas negativas da MO e ao complexar cátions como Fe^{3+} e Al^{3+} , que são os principais responsáveis pela fixação do nutriente. Isso explica a forte resposta observada ao longo das coletas e, principalmente, os altos valores de R^2 , uma vez que o efeito do bioossólido sobre o fósforo é mais direto e menos dependente de processos ambientais difusos do que o observado para potássio.

De forma geral, a análise dos dados demonstra que o fósforo é altamente responsivo ao bioossólido e apresenta comportamento estatístico robusto e consistente. Suas variações ao longo das coletas estão associadas tanto ao aporte direto via resíduo quanto à capacidade da matéria orgânica em modular os processos de adsorção e desadsorção, além de possíveis efeitos de mineralização progressiva. Portanto, do ponto de vista agrônômico, os resultados indicam que o bioossólido é fonte eficaz de fósforo, especialmente nas doses altas, ainda que a determinação da dose recomendada deva ser baseada no comportamento observado dentro do intervalo experimental, e não nas extrapolações matemáticas geradas pelas curvas quadráticas.

3.9. Interação Cálcio, Magnésio e Potássio

A análise integrada do cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), potássio (K^+), fósforo (P) e pH evidencia uma resposta química coerente do solo à aplicação crescente de bioossólido, refletindo modificações simultâneas na disponibilidade de nutrientes e no estado de acidez do sistema. De modo geral, verificou-se que o pH atuou como eixo regulador das respostas observadas, uma vez que sua elevação gradual, mesmo que moderada, influenciou diretamente a solubilidade, a adsorção e o comportamento dos cátions básicos e do fósforo no complexo de troca.

A análise dos macronutrientes após a aplicação de bioossólidos revela respostas distintas em função das propriedades químicas do solo e da dinâmica de cada elemento. O cálcio (Ca) apresentou uma resposta linear, consistente e altamente explicável pelo modelo, corroborando estudos de Silva-Leal *et al.* (2021) e Rodriguez *et al.* (2020), que indicam aumento geral dos macronutrientes com o uso de bioossólidos. Esse comportamento era esperado, considerando que o Ca é um cátion majoritário presente em muitos bioossólidos, cuja mobilidade no solo é relativamente baixa, conferindo estabilidade à sua concentração. Isso indica que o resíduo funciona como fonte efetiva desse nutriente e contribui para a substituição

de cátions ácidos no complexo coloidal. Tal incremento está diretamente relacionado com o aumento do pH, a disponibilização de Ca^{2+} e a redução da acidez do solo, favorecendo a formação de condições menos agressivas às raízes.

De forma semelhante, o magnésio também respondeu positivamente às doses, embora com variação menos acentuada que o cálcio, sugerindo que sua dinâmica é mais dependente da composição intrínseca do bio sólido e menos sensível às oscilações de pH. O magnésio (Mg) apresentou comportamento extremamente variável ($R^2=0,123$), com leve tendência de aumento; sua alta mobilidade e suscetibilidade à lixiviação, especialmente em solos de baixa CTC, explicam a grande dispersão dos dados, refletindo não uma falha experimental, mas a captura fiel da dinâmica do nutriente.

O potássio (K) demonstrou uma resposta intermediária ($R^2=0,474$), mais estável que a do Mg, porém ainda sensível a fatores ambientais, compatível com sua natureza de cátion monovalente e móvel. Ele exibiu comportamento distinto, com aumentos relevantes nas doses intermediárias e tendência à estabilização ou leve declínio em valores mais elevados. Essa resposta está associada à alta mobilidade do K^+ no solo e à competição deste íon com Ca^{2+} e Mg^{2+} nos sítios de troca. Em fases de maior elevação do pH e maior oferta de cátions divalentes, ocorre substituição preferencial no complexo coloidal, o que explica a menor retenção de K^+ nas doses mais elevadas. Apesar disso, os níveis de potássio permaneceram superiores aos do tratamento controle, evidenciando seu aporte pelo bio sólido.

O fósforo, por sua vez, revelou forte dependência do pH, refletindo o equilíbrio entre solubilidade e fixação. Em condições de alta acidez, comuns no tratamento controle, o P tende a ser imobilizado pela presença de alumínio e ferro. À medida que o pH aumenta e o alumínio livre é reduzido, observa-se maior disponibilidade do fósforo, principalmente nas doses intermediárias, onde a acidez é amenizada, mas não a ponto de desencadear precipitações indesejadas com cálcio, o que ocorre em pH mais altos. Assim, o comportamento do P indica que o bio sólido não apenas adiciona fósforo ao sistema, mas cria condições químicas mais favoráveis à sua permanência em formas assimiláveis.

A interação entre esses nutrientes e o pH evidencia, portanto, que a aplicação de bio sólido promove uma reorganização do complexo de troca, elevando a saturação por bases e reduzindo a ação dos cátions ácidos, especialmente o alumínio. Cálcio e magnésio se destacam como os principais responsáveis pela correção da acidez, enquanto o fósforo e o potássio se beneficiam dessa mudança por mecanismos distintos: o primeiro, pela redução da fixação fosfática, e o segundo, pela maior competição nos sítios de troca em ambiente menos ácido. Assim, o conjunto dos resultados reforça que o manejo químico via bio sólido não é isolado

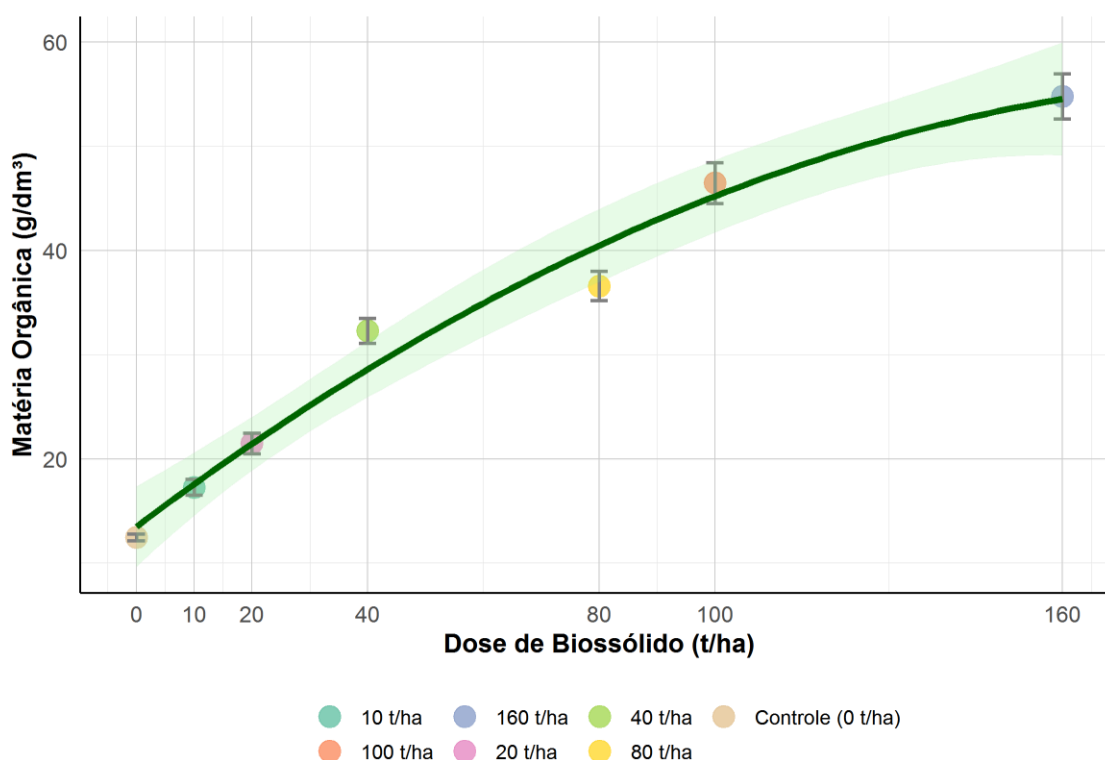
para cada nutriente, mas ocorre de forma sinérgica, mediada, sobretudo, pelas alterações no pH, que se configura como o principal modulador da disponibilidade e do equilíbrio nutricional do solo.

3.10. Matéria orgânica

A análise da matéria orgânica (MO) evidencia comportamento estatístico típico de atributos fortemente influenciados pela adição de resíduos orgânicos ao solo. Os testes de normalidade (Shapiro–Wilk) indicaram, de forma consistente, violação do pressuposto de normalidade ($p < 0,05$), enquanto o teste de Levene confirmou heterogeneidade de variâncias. Esses resultados refletem a natureza cumulativa e dinâmica da matéria orgânica no solo, cuja distribuição tende a ser assimétrica em função da dose aplicada, do tempo de mineralização e da variabilidade intrínseca dos processos biogeoquímicos, exigindo cautela na interpretação de testes paramétricos isolados.

Ao observar as equações de regressão (Figura 12), nota-se que a maioria das coletas apresenta coeficientes positivos para o termo linear e negativos para o termo quadrático, caracterizando curvas de resposta parabólicas com ponto de máximo, o que confirma que o biossólido, até certo limite, favorece o acúmulo de matéria orgânica.

Figura 12. Relação dose-resposta do MO em função dos tratamentos



*Em que $R^2 = 0,978$ e a equação $y = 13,496 + 0,418x - 0,001x^2$
 Fonte: A autora (2026).

A estatística descritiva geral mostra média de $31,63 \text{ g dm}^{-3}$, com amplitude elevada ($10,5$ a $67,5 \text{ g dm}^{-3}$) e coeficiente de variação de $48,2\%$, caracterizando variabilidade moderada a alta. Os valores de assimetria positiva ($0,422$) e curtose negativa ($-0,868$) indicam uma distribuição levemente assimétrica à direita e mais achatada que a normal, compatível com a concentração progressiva de MO nos tratamentos com maiores doses de biossólidos. Esse padrão confirma que a matéria orgânica responde de forma sensível à adição do resíduo, mas com intensidade variável entre tratamentos e coletas.

A comparação entre tratamentos evidencia um incremento consistente e progressivo da matéria orgânica com o aumento das doses de biossólidos. O solo controle apresentou média de $12,45 \text{ g dm}^{-3}$, enquanto os tratamentos com 100 e 160 t ha^{-1} alcançaram $46,49$ e $54,81 \text{ g dm}^{-3}$, respectivamente, representando aumentos superiores a quatro vezes em relação ao controle. Os coeficientes de variação relativamente baixos dentro de cada tratamento (≈ 9 a 16%) indicam boa estabilidade interna, sugerindo que, apesar da variabilidade global, o efeito do biossólido é consistente dentro de cada dose.

A regressão quadrática geral, que apresentou excelente ajuste ($R^2 = 0,978$; R^2 ajustado = $0,967$), evidenciou que quase toda a variação da matéria orgânica é explicada pela dose aplicada. A equação $MO = 13,496 + 0,418x - 0,001x^2$ revela uma resposta crescente com tendência à estabilização em doses mais elevadas, refletindo o equilíbrio entre aporte de carbono e processos de mineralização. Em conjunto, os dados demonstram que os biossólidos são altamente eficientes na elevação da matéria orgânica do solo, desde que manejados com doses tecnicamente adequadas e monitoramento contínuo.

Os resultados obtidos demonstram respostas quadráticas tanto da matéria orgânica (MO) quanto do carbono orgânico (CO) (Figura 13) à aplicação de biossólidos, com doses ótimas situadas entre 100 e 150 t ha^{-1} . Observou-se que a MO apresentou maior amplitude de valores, enquanto o CO respondeu de maneira mais gradual e amortecida. Essa diferença reflete a natureza distinta das frações que compõem cada parâmetro: a MO inclui frações lábeis e rapidamente mineralizáveis, explicando a maior variabilidade e os picos de enriquecimento; já o CO reflete preferencialmente frações mais estáveis, como o húmus, que se acumulam lentamente, porém de forma persistente. Esses achados corroboram o que foi relatado por Wijesekara *et al.* (2021), que também documentaram aumentos significativos no carbono

orgânico do solo após a aplicação de biossólidos. Dessa forma, evidencia-se que o biossólido não apenas fornece carbono prontamente mineralizável, mas contribui para a formação de estoques de carbono estável, elemento crucial para o sequestro de carbono de longo prazo e para a melhoria da estrutura física do solo.

A interpretação conjunta dos resultados (Figura 12) permite inferir que a matéria orgânica apresenta uma resposta positiva ao uso de biossólido, mas essa resposta é modulada por oscilações temporais intensas que não podem ser explicadas apenas pela dose aplicada. Coletas com R^2 superiores a 0,70, como as Coletas 1, 2, 7 e 9, evidenciam momentos em que a relação $MO \times$ dose foi mais estável e uniforme. Por outro lado, coletas de baixo R^2 , como a Coleta 3, demonstram que há períodos em que fatores externos predominaram sobre a influência do biossólido.

No estudo de Alves (2006), realizado em Latossolo, a aplicação de biossólidos resultou em melhorias nas propriedades químicas de solos altamente intemperizados, típicos de regiões tropicais. As doses variáveis do resíduo permitiram identificar limites de eficiência agrônômica, mostrando que a resposta química é dose-dependente e diretamente relacionada ao equilíbrio entre o aporte de matéria orgânica e a neutralização da acidez. Silva (2018) abordou o potencial de contaminação do solo, confirmando alterações positivas nas propriedades químicas, como aumento da fertilidade e disponibilidade de nutrientes, mas ressaltando a necessidade de monitorar metais pesados e compostos orgânicos persistentes. Essa análise amplia a compreensão sobre o manejo responsável e regulado desses resíduos.

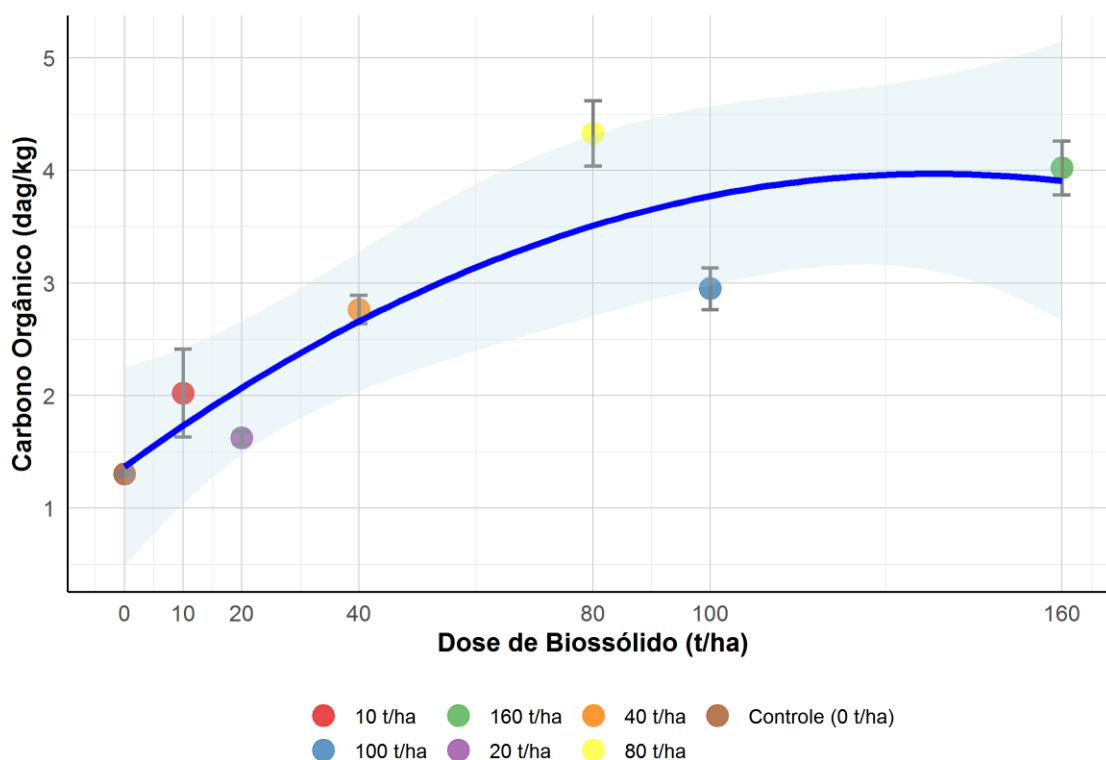
O esgoto doméstico é uma das fontes mais comuns de biossólidos, constituído principalmente por resíduos orgânicos provenientes de residências e pequenas empresas. Esses resíduos apresentam elevado teor de matéria orgânica. Entretanto, o esgoto doméstico também contém microrganismos patogênicos e, em alguns casos, metais pesados, tornando imprescindível o tratamento adequado em estações de tratamento de esgoto (ETE) antes de sua utilização agrícola (Brasil, 2006; Pereira, 2023).

Em síntese, os resultados reforçam que a aplicação de biossólido constitui uma estratégia eficaz para elevar os níveis de matéria orgânica no solo, porém essa eficiência está sujeita a variações significativas no tempo. A dose recomendada de aproximadamente 138 t/ha deve ser interpretada como referência média, devendo ser ajustada conforme condições edafoclimáticas e objetivos agrônômicos específicos. Por fim, a grande amplitude entre doses ótimas e o comportamento irregular de algumas coletas demonstram que a matéria orgânica é um indicador dinâmico, sensível e diretamente influenciado pela complexidade dos processos biogeoquímicos no solo.

3.11. Carbono orgânico

A análise do carbono orgânico (CO) (Figura 13) revela um padrão estatístico marcado por elevada heterogeneidade e forte assimetria, características típicas de atributos diretamente relacionados ao aporte de resíduos orgânicos. O teste de normalidade (Shapiro–Wilk) indicou violação consistente do pressuposto de normalidade ($p < 0,05$), enquanto os testes de Levene confirmaram heterogeneidade de variâncias entre os tratamentos. Esses resultados refletem a resposta não linear do carbono orgânico às doses de biossólidos, bem como a influência de processos de acúmulo, mineralização e redistribuição do carbono no solo ao longo do tempo, recomendando cautela na aplicação de testes paramétricos clássicos.

Figura 13. Relação dose-resposta do CO em função dos tratamentos



*Em que $R^2 = 0,793$ e a equação $y = 1,367 + 0,038x$
 Fonte: A autora (2026).

A estatística descritiva geral aponta média de $2,72 \text{ dag kg}^{-1}$, com amplitude elevada ($0,9$ a $20,83 \text{ dag kg}^{-1}$) e coeficiente de variação de $60,1\%$, evidenciando alta variabilidade dos dados. Os valores extremos de assimetria positiva ($4,135$) e curtose elevada ($40,01$) indicam a presença de cauda longa à direita, associada a valores muito altos de carbono orgânico em

alguns tratamentos, especialmente aqueles submetidos a maiores doses de biossólidos. Esse comportamento reforça o caráter cumulativo do carbono orgânico e sua sensibilidade ao manejo adotado.

A análise por tratamento demonstra incremento expressivo do carbono orgânico com o aumento das doses, sobretudo, a partir de 40 t ha⁻¹. O solo controle apresentou média de 1,30 dag kg⁻¹, enquanto os tratamentos com 80 e 160 t ha⁻¹ alcançaram 4,33 e 4,02 dag kg⁻¹, respectivamente, representando aumentos superiores a três vezes em relação ao controle. Apesar de alguns tratamentos revelarem coeficientes de variação elevados notadamente na dose de 10 t ha⁻¹, influenciada por valores extremos, observa-se tendência consistente de elevação do carbono orgânico com a intensificação da aplicação de biossólidos.

A regressão geral de dose–resposta, com bom ajuste ($R^2 = 0,793$; R^2 ajustado = 0,69), indica que aproximadamente 79% da variação do carbono orgânico são explicados pelas doses aplicadas. A equação $CO = 1,367 + 0,038x$ evidencia uma resposta predominantemente linear e crescente, com dose que maximiza o valor da variável estimada em 138,1 t ha⁻¹, resultando em 3,97 dag kg⁻¹ de carbono orgânico. Em conjunto, os resultados demonstram que a aplicação de biossólidos é altamente eficiente para o incremento do carbono orgânico do solo, especialmente em doses elevadas, embora tais níveis demandem avaliação criteriosa quanto à sustentabilidade ambiental e ao manejo de longo prazo.

Conforme Bittencourt *et al.* (2017), teores elevados de CO aumentam a capacidade de troca catiônica (CTC), melhoram a estrutura física, favorecem a retenção de água e estimulam a absorção de micronutrientes. Essa combinação de efeitos contribui para a sustentabilidade da fertilidade e para a manutenção da atividade biológica do solo.

Assim, ao integrar o uso de biossólidos com princípios de manejo ambiental e de economia circular, torna-se possível aliar produtividade e conservação ambiental. A adoção de técnicas de monitoramento e controle da composição química do solo é indispensável para garantir que os benefícios se mantenham a longo prazo, evitando riscos de acidificação, salinização ou contaminação. Desse modo, os biossólidos configuram-se como um insumo estratégico na transição para sistemas agrícolas mais sustentáveis e resilientes.

A interpretação das coletas finais (8 a 13), utilizadas como base para recomendação prática, mostra que as doses ótimas convergem para valores intermediários, resultando em uma recomendação média de 121 t/ha para o bioensaio com milho (Figura 11). Essa escolha é apoiada não apenas pela matemática dos modelos, mas também pelo princípio agrônomo segundo o qual amostras mais recentes refletem com maior precisão as condições atuais de fertilidade, mineralização e estabilidade do carbono no solo.

Os resultados indicam que a aplicação de biossólido tem potencial significativo para ampliar o teor de carbono orgânico do solo, embora a resposta seja modulada por variações temporais acentuadas. A dose recomendada de 121 t/ha representa um equilíbrio entre maximização do teor de carbono e estabilidade do sistema, constituindo uma referência adequada para o bioensaio com milho. As oscilações entre as coletas demonstram, contudo, que o carbono orgânico é uma variável extremamente sensível, cuja dinâmica depende tanto do manejo quanto das condições ambientais e biológicas do solo.

A análise integrada dos resultados de MO e CO revela padrões convergentes, mas também diferenças importantes na dinâmica de resposta dessas variáveis à aplicação de biossólido. Ambas são indicadores centrais da qualidade do solo e, por estarem diretamente relacionadas, dado que o carbono compõe aproximadamente 58% da matéria orgânica em condições médias, tendem a apresentar comportamento semelhante. Contudo, os resultados mostram que a relação entre elas, embora consistente em tendência geral, é modulada por fatores ambientais e biogeoquímicos que afetam diferencialmente cada fração orgânica ao longo do tempo.

Primeiramente, observou-se que tanto MO quanto CO exibem curvas quadráticas do tipo máxima na maior parte das coletas, com coeficientes lineares positivos e termos quadráticos negativos. Esse padrão sugere que o biossólido atua como fonte inicial de enriquecimento orgânico, até que uma dose de saturação seja atingida e os processos de mineralização passem a sobrepor-se ao aporte. A repetição deste comportamento, em ambas as variáveis, evidencia que o biossólido forneceu matéria orgânica fresca, facilmente decomponível, cuja estabilização dependeu da interação com fatores como umidade, temperatura e atividade microbiana.

Apesar dessa convergência geral, as respostas de MO e CO apresentam diferenças relevantes. A amplitude dos valores observados é muito maior para a MO (1,55 a 35,91 dag/kg) do que para o CO (0,9 a 20,83 dag/kg), indicando que a matéria orgânica total sofre efeitos mais intensos de adição e decomposição que o carbono orgânico estável. Isso ocorre porque a MO inclui frações lábeis, intermediárias e recalcitrantes, enquanto o CO tende a refletir, preferencialmente, frações mais estáveis, com menor variação temporal. Assim, a variabilidade elevada da MO ao longo das coletas é coerente com o fato de que partes significativas da matéria orgânica adicionada pelo biossólido são rapidamente mineralizadas, ao passo que o carbono orgânico responde de forma mais amortecida, revelando maior persistência no solo.

No que se refere às doses ótimas estimadas pelos modelos, nota-se que ambas as variáveis convergem para valores entre 100 e 150 t/ha. Entretanto, a MO apresenta maior

oscilação entre coletas, com doses variando de $-483,1$ a 151 t/ha, enquanto o CO tem variação semelhante, porém com menor instabilidade nas coletas discrepantes. Essa diferença reforça a sensibilidade da MO às condições ambientais que afetam diretamente a decomposição de resíduos frescos, enquanto o CO mostra-se menos suscetível a flutuações bruscas, acompanhando a dinâmica de estabilização a médio prazo.

A MO apresenta valores ótimos variando entre 5 e 7 dag/kg, e o CO situa-se entre 3 e 4 dag/kg nessas mesmas coletas, mostrando que cerca de metade da MO adicionada foi convertida ou estabilizada como carbono orgânico. A proporção observada é compatível com estágios iniciais de incorporação de resíduos orgânicos, evidenciando que o biossólido contribui tanto para a fração facilmente degradável quanto para a fração estável da matéria orgânica do solo.

Embora a modelagem matemática tenha indicado uma dose que maximiza o valor da variável teórica de $138,1$ t ha⁻¹ para maximização do carbono orgânico, a análise conjunta da matéria orgânica e do carbono orgânico evidencia que doses elevadas apresentam alta variabilidade, forte assimetria e menor estabilidade estatística. Assim, considerando critérios agrônômicos, estatísticos e operacionais, recomenda-se a aplicação de 80 t ha⁻¹, dose que promove incrementos consistentes em ambos os atributos, com menor coeficiente de variação e maior confiabilidade dos resultados.

A comparação entre matéria orgânica e carbono orgânico demonstra que, embora intimamente relacionados, cada indicador responde a dimensões distintas da dinâmica biogeoquímica do solo. Enquanto a MO capta a inserção e a rápida transformação de resíduos orgânicos, o CO registra a consolidação e o armazenamento gradual do carbono em frações mais persistentes. Essa complementaridade reforça a importância de utilizar ambos os indicadores para monitorar adequadamente a evolução da qualidade do solo e a eficiência do uso de biossólidos como estratégia de incremento da fertilidade.

3.12. Correlação pH e nutrientes

A análise das correlações entre pH, nutrientes essenciais (Ca, Mg, K e P) e componentes ligados à acidez do solo (Al^{3+} e $\text{H}+\text{Al}$) revela um comportamento dinâmico e não linear do sistema solo-biossólido. A resposta química evolui ao longo do tempo, expressando três fases claras: uma fase inicial de elevação da fertilidade, seguida por um período de instabilidade, decorrente da mineralização da matéria orgânica, e, finalmente, um estágio de estabilização em que o solo atinge novo equilíbrio. Cada uma dessas fases apresenta padrões

distintos de correlação, os quais permitem compreender com profundidade o funcionamento do biossólido como condicionador químico de solo.

O alumínio exerce papel central na manutenção da acidez do solo: sua hidrólise libera íons H^+ , reforçando o caráter ácido do meio. Solos com maior concentração de alumínio, geralmente, apresentam pH mais baixo, o que cria um ciclo de retroalimentação, reduzindo a disponibilidade de nutrientes essenciais, elevando a toxidez e comprometendo o desenvolvimento radicular das plantas (Cavallaro; Padilla; Villarubia, 1993).

Nas primeiras coletas (1 e 2), observa-se um cenário de forte correlação positiva entre pH e os principais nutrientes, com coeficientes variando entre 0,67 e 0,91. Esse comportamento indica que o biossólido promove, de forma imediata, aumento simultâneo do pH e da disponibilidade de cálcio, magnésio, potássio e fósforo, caracterizando um efeito semelhante ao de uma calagem. Ao mesmo tempo, a correlação fortemente negativa entre pH e alumínio (-0.74 a -0.80) evidencia redução rápida do Al^{3+} tóxico, reforçando que o solo passa por uma etapa de condicionamento químico eficiente. Esse é o momento de maior benefício agrônômico, marcado por elevada fertilidade e baixo risco de toxidez.

A acidez total é fortemente influenciada pela presença de alumínio trocável (Al^{3+}). Em solos com elevados teores de Al^{3+} , observam-se baixa saturação por bases e alta ocupação do complexo de troca por alumínio, condição típica de solos distróficos, com consequente diminuição da fertilidade e aumento da toxidez para raízes (Hu; Shan, 2025; Pereira *et al.*, 2015).

Esse padrão se altera de forma significativa durante as coletas intermediárias (3 a 7), período correspondente à fase de mineralização da matéria orgânica. Nesse ponto, o pH passa a se correlacionar de maneira negativa com os nutrientes (-0.15 a -0.86), indicando que, embora o sistema continue enriquecido nutricionalmente, ocorre liberação de ácidos orgânicos, que promovem queda de pH. Esse processo altera o balanço químico do solo, possibilitando, em alguns casos, a solubilização de alumínio. Isso explica a emergência de correlações positivas entre Al^{3+} e nutrientes (0.59 a 1.00), fenômeno típico de solos submetidos a decomposição intensa de matéria orgânica. Essa fase, portanto, representa um período de maior instabilidade química, no qual o benefício nutricional permanece, mas coexistem riscos fisiológicos para as plantas devido ao aumento da acidez e da presença do alumínio trocável.

Outro ponto fundamental refere-se à sensibilidade do sistema solo-pH-Al: mesmo pequenas variações de pH podem provocar reduções significativas na solubilidade e mobilidade do Al^{3+} , diminuindo sua disponibilidade e reduzindo a carga ácida do solo (Hu; Shan, 2025). Isso significa que, sem a correção da acidez por meio de calagem ou aplicação de materiais

corretivos, como bioossólidos alcalinizados, o solo tende a manter o equilíbrio químico instável, desfavorável ao desenvolvimento vegetal.

Nas coletas finais (8 a 13), os dados revelam que o sistema atinge um novo ponto de equilíbrio. As correlações entre pH e nutrientes tornam-se fracas ou moderadas (-0.08 a -0.34), demonstrando que a liberação de ácidos diminuiu e que a dinâmica da fertilidade começou a se estabilizar. Ao mesmo tempo, as correlações entre os próprios nutrientes permanecem altas, frequentemente acima de 0,90, o que indica resposta coordenada aos efeitos residuais do bioossólido. O solo, nesse estágio, alcança um balanço químico mais harmonioso, caracterizado por níveis adequados de bases trocáveis e menor interferência do alumínio.

A conjugação desses fatores, pH, alumínio trocável e acidez total, revela o papel essencial do alumínio na dinâmica química de solos ácidos. A baixa saturação por bases, a ocupação do complexo de troca por Al^{3+} e a elevada acidez potencial tornam o solo quimicamente hostil, restringindo a disponibilidade de nutrientes e limitando o crescimento radicular. Por isso, estratégias de manejo que priorizem a neutralização do alumínio e a elevação da saturação por bases são indispensáveis para restaurar o equilíbrio químico do solo e promover produtividade agrícola sustentável.

A análise das correlações por dose revela que os tratamentos intermediários (20–40 t/ha) apresentam o melhor desempenho geral, pois concentram os benefícios da primeira fase e minimizam os riscos da fase intermediária. Nas doses mais altas (80–160 t/ha), nota-se maior propensão à acidificação e à solubilização de alumínio, especialmente entre as coletas 3 e 7, quando ocorrem as correlações negativas mais acentuadas entre pH e cálcio (-0.31 a -0.59) e as positivas entre alumínio e cálcio (0.52–0.59). Já as doses moderadas mostram excelente resposta química na fase inicial, com correlação pH–P chegando a 0,88 e pH–Ca atingindo 0,90, níveis que indicam condicionamento ideal do solo.

O comportamento temporal das correlações permite ainda definir janelas de manejo. As coletas 1 e 2 representam o período de máxima eficiência agronômica, ideal para o estabelecimento da cultura, pois concentram maior disponibilidade nutricional e menor risco de toxidez. As coletas 3 a 7 demandam monitoramento rigoroso de pH e alumínio, dado o potencial de acidificação. A partir da coleta 8, o sistema se estabiliza, indicando que os efeitos residuais do bioossólido permanecem, mas de forma mais equilibrada e previsível.

Em síntese, as correlações demonstram que o bioossólido atua simultaneamente como condicionador físico-químico, fertilizante e agente mitigador da toxidez por alumínio. Seus efeitos mais benéficos se concentram no período inicial, enquanto as doses intermediárias (20–40 t/ha) configuram a melhor relação entre benefício nutricional e segurança química. A

compreensão dessa dinâmica temporal é essencial para orientar decisões de manejo, otimizar a aplicação do biossólido e garantir sustentabilidade agronômica no uso contínuo do resíduo.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados do experimento demonstram que a aplicação de biossólidos promoveu efeitos estatísticos significativos sobre a fertilidade química e a qualidade do solo, especialmente em solos ácidos de baixa fertilidade. Observou-se que tanto a matéria orgânica (MO) quanto o carbono orgânico (CO) responderam de forma quadrática às doses aplicadas, com efeito máximo entre 100 e 150 t ha⁻¹. A MO revelou maior variabilidade, refletindo a presença de frações lábeis, enquanto o CO apresentou acúmulo mais gradual, evidenciando a contribuição do biossólido para o aumento de estoques de carbono estável e de longo prazo.

A capacidade de troca catiônica (CTC) mostrou-se sensível à adição de biossólidos, com aumento significativo na retenção de cátions essenciais, como Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺. A análise temporal indicou fases distintas de resposta: uma correção inicial, seguida de instabilidade durante o período de mineralização e posterior estabilização. Esse comportamento evidencia a necessidade de monitoramento contínuo, sobretudo nos períodos de maior atividade microbiana, quando há liberação de ácidos orgânicos e risco potencial de solubilização de alumínio.

O experimento confirmou que o biossólido atua como condicionador do solo, promovendo não apenas a melhoria da fertilidade química, mas também impactos positivos na estabilidade estrutural e na capacidade de retenção de nutrientes. A faixa de aplicação de 80-120 t ha⁻¹ mostrou-se consistente para otimizar os benefícios sem comprometer a segurança ambiental e a sustentabilidade do manejo.

Por fim, os dados reforçam que o uso de biossólidos deve ser encarado como uma estratégia de construção gradual da saúde do solo, integrando princípios agronômicos consolidados com monitoramento específico das condições locais. A adoção desse manejo contribui para a manutenção de estoques de carbono orgânico, aumento da CTC e melhoria da fertilidade integrada, oferecendo um caminho sustentável para solos tropicais e subtropicais de baixa fertilidade.

5. REFERÊNCIAS

ABREU, A. H. M.; ALONSO, J. M.; MELO, L. A. **Caracterização de biossólido e potencial de uso na produção de mudas de *Schinus terebinthifolia* Raddi**. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 24, n. 3, maio-jun. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019108265>. Acesso em: 23 nov. 2025.

AGGELIDES, S. M.; LONDRA, P. A. **Effects of compost produced from town wastes and sewage sludge on the physical properties of soils**. Bioresource Technology, v. 71, n. 2, p. 253–259, 2000.

ALCÂNTARA, M. A. K. de; NETO, V. de A.; CAMARGO, O. A. de; CANTARELLA, H. **Mineralização do nitrogênio em solos tratados com lodos de curtume**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 42, n. 4, p. 533-540, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000400013>. Acesso em: 23 nov. 2025.

BARBOSA, J. Z.; POGGERE, G. C.; DALPISOL, M.; SERRAT, B. M.; BITTENCOURT, S.; MOTTA, A. C. V. **Alkalinized sewage sludge application improves fertility of acid soils**. Ciência e Agrotecnologia, v. 41, n. 5, p. 483–493, 2017. doi:10.1590/1413-70542017415006717.

KABIRINEJAD, S., HOODAJI, M. **The effects of biosolid application on soil chemical properties and *Zea mays* nutrition**. Int J Recycl Org Waste Agricult 1, 4 (2012). Disponível em: <https://doi.org/10.1186/2251-7715-1-4>. Acesso em: 13 out. 2025

BARCELAR, C. A. et al. **Residual effect of sewage sludge on some chemical and granulometric Inceptisol attributes**. Revistas da UFPR, 2001. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/agraria/article/view/982/0/>. Acesso em: 23 nov. 2025.

BARCELAR, C. de A.; ROCHA, A. A.; LIMA, M. R.; POHLMANN, M. **Residual effect of sewage sludge on some chemical and granulometric Inceptisol attributes**. Scientia Agraria, v. 2, n. 1, p. 87–91, 2001.

BETTIOL, W; CAMARGO, O A (orgs.). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006.

BETTIOL, W; GALVÃOJ A H. **Uso agrícola de biossólidos e seus efeitos na fertilidade de solos tropicais**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 10, n. 2, p. 321–327, 2006.

BITTENCOURT, S; AISSE, M M; MONTE SERRAT, B. **Gestão do uso agrícola do lodo de esgoto: estudo de caso do estado do Paraná, Brasil**. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 22, n. 6, p. 1089-1100, nov./dez. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522017156260>. Acesso em: 23 nov. 2025.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020**. Dispõe sobre critérios e procedimentos para o uso agrícola de biossólidos. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 20 ago. 2020.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006**. Define critérios e procedimentos para o uso benéfico de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados em solos agrícolas. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/index.php?id=14235;option=com_sis. Acesso em: 23 nov. 2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Anuário Estatístico do Setor Agrícola 2018**. Brasília, DF: MAPA, 2020.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Política Nacional de Resíduos Sólidos: **Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Brasília, DF: MMA, 2010.

CABREIRA, T. F.; GONÇALVES, M. P.; SILVA, J. A. **Crescimento urbano e geração de resíduos sólidos: desafios e oportunidades**. Revista Ambiente ; Sociedade, v. 20, n. 3, p. 25–42, 2017.

CARMO, C A; EDUARDO, J L P. **Nutrientes em bio sólidos e sua aplicação em solos agrícolas**. Belo Horizonte: EPAMIG, 2008.

CARNEIRO, W J O; SILVA, C A; MUNIZ, J A; SAVIAN, T V. **Mineralização de nitrogênio em latossolos adubados com resíduos orgânicos**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 37, n. 3, p. 715–725, jun. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000300018>. Acesso em: 23 nov. 2025.

CIOTTA, M N *et al.* **Matéria orgânica e aumento da capacidade de troca de cátions em solo com argila de atividade baixa sob plantio direto**. Ciência Rural, v. 33, n. 6, p. 975-981, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782003000600026>. Acesso em: 10 ago. 2025.

CORRÊA, J. C.; BÜLL, L. T.; CRUSCIOL, C. A. C.; MARCELINO, R. **Correção da acidez e mobilidade de íons em Latossolo com aplicação superficial de escória, lama cal, lodos de esgoto e calcário**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 42, n. 9, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000900013>. Acesso em: 23 nov. 2025.

COSTA, E. R. O., S. MAEDA, e H. D. da SILVA. **Alterações Químicas Do Solo Após Aplicação De Resíduos De Efluentes De Fábrica De Papel Reciclado**. 2011.

DÜRING, R. A.; KAPPELER, B.; FERNANDEZ, J. M. **Organic fertilization and its influence on soil properties and crop yields**. European Journal of Agronomy, v. 19, n. 2, p. 113–125, 2003.

EMMANOUIL, K.; PETROU, P.; KOUTSOU, A. **Environmental assessment of biosolid use in agriculture: opportunities and risks**. Journal of Environmental Management, v. 321, p. 116–132, 2024.

HAYNES, R. J. **Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: a review**. Soil Use and Management, v. 21, n. 1, p. 1–11, 2005.

KABATA-PENDIAS, A. **Trace elements in soils and plants**. CRC Press. 2011.

KOPITTKKE, P. M.; BLAMEY, F. P. **Kinetics and nature of aluminium rhizotoxic effects: a review.** Journal of Experimental Botany, v. 67, n. 15, pp. 4451–4469, 2016.

LEITÃO, N. C. **Economia circular: conceitos, práticas e desafios para a sustentabilidade.** São Paulo: Atlas, 2015.

MALAVOLTA, Euripedes. **Manual de calagem e adubação das principais culturas.** Piracicaba: ESALQ/USP, 1987.

MARCÍANO, R.; CUNHA, M.; ALMEIDA, V. **Efeitos de bio sólidos em Latossolos: propriedades físicas e químicas.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 25, n. 4, p. 835– 844, 2001.

MELLO CUNHA, G. O.; ALMEIDA, J. A.; TESTONI, S. A.; BARBOZA, B. B. **Forms of Aluminum in Brazilian Acid Soils with Exceptionally High Levels of KCl-extractable Al^{3+} .** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 39, n. 5, p. 1362–1377, 2015.

MELO, G. W. B.; MARQUES, J. R. **Fertilidade do solo e adubação orgânica em solos tropicais.** Viçosa: UFV, 2000.

MELO, G. W. B.; SANTOS, L. A.; OLIVEIRA, A. **Bio sólidos e fertilidade do solo: considerações técnicas.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 28, n. 6, p. 1031–1042, 2004.

MELO, G. W. B., *et al.* **Aplicação de bio sólidos tratados em solos tropicais: impacto na fertilidade.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 18, n. 3, p. 371–380, 1994.

MENZIES, N. W.; *et al.* **Chemical species and aluminum concentration in the solution of acid soils cultivated with soybean and corn under liming.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, 2016.

PEREIRA, R. L.; SILVA, T. A.; SOUZA, F. **Bio sólidos na agricultura: eficiência, segurança e sustentabilidade.** Revista Agroambiental, v. 17, n. 1, p. 45–60, 2023.

RAMOS FT, DORES EFC, WEBER OLDS, BEBER DC, CAMPELO JH JR, MAIA JCS. **Soil organic matter doubles the cation exchange capacity of tropical soil under no- till farming in Brazil.** J Sci Food Agric. 2018 Jul;98(9):3595-3602. doi: 10.1002/jsfa.8881. Epub 2018 Feb 23. PMID: 29315629.

REIS, T. C.; RODELLA, A. A. **Cinética de degradação da matéria orgânica e variação do pH do solo sob diferentes temperaturas.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, 2002. Disponível em: <https://www.rbcjournal.org/pt-br/article/cinetica-de-degradacao-da-materia-organica-e-variacao-do-ph-do-solo-sob-diferentes-temperaturas/>. Acesso em: 02 nov. 2025.

RIBEIRO, M. E., SANTOS, A. E. C. S., SILVA, L. DE A. C., ALMEIDA, G. H. S., MARQUES, G. M., ; COUTO, E. DE A. DO. **Aplicação de bio sólido de ETE na produção de girassol como recuperação sustentável de recursos.** Revista Em Agronegócio E Meio Ambiente, 17, e12922. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2024v17n.Especial.e12922>. Acesso em: 10 ago. 2025.

RICCI, A. B.; PADOVANI, V. C. R.; PAULA JÚNIOR, D. R. ***Use of stabilized sewage sludge on a humusless soil. II*** – chemical properties and revegetation. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2010. Disponível em: <https://www.rbcjournal.org/article/use-of-stabilized-sewage-sludge-on-a-humusless-soil-ii-chemical-properties-and-revegetation/>. Acesso em: 02 nov. 2025.

RIGO, E.; FERNANDES, S.; SILVA, M. **Destinação de bioossólidos: desafios para aterros sanitários e alternativas de reaproveitamento**. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 19, n. 2, p. 123–130, 2014.

SANTOS, L. A.; MELO, G. W. B.; CAMARGO, F. A. O. **Aplicação de bioossólidos e efeitos sobre a fertilidade do solo**. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 27, n. 5, p. 853–862, 2003.

SHI, B; WANG, S; JIAO, J; LI, G; YIN, C. Recognition on characteristics and applicability of typical modes for manure ; sewage management in pig farming: a case study in Hebei, China. *Waste Management*, v. 148, p. 83-97, jul. 2022. DOI: 10.1016/j.wasman.2022.05.018

SILVA FILHO, José Cleto da; LIMA, Pedro Martins. **Dinâmica de nutrientes e sustentabilidade em solos tratados com bioossólidos**. Lavras: UFLA, 2020.

TRANNIN, I C B; SIQUEIRA, J O; MOREIRA, F M S. **Características químicas e microbiológicas de solos tratados com bioossólidos**. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, n. 5, p. 2253–2262, 2008.

VIOLANTE, A.; *et al.* ***Forms of aluminium in soils***; comportamento em função do pH e implicações para toxicidade. *Biology and Fertility of Soils*, 2018.

WORLD WIDE FUND FOR NATURE (WWF). ***Living Planet Report 2022: building a nature-positive society***. Gland, Switzerland: WWF, 2022.

APÊNDICE I

Figura 14. Equações de regressão

Fator	Equação de regressão	R ²
pH	$y = 4,323 + 0,003x$	0,443
Cálcio	$y = 0,32 + 0,019x$	0,936
Alumínio	$y = 0,964 - 0,012x$	0,823
Acidez Total	$y = 4,988 - 0,010x$	0,940
Potássio	$y = 0,913 - 0,014x$	0,742
Fósforo	$y = 2,325 + 0,242x + 0,001x^2$	0,992
Matéria Orgânica	$y = 13,496 + 0,418x - 0,001x^2$	0,978
Carbono Orgânico	$y = 1,367 + 0,038x$	0,793

Fonte: A autora (2026).

Tabela 6. Estatística descritiva pH

Tratamento	Dose	Média	Mediana	Desvio Padrão	Variância	Mínimo	Máximo	CV	Erro Padrão
T1 (controle)	0	4,432	4,410	0,258	0,066	3,840	4,890	5,811	0,036
T2	10	4,390	4,415	0,375	0,141	3,640	5,130	8,538	0,052
T3	20	4,530	4,560	0,343	0,117	3,850	5,660	7,563	0,048
T4	40	4,764	4,590	0,430	0,185	4,290	6,200	9,026	0,060
T5	80	4,716	4,535	0,492	0,242	4,170	6,040	10,434	0,068
T6	100	4,622	4,370	0,582	0,339	3,950	5,850	12,603	0,081
T7	160	4,441	4,215	0,568	0,322	3,840	5,780	12,785	0,079

Fonte: A autora (2026).

Tabela 7. Teste de normalidade pH

Teste	Estatística	p_valor	Conclusão
Shapiro-Wilk (normalidade)	0,923282123	1,06044E-12	Não normal
Levene (homogeneidade)	3,10033944	0,005671974	Não homogêneo

Fonte: A autora (2026).

Tabela 8. Estatística descritiva cálcio

Tratamento	Dose	Média	Mediana	Desvio Padrão	Variância	Mínimo	Máximo	CV	Erro Padrão
T1 (controle)	0	0,310	0,280	0,209	0,044	0,000	0,740	67,391	0,029
T2	10	0,673	0,400	1,505	2,266	0,040	11,120	223,598	0,209
T3	20	0,608	0,550	0,303	0,092	0,190	1,510	49,955	0,042
T4	40	1,027	0,825	0,537	0,289	0,510	3,270	52,350	0,075
T5	80	1,506	1,300	0,652	0,426	0,540	3,740	43,304	0,090
T6	100	2,078	1,670	1,124	1,263	0,750	5,170	54,085	0,156
T7	160	2,975	2,585	1,381	1,907	1,420	7,460	46,422	0,191

Fonte: A autora (2026).

Tabela 9. Teste de normalidade cálcio

Teste	Estatística	p_valor	Conclusão
Shapiro-Wilk (normalidade)	0,765072925	1,88E-22	Não normal
Levene (homogeneidade)	5,218624581	3,63E-05	Não homogêneo

Fonte: A autora (2026).

Tabela 10. Estatística descritiva Alumínio

Tratamento	Dose	Média	Mediana	Desvio Padrão	Variância	Mínimo	Máximo	CV	Erro Padrão
T1 (controle)	0	0,926	0,955	0,195	0,038	0,370	1,330	21,090	0,027
T2	10	0,926	0,800	0,483	0,233	0,340	2,390	52,130	0,067
T3	20	0,628	0,555	0,394	0,156	0,000	1,600	62,853	0,055
T4	40	0,278	0,270	0,220	0,048	0,000	0,710	79,142	0,030
T5	80	0,309	0,235	0,275	0,075	0,000	0,980	88,969	0,038
T6	100	0,552	0,590	0,522	0,272	0,000	2,130	94,573	0,072
T7	160	0,762	0,785	0,568	0,323	0,090	2,050	74,632	0,079

Fonte: A autora (2026).

Tabela 11. Teste de normalidade Alumínio

Teste	Estatística	p_valor	Conclusão
Shapiro-Wilk (normalidade)	0,947676	4,69E-10	Não normal
Levene (homogeneidade)	19,29121	1,71E-19	Não homogêneo

Fonte: A autora (2026).

Tabela 12. Estatística descritiva Acidez total

Tratamento	Dose	Média	Mediana	Desvio Padrão	Variância	Mínimo	Máximo	CV	Erro Padrão
T1 (controle)	0	4,783	4,910	0,829	0,687	2,590	6,140	17,331	0,115
T2	10	5,333	5,220	2,433	5,918	0,930	19,320	45,618	0,337
T3	20	4,750	5,035	1,339	1,792	0,930	6,750	28,184	0,186
T4	40	4,685	5,095	1,456	2,121	1,520	7,020	31,084	0,202
T5	80	5,112	5,665	1,741	3,032	0,910	8,130	34,063	0,241
T6	100	5,803	6,510	2,177	4,738	1,970	9,060	37,509	0,302
T7	160	7,507	7,995	2,601	6,765	2,860	12,280	34,646	0,361

Fonte: A autora (2026)

Tabela 13. Teste de normalidade Acidez total

Teste	Estatística	p_valor	Conclusão
Shapiro-Wilk (normalidade)	0,937141635	2,79576E-11	Não normal
Levene (homogeneidade)	6,135352132	3,88976E-06	Não homogêneo

Fonte: A autora (2026)

Tabela 14. Teste de normalidade e correlação Acidez total x Alumínio

Teste	Estatística	Valor de p	Interpretação
Correlação de Pearson (geral)	$r = 0,505$; $t(362)$	$< 2 \times 10^{-16}$	Correlação positiva significativa
Shapiro-Wilk (Alumínio)	$W = 0,9477$	$4,69 \times 10^{-10}$	Distribuição não normal
Shapiro-Wilk (Acidez Total)	$W = 0,9371$	$2,80 \times 10^{-11}$	Distribuição não normal
Levene (Homocedasticidade)	$F(3,360) = 4,864$	0,0025	Variâncias heterogêneas

Fonte: A autora (2026).

Tabela 15. Estatística descritiva Potássio

Tratamento	Dose	Média	Mediana	Desvio Padrão	Variância	Mínimo	Máximo	CV	Erro Padrão
T1 Controle	0	0,926	0,955	0,195	0,038	0,370	1,330	21,090	0,027
T2	10	0,926	0,800	0,483	0,233	0,340	2,390	52,130	0,067
T3	20	0,628	0,555	0,394	0,156	0,000	1,600	62,853	0,055
T4	40	0,278	0,270	0,220	0,048	0,000	0,710	79,142	0,030
T5	80	0,309	0,235	0,275	0,075	0,000	0,980	88,969	0,038
T6	100	0,552	0,590	0,522	0,272	0,000	2,130	94,573	0,072
T7	160	0,762	0,785	0,568	0,323	0,090	2,050	74,632	0,079

Fonte: A autora (2026).

Tabela 16. Teste de normalidade Potássio

Teste	Estatística	p_valor	Conclusão
Shapiro-Wilk (normalidade)	0,947676	4,69E-10	Não normal
Levene (homogeneidade)	19,29121	1,71E-19	Não homogêneo

Fonte: A autora (2026).

Tabela 17. Estatística descritiva Fósforo

Tratamento	Dose	Média	Mediana	Desvio Padrão	Variância	Mínimo	Máximo	CV	Erro Padrão
T1 (controle)	0	1,397	1,415	0,237	0,056	0,920	1,890	16,996	0,033
T2	10	6,851	3,100	25,384	644,366	2,210	186,310	370,502	3,520
T3	20	4,759	4,520	0,909	0,826	3,600	7,460	19,099	0,126
T4	40	16,423	17,140	5,271	27,784	8,800	28,600	32,096	0,731
T5	80	26,255	25,645	3,290	10,821	20,120	33,390	12,530	0,456
T6	100	35,789	35,435	5,791	33,532	27,510	59,710	16,180	0,803
T7	160	65,114	65,230	7,797	60,795	50,580	79,800	11,974	1,081

Fonte: A autora (2026).

Tabela 18. Teste de normalidade Fósforo

Teste	Estatística	p_valor	Conclusão
Shapiro-Wilk (Geral)	0,814317	3,75E-20	Não normal
Levene	2,533814	0,020483	Não homogêneo

Fonte: A autora (2026).

Tabela 19. Estatística descritiva MO

Tratamento	Dose	Média	Mediana	Desvio Padrão	Variância	Mínimo	Máximo	CV	Erro Padrão
T 1 (Controle)	0	12,454	12,400	1,112	1,237	10,500	14,400	8,932	0,154
T2	10	17,283	17,350	2,690	7,236	12,300	21,800	15,564	0,373
T3	20	21,487	21,550	3,429	11,759	15,600	27,100	15,960	0,476
T4	40	32,313	32,350	4,200	17,637	24,900	39,500	12,997	0,582
T5	80	36,606	36,650	4,912	24,132	28,300	44,700	13,420	0,681
T6	100	46,485	46,550	6,845	46,853	34,800	57,900	14,725	0,949
T7	160	54,810	54,850	7,600	57,765	41,800	67,500	13,867	1,054

Fonte: A autora (2026).

Tabela 20. Teste de normalidade MO

Teste	Estatística	p_valor	Conclusão
Shapiro-Wilk (Geral)	0,943606	1,52E-10	Não normal
Levene	32,98661	1,35E-31	Não homogêneo

Fonte: A autora (2026).

Tabela 21. Estatística descritiva CO

Tratamento	Dose	Média	Mediana	Desvio Padrão	Variância	Mínimo	Máximo	CV	Erro Padrão
T 1 (Controle)	0	1,303	1,310	0,115	0,013	1,020	1,510	8,810	0,016
T2	10	2,021	1,575	2,694	7,259	1,200	20,830	133,331	0,374
T3	20	1,622	1,635	0,231	0,054	0,900	2,160	14,263	0,032
T4	40	2,764	2,335	0,970	0,942	1,400	5,130	35,105	0,135
T5	80	4,330	4,300	1,094	1,197	2,440	7,220	25,264	0,152
T6	100	2,949	2,900	0,701	0,492	1,840	4,820	23,777	0,097
T7	160	4,023	3,990	0,903	0,815	2,260	5,820	22,435	0,125

Fonte: A autora (2026).

Tabela 22. Teste de normalidade CO

Teste	Estatística	p_valor	Conclusão
Shapiro-Wilk (Geral)	0,730024	7,1E-24	Não normal
Levene	3,932756	0,000804	Não homogêneo

Fonte: A autora (2026).

CAPÍTULO 3. EFEITO DA APLICAÇÃO DE BIOSSÓLIDOS DE ESGOTO SANITÁRIO CLASSE II NO DESENVOLVIMENTO INICIAL DA CULTURA DO MILHO (*Zea mays* L.)

RESUMO

O manejo do solo é um fator fundamental para a produtividade e sustentabilidade agrícola, especialmente em regiões tropicais e subtropicais, onde a fertilidade do solo frequentemente é limitada. Nesse contexto, o uso de bioossólidos surge como uma estratégia eficaz para melhorar as propriedades do solo e favorecer o desenvolvimento das culturas. O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos da aplicação de bioossólidos provenientes de ETE de esgoto doméstico sobre o crescimento inicial do milho, o desenvolvimento radicular e a biomassa. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, com a aplicação de bioossólidos em sete tratamentos, sem correção de NPK e pH, e sete tratamentos (0 a 160 t ha⁻¹) com ou sem correção de NPK e pH. Cada tratamento recebeu diferentes doses de bioossólidos, permitindo avaliar os efeitos combinados da adição do resíduo orgânico e da correção nutricional sobre o crescimento inicial do milho. Foram avaliados parâmetros como crescimento da parte aérea e radicular, biomassa acumulada, teor de carbono orgânico no solo e propriedades estruturais do solo. Também foi realizada análise de correlação para investigar a relação entre crescimento radicular e parte aérea. Os resultados indicaram que doses intermediárias de bioossólidos (20-40 t ha⁻¹), combinadas com correção do solo, apresentaram os melhores resultados, pois foram as doses que maximizaram o valor das variáveis, enquanto doses elevadas (acima de 120 t ha⁻¹) sem correção provocaram fitotoxicidade e redução da produtividade. A análise de correlação destacou tratamentos (20 e 40 t ha⁻¹, com correção de solo) que otimizam a relação raiz/parte aérea, fornecendo subsídios práticos para recomendações de aplicação segura e eficiente de bioossólidos no cultivo do milho.

Palavras-chave: Bioossólidos. Crescimento do milho. Desenvolvimento radicular. Biomassa acumulada. Fertilidade do solo. Agricultura sustentável.

ABSTRACT

Soil management is a fundamental factor for agricultural productivity and sustainability, especially in tropical and subtropical regions where soil fertility is often limited. In this context, the use of biosolids emerges as an effective strategy to improve soil properties and promote crop development. The objective of this work was to evaluate the effects of applying biosolids from domestic wastewater treatment plants on the initial growth of maize, root development, and biomass. The experiment was conducted in a greenhouse, with the application of biosolids in seven treatments without NPK and pH correction and seven treatments (0 to 180 t ha⁻¹) with or without NPK and pH correction. Each treatment received different doses of biosolids, allowing the evaluation of the combined effects of the addition of organic residue and nutritional correction on the initial growth of maize. Parameters such as shoot and root growth, accumulated biomass, soil organic carbon content, and soil structural properties were evaluated. Correlation analysis was also performed to investigate the relationship between root and shoot growth. The results indicated that intermediate doses of biosolids (20-40 t ha⁻¹), combined with soil correction, showed the best results, while high doses (above 120 t ha⁻¹) without correction caused phytotoxicity and reduced productivity. The correlation analysis highlighted treatments (20 and 40 t ha⁻¹, with soil correction) that optimize the root/shoot ratio, providing practical support for recommendations on the safe and efficient application of biosolids in maize cultivation.

Keywords: Biosolids. Maize growth. Root development. Biomass accumulation. Soil fertility. Sustainable agriculture.

1. INTRODUÇÃO

O manejo sustentável de resíduos sólidos urbanos constitui um desafio crescente diante da expansão das áreas urbanas e da produção crescente de lodos provenientes de estações de tratamento de esgoto. Quando tratados adequadamente, esses resíduos tornam-se biossólidos, materiais ricos em nutrientes essenciais como nitrogênio, fósforo e matéria orgânica, com potencial para uso agrícola. A compostagem é um dos processos mais eficazes para estabilizar o lodo e transformá-lo em uma fonte de nutrientes segura e adequada para aplicação em solos agrícolas, melhorando propriedades químicas, físicas e biológicas do solo (Gonçalves, 1998; Silva *et al.*, 2020). Nesse contexto, o uso de biossólidos oferece uma alternativa sustentável à aplicação de fertilizantes químicos, contribuindo para a economia circular e para a redução da dependência de insumos não renováveis (Araújo *et al.*, 2022).

Os efeitos agronômicos da aplicação de biossólidos têm sido amplamente documentados, evidenciando impacto direto no crescimento e produtividade de diversas culturas, incluindo milho, sorgo, trigo e hortaliças. Estudos indicam que a aplicação de biossólidos pode aumentar significativamente os teores de nutrientes no solo, melhorar a fertilidade e favorecer o desenvolvimento vegetativo, refletindo-se em produtividade comparável ou superior à obtida com fertilizantes minerais convencionais (Silva *et al.*, 2017; Pereira *et al.*, 2023). No entanto, a resposta do solo e das plantas é fortemente dependente da dose aplicada, do tipo de solo e das condições climáticas locais.

A relação dose-resposta constitui um aspecto central no manejo de biossólidos. Doses moderadas promovem incremento de nutrientes, melhora na estrutura física do solo e maior eficiência na utilização da água, enquanto doses excessivas podem resultar em saturação de nutrientes, aumento do risco de lixiviação de metais pesados e outros contaminantes, além de efeitos fitotóxicos que comprometem o crescimento das culturas (Boudjabi; Chenchouni, 2021). Assim, o estabelecimento de doses recomendadas e protocolos de aplicação seguros é essencial para maximizar os benefícios agronômicos sem comprometer a qualidade ambiental, evidenciando a necessidade de Procedimentos Operacionais Padrão (POP) e estratégias regulatórias claras, como as previstas pela Resolução CONAMA n.º 498/2020.

Além dos efeitos sobre fertilidade e produtividade, os biossólidos influenciam a dinâmica do carbono no solo, interagindo com minerais e melhorando a estabilidade do carbono a longo prazo, o que contribui para estratégias de mitigação das mudanças climáticas (Liu *et al.*, 2022). A aplicação contínua desses resíduos, quando devidamente manejada, pode aumentar os estoques de carbono orgânico, melhorar a capacidade de retenção hídrica e favorecer a

recuperação de áreas degradadas, tornando os bioossólidos uma ferramenta estratégica para a sustentabilidade ambiental e agrícola (Freitas *et al.*, 2023).

O valor agrônômico dos bioossólidos, embora frequentemente associado ao teor de nutrientes minerais, vai além disso, englobando melhorias nas propriedades físicas e químicas do solo, como agregação, porosidade e capacidade de retenção de água, favorecendo o desenvolvimento inicial das culturas e a estabilidade do sistema produtivo. Estudos experimentais têm demonstrado que a aplicação de bioossólidos em diferentes doses pode resultar em aumentos significativos no crescimento de plântulas e na produtividade final, sendo esses efeitos comparáveis ou superiores aos obtidos com fertilizantes químicos tradicionais (Araújo *et al.*, 2022; Pereira *et al.*, 2023).

Do ponto de vista econômico, o uso de bioossólidos também apresenta vantagens relevantes. Além de reduzir a dependência de fertilizantes minerais, a reutilização de resíduos urbanos diminui custos associados à disposição final em aterros sanitários, potencializando benefícios ambientais e sociais (Silva *et al.*, 2020). No entanto, a implementação em larga escala requer avaliação contínua dos riscos de bioacumulação de contaminantes e adequação às normas técnicas, garantindo segurança e viabilidade econômica.

Por fim, a continuidade de estudos de campo e experimentos controlados é fundamental para aprimorar o conhecimento sobre a aplicação de bioossólidos em diferentes tipos de solo e culturas. A avaliação dos efeitos a longo prazo, a dinâmica do carbono, a resposta dose-dependente das plantas e a comparação com adubação mineral fornecem subsídios essenciais para a formulação de práticas agrícolas sustentáveis, alinhadas à proteção ambiental e à eficiência produtiva. Estudos como os de Freitas *et al.* (2023), Liu *et al.* (2022) e Boudjabi e Chenchouni (2021) ilustram o potencial dos bioossólidos, apontando caminhos futuros para expandir sua aplicação prática de forma segura e eficiente.

Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo analisar o desenvolvimento inicial da cultura do milho (*Zea mays L.*) submetida à aplicação de bioossólidos, por meio da avaliação de parâmetros de crescimento e nutrição vegetal, como altura de plantas, diâmetro do caule e matéria seca.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização do Objeto de Pesquisa

O biossólido utilizado no experimento é proveniente do município de Nova Serrana (MG), localizado na região Centro-Oeste de Minas Gerais. Possui área territorial de, aproximadamente, 283 km² e população estimada em 105.500 habitantes (IBGE, 2022). De acordo com o Atlas de Desenvolvimento Humano, o Município possui IDHM de 0,712, índice considerado médio, e que, segundo o *United Nations Development Programme* (PNUD) (2013, p. 42), “reflete o avanço de municípios em processo de consolidação econômica e urbana”. O crescimento demográfico e econômico está fortemente associado à expansão da indústria calçadista, setor responsável por impulsionar a geração de renda, emprego e fluxo migratório na região.

A amostra caracteriza-se como resíduo sólido do lodo digerido e desaguado. O processo de desaguamento ocorreu em leitos de secagem pavimentados, sem cobertura, até atingir teor mínimo de 60% de sólidos. Tal procedimento está em conformidade com a Resolução CONAMA n.º 498/2020, que estabelece essa etapa para a obtenção de biossólido classe B, com ênfase na redução de patógenos. Após análises laboratoriais, o material foi classificado como Resíduo Não Perigoso, Classe II A, não inerte, conforme a ABNT NBR 10004:2004. Essa norma estabelece critérios para a classificação de resíduos sólidos de acordo com seus potenciais riscos ao meio ambiente e à saúde pública, possibilitando seu gerenciamento de forma adequada.

Para fins de caracterização do material, o biossólido apresenta estado físico sólido, com 70,3% de umidade e 29,7% de sólidos totais, valores típicos de lodos digeridos e compatíveis com aplicação agrícola condicionada. O pH de 5,79 indica caráter levemente ácido, característica comum em biossólidos de origem sanitária, especialmente quando não submetidos à alcalinização, o que reforça a necessidade de correção do solo quando aplicados em ambientes agrícolas.

Do ponto de vista sanitário, o material atende aos requisitos para enquadramento como Classe II, uma vez que apresenta ausência de líquidos livres e de inflamabilidade, não corrosividade, não reatividade e ausência de ovos viáveis de helmintos ($< 0,01$ ovo g⁻¹ de sólidos totais), atendendo integralmente aos limites máximos permitidos pela legislação ambiental brasileira para uso agrícola controlado.

Quanto aos contaminantes inorgânicos, os teores de arsênio ($< 0,17 \text{ mg kg}^{-1}$) e mercúrio ($< 0,0038 \text{ mg kg}^{-1}$) encontram-se muito abaixo dos limites estabelecidos pelo CONAMA (Brasil 2006), indicando baixo risco toxicológico associado à presença de metais potencialmente tóxicos. Da mesma forma, os compostos cianetados (cianeto livre, total e de hidrogênio) apresentaram concentrações inferiores aos limites de detecção, reforçando a segurança química do material.

Sob o aspecto nutricional, o bio sólido apresenta elevada concentração de nitrogênio total (9.533 mg kg^{-1}), predominantemente na forma de nitrogênio orgânico ($9.063,9 \text{ mg kg}^{-1}$), o que favorece a liberação gradual desse nutriente no solo. O fósforo total ($1.131,1 \text{ mg kg}^{-1}$), o potássio total ($198,48 \text{ mg kg}^{-1}$), o cálcio total ($4.668,4 \text{ mg kg}^{-1}$) e o magnésio total ($383,2 \text{ mg kg}^{-1}$) evidenciam o potencial fertilizante e condicionador do solo, especialmente em Latossolos de baixa fertilidade natural. O elevado teor de enxofre total ($9.988,1 \text{ mg kg}^{-1}$) também contribui para a nutrição vegetal, desde que respeitadas as doses agronômicas recomendadas.

2.2. Características físico-químicas do solo utilizado

Para fins de padronização e controle experimental, foram feitas análises de capacidade de campo do solo (densidade, sólidos totais, sólidos voláteis e umidade) do bio sólido. A quantidade de bio sólido adicionada ao solo se refere à base seca do material, ressaltando-se que o solo utilizado foi um latossolo vermelho amarelo (Tabela 23).

Tabela 23. Análise da amostra de solo utilizada – Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico

pH	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	SB	t	T	V	m	M. Org.	C. Org.	N. NH ₄ ⁺
H ₂ O	mg/dm ³					cmolc/dm ³				%		dag/kg		g/kg
4,8	1,59	39,34	0,1	0	0,98	3,03	0,1	1,11	3,13	3,24	90,93	2,22	1,28	0,76

Fonte: A autora (2026).

As análises químicas do solo foram realizadas seguindo metodologias convencionais utilizadas em laboratórios de fertilidade, com o objetivo de determinar os macronutrientes disponíveis, a acidez potencial e os teores de matéria orgânica e carbono orgânico. Para a determinação de fósforo (P) e potássio (K), empregou-se o extrator Mehlich-1, solução ácida amplamente

utilizada para solos brasileiros, especialmente aqueles de baixa capacidade de troca catiônica. As amostras foram agitadas com o extrator, filtradas e, posteriormente, analisadas: o P foi determinado por espectrofotometria, e o K, por fotometria de chama.

Os teores de cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e alumínio (Al^{3+}) trocáveis foram obtidos utilizando-se solução de KCl 1 mol L^{-1} como extrator. Após a extração, Ca e Mg foram quantificados, geralmente, por titulação complexométrica ou espectrofotometria de absorção atômica, enquanto o Al foi determinado por titulação com solução padronizada de NaOH. A acidez potencial ($\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$) foi determinada por meio do extrator de acetato de cálcio $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ em pH 7,0, metodologia que permite estimar a fração de acidez não trocável presente nos colóides do solo.

Com base nos teores trocáveis determinados, calculou-se a Soma de Bases (SB), obtida pelo somatório de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Na^+ (quando analisado). A capacidade de troca catiônica efetiva (t) foi estimada pela soma da SB com o Al^{3+} trocável, enquanto a capacidade de troca catiônica a pH 7,0 (T) foi determinada a partir da soma entre SB e $\text{H}^+ + \text{Al}$. A saturação por bases (V%) foi calculada pela relação entre SB e T, expressa em porcentagem, representando o percentual de cargas negativas do solo ocupadas por bases trocáveis.

A saturação por alumínio (m%), por sua vez, foi obtida pela razão entre o Al^{3+} trocável e t, também expressa em porcentagem. A matéria orgânica do solo (MO) foi determinada por métodos colorimétricos após oxidação via dicromato de potássio ou pelo método de Walkley-Black, conforme procedimento adotado pelo laboratório de análise. A partir do valor de MO, estimou-se o carbono orgânico (C. Org) mediante o fator de conversão adequado ao método empregado.

2.3. Bioensaio

O bioensaio foi conduzido em casa de vegetação da Universidade Federal de Viçosa (UFV) – *Campus* Florestal, sob condições controladas, com o objetivo de minimizar a interferência de fatores ambientais externos. O delineamento experimental adotado foi o de blocos casualizados (DBC), composto por 14 tratamentos e quatro repetições, totalizando 56 unidades experimentais. Cada unidade experimental foi constituída por um vaso com capacidade volumétrica de 1 litro, contendo uma planta de milho.

Utilizou-se a cultura do milho (*Zea mays L.*), cultivar BM 3063 PRO 3® (Bio Matrix). A semeadura foi realizada diretamente nos vasos, utilizando-se cinco sementes por unidade experimental. Após a emergência, procedeu-se ao desbaste, mantendo-se duas plantas

por vaso, com o objetivo de padronizar a densidade e reduzir a competição entre plantas.

A aplicação do biossólido foi realizada antes da semeadura, sendo o material previamente incorporado ao solo de forma homogênea. A semeadura ocorreu imediatamente após a incorporação, permitindo a interação do biossólido com o sistema radicular desde os estádios iniciais de desenvolvimento.

A irrigação foi realizada manualmente, com frequência diária, mantendo-se o solo próximo à capacidade de campo. O manejo hídrico foi ajustado conforme a demanda das plantas, evitando condições de estresse hídrico ou encharcamento. O experimento foi estruturado com o objetivo de avaliar os efeitos de diferentes doses de biossólido, bem como da presença ou ausência de correções de fertilidade, sobre o desenvolvimento inicial do milho. Para isso, foram estabelecidos 14 tratamentos, organizados em dois conjuntos: o primeiro, sem qualquer correção de pH ou de macronutrientes, e o segundo, contemplando tais ajustes conforme as exigências nutricionais identificadas nas análises do solo durante o experimento (Tabela 23). Essa divisão permitiu comparar o impacto exclusivo do biossólido com o efeito combinado entre o resíduo e a adequação química do substrato.

Nos tratamentos que receberam correção, as quantidades de calcário e de fontes de N, P e K foram ajustadas em função do volume dos vasos de 1 litro, garantindo proporcionalidade entre a recomendação agronômica e a escala experimental. Dessa forma, buscou-se isolar o efeito das doses de biossólido, evitando que limitações nutricionais ou de acidez interferissem no desempenho das plantas.

Figura 15. Experimento



Fonte: A autora (2026).

Tabela 24. Tratamentos propostos

Tratamento	Descrição	Dose de Biossólidos (t ha ⁻¹)
GRUPO 1. Sem correção de pH e NPK		
T1	Solo puro (controle)	0
T2	Solo + biossólidos	10
T3	Solo + biossólidos	20
T4	Solo + biossólidos	40
T5	Solo + biossólidos	80
T6	Solo + biossólidos	100
T7	Solo + biossólidos	160
GRUPO 2. Com correção de pH e NPK		
T8	Solo puro (controle corrigido)	0
T9	Solo + biossólidos	10
T10	Solo + biossólidos	20
T11	Solo + biossólidos	40
T12	Solo + biossólidos	80
T13	Solo + biossólidos	100
T14	Solo + biossólidos	160

Fonte: A autora (2026).

O experimento foi finalizado aos 24 dias após a semeadura, momento em que se observou perda significativa do vigor vegetativo nas plantas submetidas às doses mais elevadas de biossólido.

2.4 Análises biométricas

O diâmetro do caule (DC) foi determinado com o auxílio de paquímetro digital, sendo a mensuração realizada na região do colo da planta, aproximadamente a 1 cm acima da superfície do solo, e os valores expressos em centímetros. A altura das plantas (AP) foi aferida por meio de régua milimetrada, medindo-se a distância entre a superfície do solo e o ponto de inserção da última folha completamente expandida, conforme critério padronizado para avaliações de crescimento vegetativo em milho. O número de folhas (NF) foi obtido por contagem direta, considerando-se apenas folhas completamente expandidas, o que permitiu uma avaliação precisa do estágio de desenvolvimento das plantas ao longo do período

experimental.

A massa fresca da parte aérea (MFPA) e do sistema radicular (MFR) foi determinada ao final do período experimental, mediante a colheita das plantas e a separação manual entre caule e raízes. O material vegetal foi cuidadosamente lavado em água corrente para remoção do solo aderido, seguido de enxágue com água destilada e secagem superficial com papel absorvente. Na sequência, cada fração foi pesada individualmente em balança analítica de precisão, até que o peso se estabilizasse, com os resultados expressos em gramas por planta. Essa variável foi utilizada como indicadora do acúmulo inicial de biomassa e da resposta do crescimento vegetativo do milho às diferentes doses de biossólido e aos tratamentos de correção da fertilidade do solo.

A massa seca da parte aérea (MSPA) e do sistema radicular (MSR) foi determinada ao final do experimento, após a coleta das plantas, que foram devidamente acondicionadas em sacos de papel e submetidas à secagem em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C, até atingirem massa constante. Esse procedimento assegurou a eliminação da umidade do tecido vegetal, permitindo a quantificação precisa da biomassa acumulada. A variável foi utilizada como indicador da resposta integrada das plantas às condições de fertilidade do solo e às doses de biossólido aplicadas.

2.5 Análises estatísticas

Após a verificação dos pressupostos estatísticos de normalidade e homogeneidade de variâncias, por meio dos testes de Shapiro-Wilk, aplicou-se o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, o qual permitiu avaliar a existência de diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos, considerando o nível de significância estabelecido de 5%.

Para a visualização da distribuição dos dados e da tendência central das variáveis em função das doses de biossólido, foram construídos boxplots. Essa representação gráfica possibilitou a análise exploratória da variabilidade entre tratamentos e a identificação de padrões de resposta associados às diferentes doses aplicadas.

Todas as análises estatísticas e a elaboração dos gráficos foram realizadas no *software* estatístico R. Essa abordagem metodológica assegurou a interpretação rigorosa dos efeitos das diferentes doses de biossólido sobre os atributos químicos do solo e o desempenho inicial das plantas, respeitando as limitações impostas pela natureza não paramétrica dos dados.

3. RESULTADOS

O bioensaio permitiu avaliar o efeito da aplicação de diferentes doses de bio sólidos, associadas ou não à correção do solo, sobre o crescimento inicial do milho. Os resultados demonstraram que a aplicação de bio sólidos exerce influência significativa sobre os parâmetros vegetativos analisados, como número de folhas (NF), diâmetro do caule (DC), altura da planta (AP) e área média foliar (AMF), além de afetar as variáveis relacionadas à biomassa fresca e seca.

A avaliação da normalidade (Tabela 25) indicou que apenas quatro das dez variáveis analisadas apresentaram distribuição compatível com a normalidade ($p > 0,05$): DC, AP, AMF e MFR. Essas variáveis, relacionadas principalmente a características morfológicas estruturais e à massa fresca radicular, demonstraram comportamento estatístico mais estável e simétrico, sugerindo menor influência de assimetria ou valores extremos.

Por outro lado, as variáveis NF, LMF, MFPA, MSPA e MSR apresentaram p-valores inferiores a 0,05, evidenciando violação do pressuposto de normalidade. Destacam-se, especialmente, MSPA e MSR, cujos valores do estatístico W foram substancialmente baixos (0,2825; 0,6991; 0,7312), indicando forte afastamento da distribuição normal. Esse comportamento sugere possível assimetria acentuada, presença de *outliers* ou heterogeneidade na resposta dos tratamentos.

Tabela 25. Teste de normalidade

Variáveis	Shapiro–Wilk	p-valor	Conclusão
AMF	0,974	0,2666	Sim
AP	0,9644	0,0972	Sim
DC	0,9649	0,1028	Sim
LMF	0,9182	0,001	Não
MFPA	0,9251	0,0019	Não
MFR	0,9663	0,1191	Sim
MSPA	0,2825	0	Não
MSR	0,6991	0	Não
NF	0,9326	0,0038	Não

Fonte: A autora (2026).

Do ponto de vista biológico, variáveis relacionadas à produção de biomassa seca tendem a apresentar maior variabilidade experimental, especialmente em experimentos com insumos orgânicos ou tratamentos que influenciam o crescimento de forma não linear. A presença de respostas diferenciadas entre unidades experimentais pode explicar a distribuição não normal observada nessas variáveis./

Estatisticamente, considerando que 60% das variáveis não atenderam ao pressuposto de normalidade, na sequência, foram adotados métodos de análise não paramétricos, como o teste de Kruskal–Wallis e correlação de Spearman, que se mostraram metodologicamente mais adequados para análises subsequentes.

Tabela 26. Teste Kruskal–Wallis

Variável	Tratamentos sem Correção (H)	p-valor	Interpretação	Tratamentos Com Correção (H)	p-valor	Interpretação
NF	10,07	0,1217	Não significativo	10,03	0,1235	Não significativo
DC	29,22	< 0,0001	Significativo	23,26	0,0007	Significativo
AP	23,89	0,0005	Significativo	32,24	< 0,0001	Significativo
AMF	—	< 0,05*	Significativo	—	< 0,05*	Significativo
LMF	—	< 0,05*	Significativo	—	< 0,05*	Significativo
MFPA	—	< 0,05*	Significativo	13,19	0,0401	Não significativo
MFR	—	> 0,05*	Não significativo	—	> 0,05*	Não Significativo
MSPA	12,24	0,0567	Não significativo	14,29	> 0,05*	Não significativo
MSR	—	> 0,05*	Não significativo	—	> 0,05*	Não significativo
Relação MSR/MSPA	—	> 0,05*	Não significativo	—	> 0,05*	Não significativo

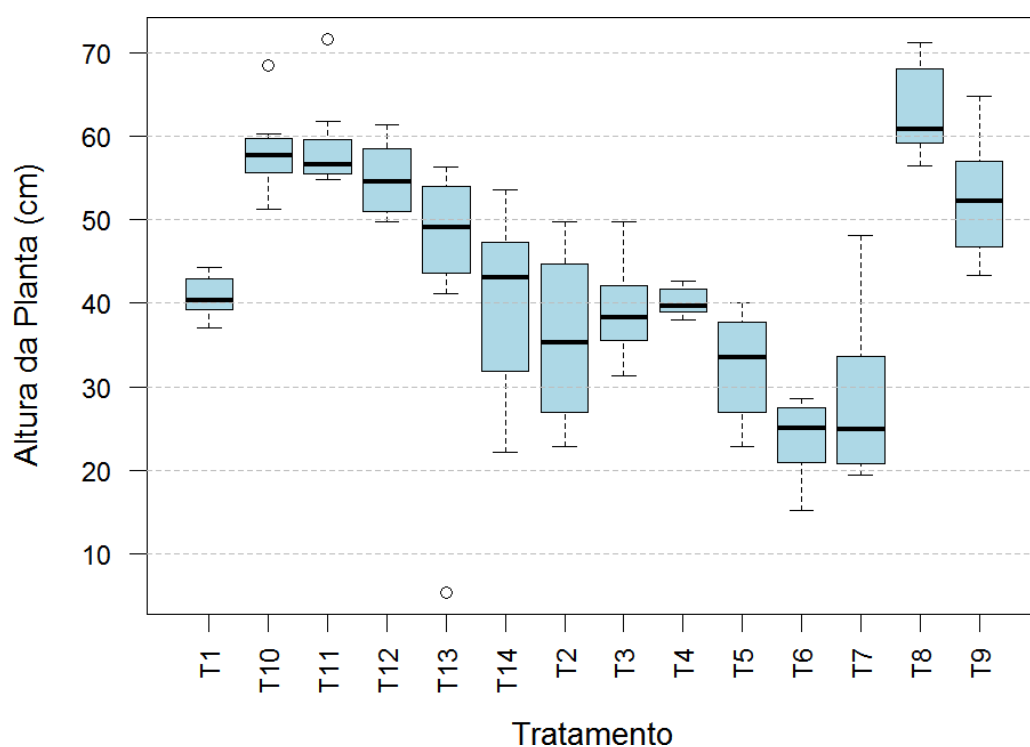
*Significância do teste a 5%. O H representa o valor calculado a partir das diferenças entre os postos (ranks) das amostras comparadas.

Fonte: A autora (2026).

A análise dos dados por meio do teste de Kruskal–Wallis (Tabela 26) evidenciou que as variáveis avaliadas apresentaram respostas diferenciadas às doses aplicadas, com comportamento distinto entre as condições sem correção e com correção do solo. De maneira geral, as variáveis morfológicas mostraram-se mais sensíveis aos tratamentos do que as variáveis relacionadas ao acúmulo total de biomassa, indicando que o crescimento estrutural da planta responde de forma mais imediata às alterações no ambiente nutricional.

O número de folhas apresentou média de 5,48, com baixa amplitude (4 a 7 folhas) e desvio padrão reduzido (0,697), indicando relativa uniformidade fenológica entre as plantas no período avaliado, o que sugere que os tratamentos não comprometeram o ritmo básico de emissão foliar. Em contraste, o diâmetro do caule exibiu maior variabilidade (DP = 1,035), com valores oscilando de 1,01 a 6,32 cm, refletindo diferenças no vigor estrutural das plantas, possivelmente associadas à disponibilidade de nutrientes e ao efeito das doses de biossólido sobre o crescimento radial do colmo.

Figura 16. Altura da planta (AP) em resposta aos tratamentos



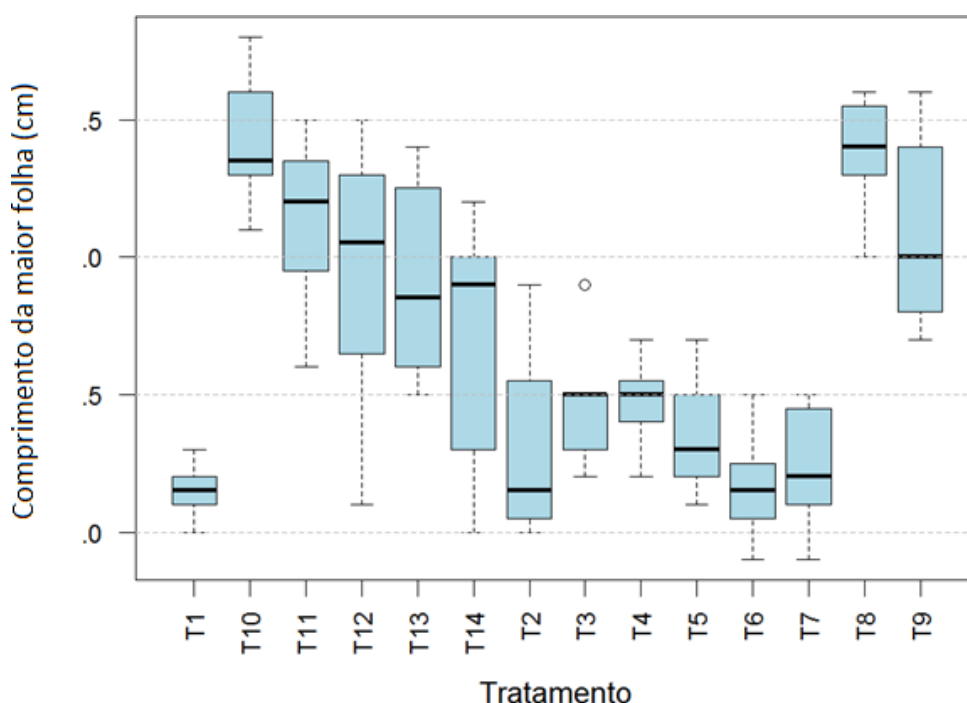
Fonte: A autora (2026).

A altura da planta (AP) (Figura 16) apresentou média de 43,72 cm, porém com elevada dispersão (DP = 13,77) e ampla faixa de variação (5,38 a 71,60 cm), evidenciando respostas contrastantes dos tratamentos quanto ao alongamento vegetativo, variável altamente sensível às condições nutricionais e químicas do solo. De forma complementar, a área média foliar registrou média de 34,62 cm², com valores entre 12,8 e 58,3 cm², indicando diferenças expressivas na expansão foliar, diretamente relacionadas à capacidade fotossintética e ao potencial de acúmulo de biomassa. Em conjunto, essas variáveis confirmam que o crescimento inicial do milho respondeu de maneira diferenciada às condições impostas pelos tratamentos,

sobretudo no que se refere ao vigor e à arquitetura das plantas.

A AP seguiu o padrão de dose-resposta observado nas demais variáveis. Os tratamentos T8, T10 e T11 atingiram alturas médias superiores a 58 cm, enquanto T6 e T7 registraram apenas 23,85 e 28,31 cm, respectivamente. O crescimento reduzido em tratamentos com doses excessivas sugere efeito saturante, possivelmente devido ao acúmulo de sais ou a desequilíbrios nutricionais. Portanto, AP é um indicador sensível das respostas das plantas às diferentes doses de biossólidos e à correção do solo.

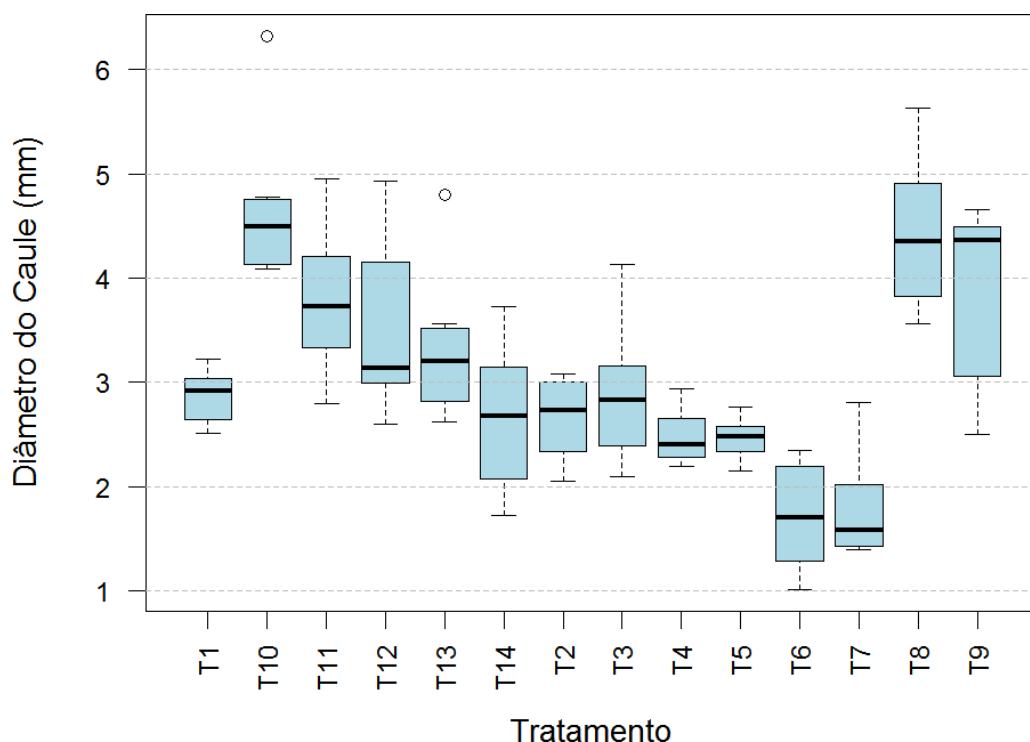
Figura 17. Comprimento da maior folha (LMF) em resposta aos tratamentos



Fonte: A autora (2026).

O comprimento da maior folha (Figura 17) variou entre 0,90 e 2,80 cm, acompanhando o padrão de desempenho observado nas outras variáveis. Maior LMF foi registrado em tratamentos intermediários com correção, reforçando que o biossólido, quando adequadamente aplicado, melhora o desenvolvimento foliar. A correlação positiva com DC ($r = 0,87$) e MFPA ($r = 0,95$) (Tabela 27) sugere que folhas mais largas estão associadas a plantas estruturalmente mais robustas e com maior acúmulo de biomassa fresca, corroborando a importância dessa variável como indicadora de vigor vegetativo.

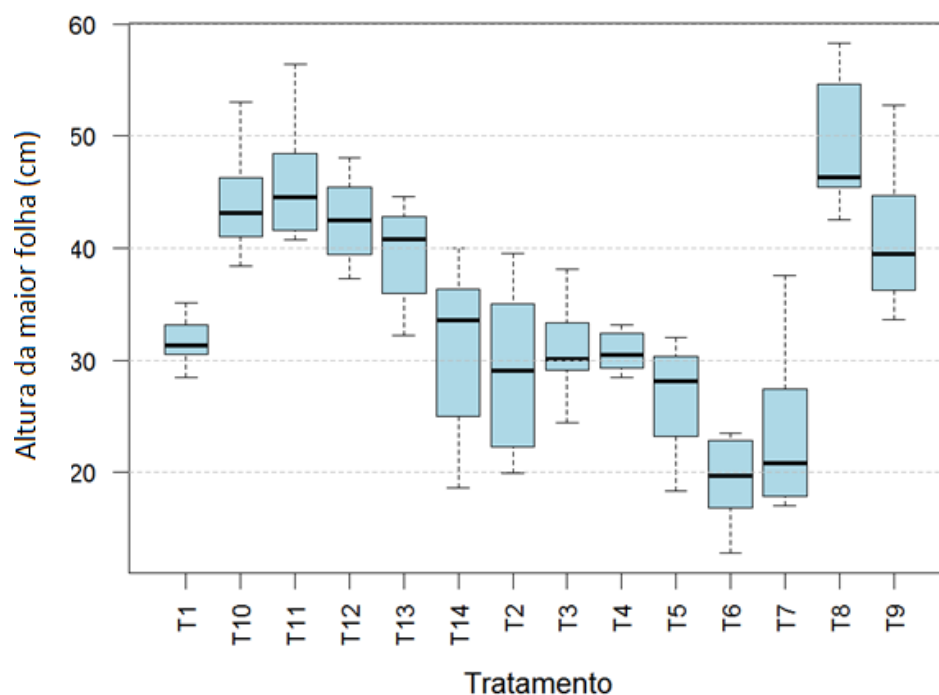
Figura 18. Diâmetro do caule (DC) em resposta aos tratamentos



Fonte: A autora (2026).

O diâmetro do caule (Figura 18) foi fortemente influenciado pelas doses de biossólidos e pela correção do solo. Os maiores valores de DC foram observados em T10 e T8, correspondendo aos tratamentos com crescimento aéreo mais robusto. A elevada correlação entre DC e MSPA ($r = 0,90$) indica que plantas com caules mais espessos acumulam mais biomassa seca, refletindo vigor estrutural e capacidade de suporte para folhas e colmos futuros. Por outro lado, DC foi menor em tratamentos como T6 e T7, reforçando que excesso de biossólidos, sem ajuste nutricional, pode comprometer a estrutura da planta. Assim, DC é uma variável confiável para prever desempenho vegetativo inicial.

Figura 19. Altura da maior folha (AMF) em resposta aos tratamentos

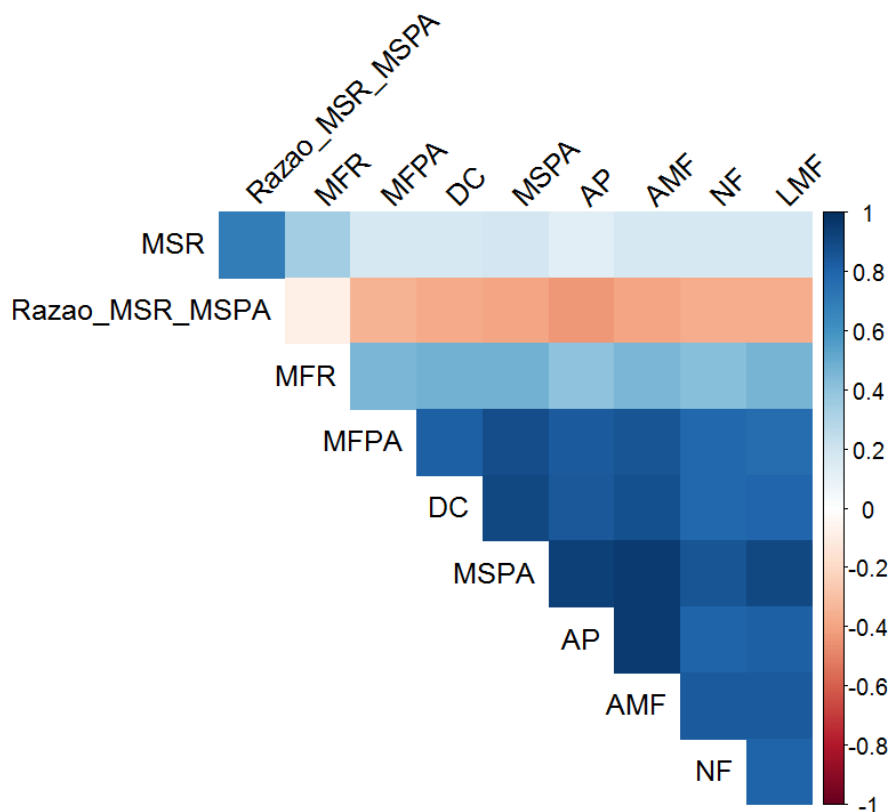


Fonte: A autora (2026).

A AMF (Figura 19) refletiu diretamente o efeito combinado do biossólido e da correção do solo, sendo maior em T8, T11 e T10, com valores acima de 44 cm². Essa variável é fundamental, pois folhas maiores ampliam a capacidade fotossintética e, consequentemente, a produção de biomassa. Tratamentos com doses altas sem correção (T6, T7) apresentaram áreas foliares significativamente menores, indicando que o excesso de biossólidos pode reduzir a expansão foliar e limitar a eficiência fotossintética. A correlação elevada entre AMF e MSPA ($r = 0,95$) (Tabela 26) sugere que plantas com maior área foliar também acumulam mais biomassa seca, evidenciando o efeito positivo do manejo adequado de biossólidos.

A análise do Heatmap (Figura 20) revela um padrão estrutural claramente definido entre as variáveis da parte aérea. Número de folhas (NF), diâmetro do caule (DC), altura de plantas (AP), altura média foliar (AMF), comprimento médio foliar (LMF), massa fresca da parte aérea (MFPA) e massa seca da parte aérea (MSPA) apresentam coeficientes elevados e positivos, predominantemente acima de 0,80. Em termos de Spearman, isso indica forte associação monotônica positiva, sugerindo que plantas que ocupam posições superiores no ranking de uma dessas variáveis tendem, também, a ocupar posições superiores nas demais.

Figura 20. Matriz de correlação de Spearman



*MSR: massa seca raiz; MFR: massa fresca raiz; NF: número de folhas; LMF: largura da maior folha; AP: altura da planta; AMF: altura da maior folha; DC: diâmetro do caule; MFPA: massa fresca parte aérea; MSPA: massa seca parte aérea.

Fonte: A autora (2026).

A matriz apresentada corresponde a correlações de Spearman (ρ), isto é, coeficientes baseados na ordenação (postos) dos dados, e não em valores absolutos, como ocorre no coeficiente de Pearson. Destacam-se as associações entre AP e AMF ($\rho = 0,953$), AMF e MSPA ($\rho = 0,950$), e AP e MSPA ($\rho = 0,930$). Esses valores indicam que indivíduos com maior altura tendem consistentemente a apresentar maior área foliar e maior acúmulo de matéria seca da parte aérea. Como Spearman avalia a concordância entre postos, isso reforça a ideia de um crescimento vegetativo coordenado, independentemente da forma funcional exata da relação.

Tabela 27. Coeficiente de Correlação de Spearman *

Variável	NF	DC	AP	AMF	LMF	MFPA	MFR	MSPA	MSR	Razão MSR/MSPA
NF	1	0,781	0,809	0,834	0,802	0,788	0,428	0,85	0,179	-0,364
DC	0,781	1	0,846	0,871	0,795	0,817	0,478	0,909	0,171	-0,38
AP	0,809	0,846	1	0,953	0,819	0,831	0,408	0,93	0,125	-0,433
AMF	0,834	0,871	0,953	1	0,835	0,859	0,45	0,95	0,173	-0,397
LMF	0,802	0,795	0,819	0,835	1	0,767	0,462	0,9	0,172	-0,362
MFPA	0,788	0,817	0,831	0,859	0,767	1	0,457	0,883	0,172	-0,341
MFR	0,428	0,478	0,408	0,45	0,462	0,457	1	0,474	0,342	-0,088
MSPA	0,85	0,909	0,93	0,95	0,9	0,883	0,474	1	0,188	-0,398
MSR	0,179	0,171	0,125	0,173	0,172	0,172	0,342	0,188	1	0,691
Razão MSR/MSPA	-0,36	-0,38	-0,43	-0,39	-0,36	-0,341	-0,08	-0,398	0,691	1

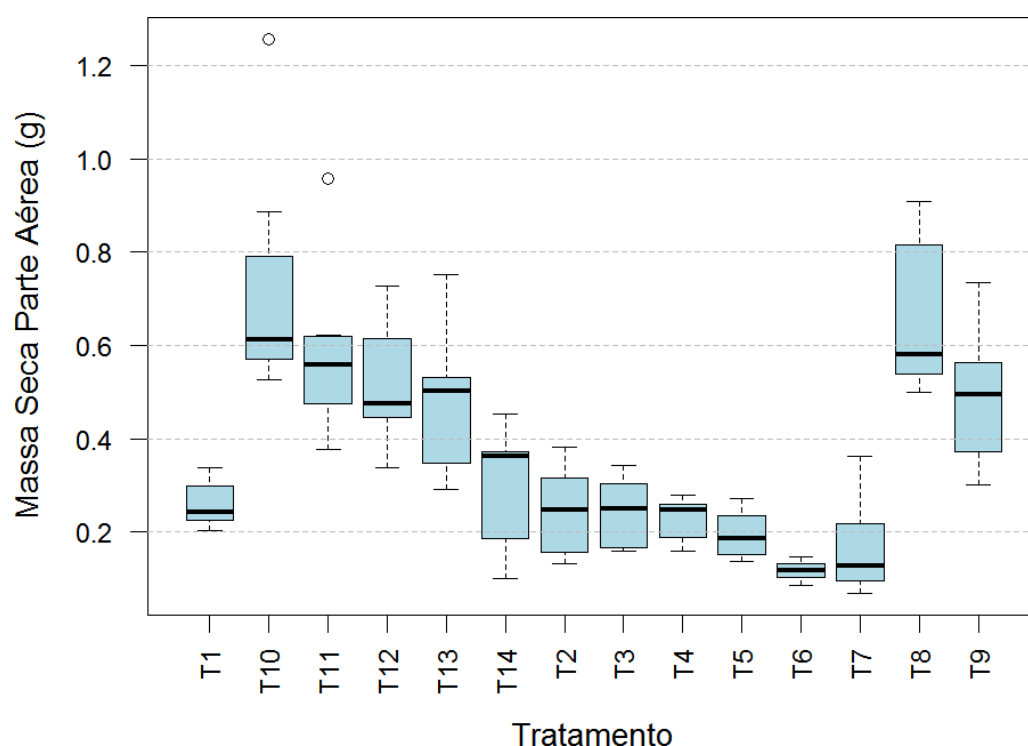
*MSR: massa seca raiz; MFR: massa fresca raiz; NF: número de folhas; LMF: largura da maior folha; AP: altura da planta; AMF: altura da maior folha; DC: diâmetro do caule; MFPA: massa fresca parte aérea; MSPA: massa seca parte aérea.

Fonte: A autora (2026).

A MFPA (Apêndice II) apresentou forte correlação com a MSPA ($r = 0,88$) (Tabela 27), evidenciando que o acúmulo de biomassa fresca está diretamente relacionado à massa seca acumulada na parte aérea. Os tratamentos T8, T10 e T11 destacaram-se com maior acúmulo de matéria fresca, confirmando que doses intermediárias de biossólidos proporcionam condições nutricionais adequadas para crescimento vegetativo robusto. Em contrapartida, o desempenho limitado observado em T6 e T7 sugere que doses elevadas podem induzir estresse osmótico ou fitotóxico, reduzindo a eficiência da assimilação de carbono e, consequentemente, o crescimento aéreo.

A MSPA (Figura 21) seguiu o padrão observado para MFPA (Apêndice II), reforçando que o aumento de massa fresca resulta em maior acúmulo de matéria seca, essencial para produtividade futura. As plantas de T8, T10 e T11 apresentaram valores médios superiores a 0,45 g, destacando a eficiência da dose intermediária de biossólidos. Plantas com doses excessivas (T6 e T7) registraram menor MSPA, revelando efeito adverso do excesso de nutrientes e destacando a necessidade de determinar a faixa ótima de aplicação.

Figura 21. MSPA em resposta aos tratamentos

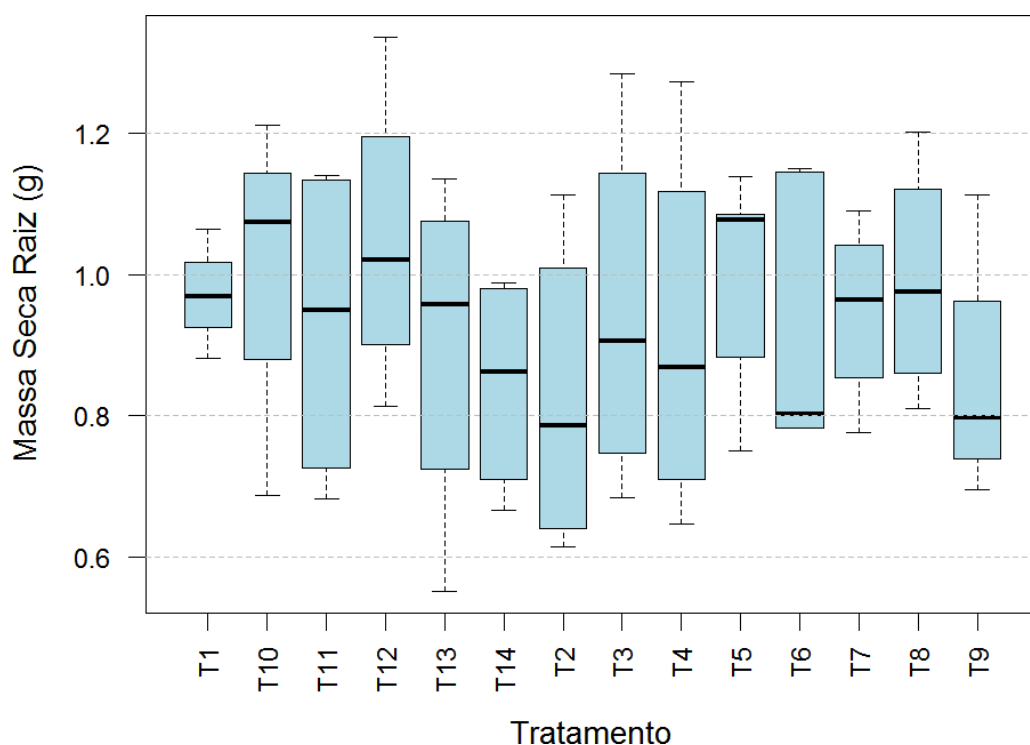


Fonte: A autora (2026).

A MFR (Apêndice II) apresentou variação menos pronunciada em relação às variáveis aéreas, embora ainda refletisse o efeito do tratamento. O valor mais elevado foi observado em T10, indicando que a biomassa radicular também responde positivamente à dose adequada de biossólidos com correção do solo. No entanto, a correlação moderada com as demais variáveis ($r < 0,65$) evidencia que o crescimento radicular pode ser influenciado por fatores específicos do substrato e distribuição de nutrientes, sendo menos previsível que o crescimento aéreo.

Em contraste, as variáveis relacionadas ao sistema radicular apresentam comportamento distinto. A massa fresca de raiz (MFR) mostra associações moderadas com as variáveis da parte aérea (p entre 0,40 e 0,47), enquanto a massa seca de raiz (MSR) apresenta associações fracas (p entre 0,12 e 0,19). Isso indica que o ranking das plantas, quanto ao crescimento radicular, não acompanha, com a mesma intensidade, o ranking observado para crescimento aéreo, sugerindo relativa independência na dinâmica desses compartimentos.

Figura 22. MSR em resposta aos tratamentos

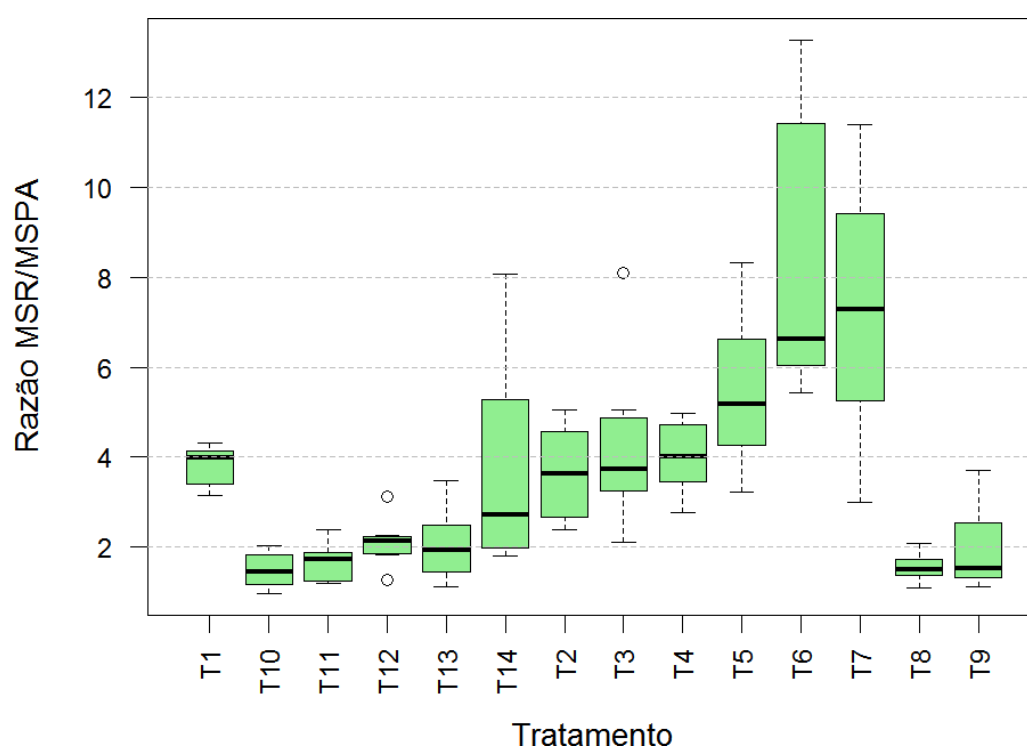


Fonte: A autora (2026).

A MSR (Figura 22) apresentou comportamento independente das variáveis aéreas, com baixa correlação com NF, DC, AP e AMF. Isso indica que a alocação de biomassa para as raízes não segue diretamente o crescimento da parte aérea e pode ser influenciada por fatores como disponibilidade de água e densidade do solo. Embora MSR seja menos sensível às doses de biossólidos, é uma variável crítica para avaliar a estabilidade e a capacidade de absorção de nutrientes e água pelas plantas.

A razão MSR/MSPA (Figura 23) apresenta correlação monotônica negativa moderada com as variáveis da parte aérea (entre -0,34 e -0,43) e correlação positiva forte com MSR ($p = 0,691$). Esse padrão indica que plantas com maior posição relativa em crescimento aéreo tendem a ocupar posições inferiores na razão raiz/parte aérea. Em termos fisiológicos, isso evidencia uma mudança na estratégia de alocação de biomassa, na qual o aumento relativo da parte aérea reduz proporcionalmente a contribuição do sistema radicular.

Figura 23. Razão MSR/MSPA em resposta aos tratamentos



Fonte: A autora (2026).

A análise da razão MSR/MSPA (Figura 23) indica que tratamentos com menor valor dessa razão, como T8 (1,55) e T10 (1,48), estiveram associados a maior desempenho das variáveis da parte aérea. Esse padrão é consistente com as correlações negativas moderadas observadas entre a razão MSR/MSPA e altura de plantas (AP; $\rho = -0,433$), diâmetro do caule (DC; $\rho = -0,380$) e massa seca da parte aérea (MSPA; $\rho = -0,398$). Esses coeficientes indicam que, à medida que aumenta o desempenho vegetativo da parte aérea, tende a ocorrer redução relativa na proporção de biomassa alocada ao sistema radicular. Por outro lado, tratamentos com maior razão, como T6 (8,36) e T7 (7,29), estiveram associados a menor desempenho das variáveis aéreas, sugerindo padrão de alocação proporcionalmente mais direcionado às raízes. Ressalta-se que tais associações não implicam relação causal direta, mas evidenciam consistência monotônica entre as variáveis.

Os tratamentos com doses intermediárias de bioossólidos, especialmente T8, T10 e T11, apresentaram maior desenvolvimento em altura, diâmetro do caule e área foliar. A correlação monotônica muito forte entre AP e área média foliar (AMF; $\rho = 0,953$) indica que plantas melhor posicionadas no ranking de altura tendem, também, a ocupar posições superiores no ranking de área foliar. De maneira semelhante, a associação elevada entre

DC e MSPA ($\rho = 0,909$) demonstra que indivíduos com maior diâmetro do caule tendem a apresentar maior acúmulo de matéria seca da parte aérea. Esses resultados evidenciam um padrão integrado de crescimento estrutural e produtivo. A massa fresca da parte aérea (MFPA) apresentou correlação muito forte com MSPA ($\rho = 0,883$), indicando elevada concordância entre os rankings dessas variáveis. Tal resultado sugere relativa estabilidade na proporção de matéria seca entre os tratamentos, embora não permita inferir uniformidade absoluta da composição tecidual.

O número de folhas (NF) apresentou associação forte com AMF ($\rho = 0,834$), indicando que plantas com maior emissão foliar tendem, também, a apresentar maior expansão da superfície fotossintética. Esse comportamento reforça a integração morfofisiológica do crescimento vegetativo.

Em contraste, a massa seca radicular (MSR) revelou correlações baixas com as variáveis da parte aérea (ρ variando de 0,125 a 0,188), enquanto a massa fresca radicular (MFR) apresentou correlações moderadas (ρ entre 0,408 e 0,478). Esses resultados indicam que o ranking das plantas, quanto ao crescimento radicular, não acompanha, na mesma intensidade, o ranking das variáveis aéreas, sugerindo relativa independência entre os compartimentos.

A associação elevada entre AP e MSPA ($\rho = 0,930$), bem como entre AMF e MSPA ($\rho = 0,950$), reforça a existência de um eixo fisiológico integrado envolvendo crescimento longitudinal, expansão foliar e acúmulo de biomassa aérea. Contudo, os coeficientes muito elevados ($\rho > 0,90$) também indicam possível redundância estrutural entre variáveis morfológicas e produtivas, sugerindo que parte delas representa dimensões correlatas de um mesmo processo biológico subjacente.

De forma geral, a análise de correlação de Spearman evidencia dois padrões principais: (i) um bloco altamente integrado de variáveis da parte aérea, com forte associação monotônica positiva, e (ii) um conjunto radicular com comportamento parcialmente independente, cuja variação se relaciona mais diretamente à razão de alocação de biomassa do que ao crescimento vegetativo absoluto. Esses resultados apontam consistência fisiológica no desenvolvimento inicial do milho sob as condições experimentais avaliadas, mantendo-se, contudo, a interpretação restrita ao âmbito associativo próprio da análise de correlação.

Os dados revelam um padrão de crescimento vegetal integrado e altamente previsível nas condições do ensaio. As correlações manifestam, de maneira quantitativa, a interação dos princípios fisiológicos, como a captura de luz (AP e AMF), a conversão em biomassa (MFPA e MSPA) e a eficiência estrutural (AP e MSPA). Do ponto de vista agrônomo, essas correlações têm implicações diretas para manejo e seleção de tratamentos.

O DC surge, também, como um indicador precoce de desempenho, dado seu alto valor para biomassa seca.

A tabela contendo as médias dos tratamentos por agrupamento foi alocada no Apêndice II, a fim de garantir maior objetividade e fluidez na apresentação e discussão dos resultados.

4. DISCUSSÃO

A altura da planta destacou-se como uma das variáveis mais responsivas, apresentando diferença altamente significativa tanto na condição sem correção quanto de forma ainda mais expressiva, ou seja, na condição com correção. Esse resultado demonstra que o crescimento longitudinal é fortemente influenciado pelas doses aplicadas e que a melhoria das condições químicas do solo potencializa essa resposta. De acordo com Marschner (2012), o crescimento vegetativo é uma das primeiras respostas fisiológicas à maior disponibilidade de nutrientes no solo, especialmente em condições em que limitações químicas são corrigidas. Taiz *et al.* (2017) complementam, afirmando que o alongamento celular e a atividade meristemática dependem diretamente do balanço nutricional, o que explica o incremento observado na altura das plantas sob solo corrigido.

A altura da planta, associada à área foliar, é um indicador sensível de respostas nutricionais e de saúde geral das plantas (Monteiro *et al.*, 2019). O crescimento reduzido em tratamentos com doses excessivas de biossólidos reforça a necessidade de se definir faixas ótimas de aplicação, evitando desequilíbrios nutricionais e toxicidade química (Freitas *et al.*, 2023). Esses resultados sugerem que a integração entre correção do solo e doses adequadas de biossólidos maximiza o crescimento aéreo, potencializando a fotossíntese e o acúmulo de biomassa (Silva *et al.*, 2017).

Comportamento semelhante foi observado para o diâmetro do caule, que também apresentou diferença altamente significativa nas duas condições avaliadas. O diâmetro do caule está diretamente relacionado à sustentação mecânica e à eficiência no transporte de água e fotoassimilados, sendo considerado um importante indicador de vigor vegetativo (Malavolta, 2006). Segundo Fageria (2009), a melhoria da fertilidade do solo promove maior eficiência no uso de nutrientes, refletindo-se no desenvolvimento estrutural da planta, o que dialoga com os resultados encontrados.

O diâmetro do caule é frequentemente apontado como um indicador confiável de vigor estrutural e capacidade de suporte de folhas e colmos futuros (Silva *et al.*, 2017). A correlação positiva com a biomassa seca sugere que o crescimento robusto do caule reflete eficiência no acúmulo de reservas orgânicas, essencial para o desenvolvimento posterior e produtividade do milho. O menor DC em tratamentos com excesso de biossólidos confirma a importância de ajustar as doses, evitando efeitos adversos da saturação de nutrientes e do desequilíbrio osmótico no solo (Araújo *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2022).

Em contraste, o número de folhas não apresentou diferença significativa em nenhuma das condições. A análise sugere que NF pode servir como indicador precoce de resposta ao manejo de bio sólidos, sendo útil para avaliação rápida de tratamentos promissores. O padrão observado aponta o efeito dose-dependente dos bio sólidos, em que doses intermediárias promovem crescimento otimizado, enquanto doses excessivas podem causar estresse osmótico ou fitotóxico (Silva *et al.*, 2017; Araújo *et al.*, 2022). O aumento no número de folhas em tratamentos com correção nutricional indica que a adição de bio sólidos, aliada à adequação do solo, melhora a disponibilidade de nutrientes essenciais, favorecendo a expansão foliar e a fotossíntese, corroborando resultados semelhantes em culturas de milho e outras espécies cultivadas (Monteiro *et al.*, 2019; Freitas *et al.*, 2023).

Folhas maiores promovem maior capacidade fotossintética e contribuem diretamente para a formação de biomassa, confirmando estudos que indicam relação positiva entre expansão foliar e acúmulo de matéria seca (Silva *et al.*, 2017; Monteiro *et al.*, 2019). O efeito positivo da combinação de bio sólidos com correção do solo destaca a importância do manejo equilibrado, que permite o aproveitamento máximo dos nutrientes e evita impactos adversos associados a doses elevadas (Araújo *et al.*, 2022; Freitas *et al.*, 2023).

No que se refere às variáveis de biomassa, a MSPA apresentou tendência à significância na condição sem correção, tornando-se estatisticamente significativa após a correção do solo. Esse resultado reforça a hipótese de que a adequação química do solo amplia a eficiência na conversão de assimilados em biomassa estrutural. Fageria (2009) destaca que o aumento da disponibilidade nutricional favorece a produção de biomassa aérea em maior proporção que a biomassa radicular, especialmente em ambientes previamente limitantes. Além disso, Raij *et al.* (1997) demonstram que a correção da acidez do solo melhora a disponibilidade de nutrientes essenciais e reduz a toxicidade por alumínio, criando condições favoráveis ao crescimento vegetal.

Os resultados indicam que a correção do solo intensificou as respostas das variáveis morfológicas e da biomassa aérea, evidenciando maior eficiência no crescimento sob condições químicas adequadas. Esses achados corroboram a literatura clássica de nutrição mineral vegetal, que enfatiza a importância do manejo adequado da fertilidade do solo para maximizar o desempenho vegetativo e a expressão do potencial produtivo das plantas (Malavolta, 2006).

Monteiro *et al.* (2019) e Silva *et al.* (2017) destacam o potencial agrônomo dos bio sólidos como fonte de nutrientes e matéria orgânica para o solo, promovendo incremento no crescimento vegetativo inicial de culturas agrícolas. A presença de nutrientes essenciais e

matéria orgânica nos biossólidos favorece a fotossíntese, a divisão celular e o vigor das plantas, indicando que, quando manejados adequadamente, esses resíduos podem substituir parcial ou totalmente fertilizantes convencionais, promovendo práticas agrícolas mais sustentáveis (Freitas *et al.*, 2023; Pereira *et al.*, 2023).

A forte associação monotônica observada entre a massa fresca da parte aérea (MFPA) e a massa seca da parte aérea (MSPA) ($\rho = 0,883$) indica elevada concordância entre os rankings dessas variáveis, evidenciando que plantas com maior acúmulo de biomassa fresca tendem, também, a apresentar maior acúmulo de matéria seca. Ainda que o coeficiente não seja tão extremo quanto previamente mencionado, trata-se de uma correlação classificada como muito forte, estatisticamente consistente com um crescimento estrutural equilibrado. Do ponto de vista fisiológico, esse padrão sugere que o incremento em biomassa fresca não se deve apenas à retenção hídrica, mas acompanha efetivo acúmulo de carbono estrutural, refletindo eficiência na assimilação fotossintética e na conversão de fotoassimilados em tecidos permanentes (Freitas *et al.*, 2023).

O desempenho inferior observado em doses excessivas de biossólidos reforça que o aumento indiscriminado da aplicação pode comprometer o crescimento vegetativo (Emmanouil *et al.*, 2024). Concentrações elevadas podem induzir estresse osmótico, salinização localizada e até efeitos fitotóxicos decorrentes de metais pesados ou excesso de nitrogênio amoniacal, afetando o balanço fisiológico das plantas (Silva *et al.*, 2017). Assim, os resultados corroboram a necessidade de manejo criterioso, baseado em diagnóstico químico do solo e em recomendações técnicas, para garantir eficiência agrônômica sem comprometer a segurança ambiental.

A razão MSR/MSPA constitui um indicador funcional de alocação de biomassa e fornece informações relevantes sobre a estratégia de crescimento das plantas. No presente conjunto de dados, essa variável apresentou correlação negativa moderada com atributos da parte aérea, como altura ($\rho = -0,433$) e massa seca da parte aérea ($\rho = -0,398$), sugerindo que plantas com maior desenvolvimento aéreo tendem a apresentar menor proporção relativa de biomassa radicular. Esse comportamento está em consonância com o conceito de alocação ótima de recursos, segundo o qual plantas sob condições nutricionais favoráveis direcionam maior investimento para estruturas fotossinteticamente ativas, maximizando a produção de carbono (Liu *et al.*, 2022). Em contrapartida, o aumento desproporcional da razão em tratamentos com doses elevadas pode indicar resposta adaptativa a desequilíbrios nutricionais ou limitações físico-químicas do solo, exigindo maior exploração radicular para manutenção do estado nutricional.

A análise conjunta de MFPA e MSPA reforça que o crescimento vegetativo foi acompanhado de incremento efetivo de matéria estrutural, variável diretamente associada ao potencial produtivo e à formação de biomassa economicamente relevante. A correlação elevada entre altura de plantas (AP) e MSPA ($\rho = 0,930$), bem como entre área média foliar (AMF) e MSPA ($\rho = 0,950$), evidencia que o crescimento longitudinal e a expansão foliar estão intimamente associados ao acúmulo de biomassa, caracterizando um eixo fisiológico integrado de desenvolvimento.

Por outro lado, a massa seca radicular (MSR) apresentou correlações baixas com as variáveis da parte aérea (ρ variando de 0,125 a 0,188), indicando relativa independência entre os compartimentos. Esse padrão sugere que o crescimento radicular pode estar sendo regulado por fatores específicos não diretamente capturados pelas variáveis aéreas, como densidade e resistência mecânica do solo, heterogeneidade na distribuição de nutrientes ou dinâmica da disponibilidade hídrica. Araújo *et al.* (2022) destacam que o sistema radicular responde de forma diferenciada a alterações no ambiente edáfico, podendo manter estabilidade relativa mesmo quando há variações expressivas no crescimento aéreo.

Dessa forma, os resultados indicam que o desempenho vegetativo inicial do milho sob aplicação de biossólidos é predominantemente determinado pela integração entre crescimento estrutural e acúmulo de biomassa aérea, enquanto o sistema radicular apresenta dinâmica parcialmente independente, possivelmente modulada por fatores edáficos específicos. A interpretação integrada desses padrões reforça a importância de manejo técnico adequado das doses aplicadas, visando maximizar eficiência fisiológica, produtividade e sustentabilidade do sistema produtivo.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação de biossólidos em diferentes doses apresentou efeitos significativos no crescimento inicial do milho, no desenvolvimento radicular e na biomassa acumulada, demonstrando que a utilização desse resíduo orgânico pode ser uma estratégia eficiente para aumentar a fertilidade do solo e a produtividade agrícola. A aplicação de biossólidos em diferentes doses (0, 10, 20, 40, 80, 100 e 160 t ha⁻¹) promoveu respostas distintas no crescimento inicial do milho, evidenciando efeito dependente tanto da quantidade aplicada quanto da presença de correção do solo com ajuste de pH e NPK.

Os tratamentos sem correção de pH e NPK, T1 (0 t ha⁻¹), T2 (10 t ha⁻¹) e T3 (20 t ha⁻¹), apresentaram incrementos graduais no crescimento vegetativo em relação ao controle absoluto. O tratamento T4 (40 t ha⁻¹) manteve tendência positiva; porém, a partir de T5 (80 t ha⁻¹), observou-se redução relativa no desempenho da parte aérea. Essa tendência tornou-se mais evidente em T6 (100 t ha⁻¹) e T7 (160 t ha⁻¹), nos quais o crescimento foi limitado, acompanhado por aumento proporcional da razão MSR/MSPA. Esse padrão sugere que doses elevadas, na ausência de correção química do solo, podem ter provocado desequilíbrios nutricionais, elevação da salinidade ou possíveis efeitos fitotóxicos, restringindo o crescimento vegetativo.

Nos tratamentos com correção de pH e NPK, o comportamento foi mais expressivo. O tratamento T8 (0 t ha⁻¹, solo corrigido) apresentou desempenho superior ao do controle sem correção (T1), evidenciando o papel da calagem e da adubação de base na melhoria das condições químicas do solo. As doses de 10 t ha⁻¹ (T9) e 20 t ha⁻¹ (T10) promoveram incrementos consistentes no crescimento, destacando-se T10 como um dos tratamentos de melhor desempenho geral. O tratamento T11 (40 t ha⁻¹) também evidenciou elevado desenvolvimento em altura, diâmetro do colmo e biomassa aérea, consolidando a faixa de 20–40 t ha⁻¹ como intervalo de maior eficiência agrônômica sob solo corrigido.

Entretanto, assim como observado no Grupo 1, doses superiores a 80 t ha⁻¹ (T12 = 80 t ha⁻¹; T13 = 100 t ha⁻¹; T14 = 160 t ha⁻¹), mesmo com correção do solo, resultaram em redução do desempenho vegetativo quando comparadas às doses intermediárias. Embora o efeito negativo tenha sido menos acentuado que no grupo sem correção, os resultados apontaram que o excesso de biossólido pode ultrapassar a capacidade de tamponamento do sistema solo-planta, comprometendo a eficiência nutricional.

A análise integrada demonstra que as doses intermediárias, particularmente 20 t ha⁻¹

(T10) e 40 t ha⁻¹ (T11), sob correção, além de 20 t ha⁻¹ (T3) e 40 t ha⁻¹ (T4), sem correção, estiveram associadas ao melhor equilíbrio entre crescimento da parte aérea e alocação radicular. Nessas condições, a razão MSR/MSPA foi menor, indicando maior investimento relativo na parte aérea e, conseqüentemente, maior potencial produtivo.

Por outro lado, as doses elevadas de 100 e 160 t ha⁻¹ (T6, T7, T13 e T14) estiveram associadas à maior proporção relativa de biomassa radicular, sugerindo resposta compensatória a condições potencialmente limitantes impostas pelo excesso de material orgânico ou nutrientes.

Além dos efeitos sobre o crescimento vegetativo, as doses intermediárias contribuíram para incremento do carbono orgânico do solo, favorecendo melhoria estrutural, maior retenção hídrica e potencial aumento da capacidade de troca catiônica. Esses benefícios indicam que a aplicação planejada de bio sólidos pode conciliar ganhos agrônômicos e sustentabilidade ambiental.

Os resultados indicaram uma faixa ótima de aplicação situada entre 20 e 40 t ha⁻¹, especialmente quando associada à correção de pH e adubação mineral. Doses inferiores podem limitar a expressão do potencial produtivo, enquanto doses superiores a 80 t ha⁻¹ tendem a reduzir a eficiência do crescimento. Assim, a utilização de bio sólidos deve ser tecnicamente dimensionada, considerando as características químicas do solo, a necessidade nutricional da cultura e o monitoramento contínuo de possíveis impactos ambientais.

6. REFERÊNCIAS

- ABREU, A. H. M.; ALONSO, J. M.; MELO, L. A. **Caracterização de biossólido e potencial de uso na produção de mudas de *Schinus terebinthifolia* Raddi**. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 24, n. 3, maio-jun. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019108265>. Acesso em: 23 nov. 2025.
- AGGELIDES, S. M.; LONDRA, P. A. **Effects of compost produced from town wastes and sewage sludge on the physical properties of soils**. Bioresource Technology, v. 71, n. 2, p. 253–259, 2000.
- ALCÂNTARA, M. A. K. de; NETO, V. de A.; CAMARGO, O. A. de; CANTARELLA, H. **Mineralização do nitrogênio em solos tratados com lodos de curtume**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 42, n. 4, p. 533-540, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000400013>. Acesso em: 23 nov. 2025.
- BARBOSA, J. Z.; POGGERE, G. C.; DALPISOL, M.; SERRAT, B. M.; BITTENCOURT, S.; MOTTA, A. C. V. **Alkalinized sewage sludge application improves fertility of acid soils**. Ciência e Agrotecnologia, v. 41, n. 5, p. 483–493, 2017. doi:10.1590/1413-70542017415006717.
- KABIRINEJAD, S., HOODAJI, M. **The effects of biosolid application on soil chemical properties and Zea mays nutrition**. Int J Recycl Org Waste Agricult 1, 4 (2012). Disponível em: <https://doi.org/10.1186/2251-7715-1-4>. Acesso em: 10 ago. 2025.
- BARCELAR, C. A. et al. **Residual effect of sewage sludge on some chemical and granulometric Inceptisol attributes**. Revistas da UFPR, 2001. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/agraria/article/view/982/0/>. Acesso em: 21 nov. 2025
- BARCELAR, C. de A.; ROCHA, A. A.; LIMA, M. R.; POHLMANN, M. **Residual effect of sewage sludge on some chemical and granulometric Inceptisol attributes**. Scientia Agraria, v. 2, n. 1, p. 87–91, 2001.
- BETTIOL, W; CAMARGO, O A (orgs.). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006.
- BETTIOL, Wagner; GALVÃO, José Aurélio H. **Uso agrícola de biossólidos e seus efeitos na fertilidade de solos tropicais**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 10, n. 2, p. 321–327, 2006.
- BITTENCOURT, S; AISSE, M M; MONTE SERRAT, B. **Gestão do uso agrícola do lodo de esgoto: estudo de caso do estado do Paraná, Brasil**. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 22, n. 6, p. 1089-1100, nov./dez. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522017156260>. Acesso em: 23 nov. 2025.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020**. Dispõe sobre critérios e procedimentos para o uso agrícola de biossólidos. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 20 ago. 2020.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006**. Define critérios e procedimentos para o uso benéfico de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados em solos agrícolas.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Anuário Estatístico do Setor Agrícola 2018**. Brasília, DF: MAPA, 2020.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Política Nacional de Resíduos Sólidos: Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Brasília, DF: MMA, 2010.

CABREIRA, T. F.; GONÇALVES, M. P.; SILVA, J. A. **Crescimento urbano e geração de resíduos sólidos: desafios e oportunidades**. Revista Ambiente ; Sociedade, v. 20, n. 3, p. 25–42, 2017.

CARMO, C A; EDUARDO, J L P. **Nutrientes em biossólidos e sua aplicação em solos agrícolas**. Belo Horizonte: EPAMIG, 2008.

CARNEIRO, W J O; SILVA, C A; MUNIZ, J A; SAVIAN, T V. **Mineralização de nitrogênio em latossolos adubados com resíduos orgânicos**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 37, n. 3, p. 715–725, jun. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000300018>. Acesso em: 23 nov. 2025.

CIOTTA, M N *et al.* **Matéria orgânica e aumento da capacidade de troca de cátions em solo com argila de atividade baixa sob plantio direto**. Ciência Rural, v. 33, n. 6, p. 975-981, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782003000600026>. Acesso em: 10 ago. 2025.

CORRÊA, J. C.; BÜLL, L. T.; CRUSCIOL, C. A. C.; MARCELINO, R. **Correção da acidez e mobilidade de íons em Latossolo com aplicação superficial de escória, lama cal, lodos de esgoto e calcário**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 42, n. 9, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000900013>. Acesso em: 23 nov. 2025.

COSTA, E. R. O., S. MAEDA, e H. D. da SILVA. **Alterações Químicas Do Solo Após Aplicação De Resíduos De Efluentes De Fábrica De Papel Reciclado**. 2011.

DÜRING, R. A.; KAPPELER, B.; FERNANDEZ, J. M. **Organic fertilization and its influence on soil properties and crop yields**. European Journal of Agronomy, v. 19, n. 2, p. 113–125, 2003.

EMMANOUIL, K.; PETROU, P.; KOUTSOU, A. **Environmental assessment of biosolid use in agriculture: opportunities and risks**. Journal of Environmental Management, v. 321, p. 116–132, 2024.

HAYNES, R. J. **Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: a review**. Soil Use and Management, v. 21, n. 1, p. 1–11, 2005.

KABATA-PENDIAS, A. **Trace elements in soils and plants**. CRC Press. 2011.

KOPITTKKE, P. M.; BLAMEY, F. P. **Kinetics and nature of aluminium rhizotoxic effects: a review.** Journal of Experimental Botany, v. 67, n. 15, pp. 4451–4469, 2016.

LEITÃO, N. C. **Economia circular:** conceitos, práticas e desafios para a sustentabilidade. São Paulo: Atlas, 2015.

MALAVOLTA, Euripedes. **Manual de calagem e adubação das principais culturas.** Piracicaba: ESALQ/USP, 1987.

MARCÍANO, R.; CUNHA, M.; ALMEIDA, V. **Efeitos de bio sólidos em Latossolos:** propriedades físicas e químicas. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 25, n. 4, p. 835–844, 2001.

MELLO CUNHA, G. O.; ALMEIDA, J. A.; TESTONI, S. A.; BARBOZA, B. B. **Forms of Aluminum in Brazilian Acid Soils with Exceptionally High Levels of KCl-extractable Al^{3+} .** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 39, n. 5, p. 1362–1377, 2015.

MELO, G. W. B.; MARQUES, J. R. **Fertilidade do solo e adubação orgânica em solos tropicais.** Viçosa: UFV, 2000.

MELO, G. W. B.; SANTOS, L. A.; OLIVEIRA, A. **Bio sólidos e fertilidade do solo: considerações técnicas.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 28, n. 6, p. 1031–1042, 2004.

MENZIES, N. W.; et al. **Chemical species and aluminum concentration in the solution of acid soils cultivated with soybean and corn under liming.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, 2016.

PEREIRA, R. L.; SILVA, T. A.; SOUZA, F. **Bio sólidos na agricultura:** eficiência, segurança e sustentabilidade. Revista Agroambiental, v. 17, n. 1, p. 45–60, 2023.

RAMOS FT, DORES EFC, WEBER OLDS, BEBER DC, CAMPELO JH JR, MAIA JCS. **Soil organic matter doubles the cation exchange capacity of tropical soil under no-till farming in Brazil.** J Sci Food Agric. 2018 Jul;98(9):3595-3602. doi: 10.1002/jsfa.8881. Epub 2018 Feb 23. PMID: 29315629.

REIS, T. C.; RODELLA, A. A. **Cinética de degradação da matéria orgânica e variação do pH do solo sob diferentes temperaturas.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, 2002. Disponível em: <https://www.rbcjournal.org/pt-br/article/cinetica-de-degradacao-da-materia-organica-e-variacao-do-ph-do-solo-sob-diferentes-temperaturas/>. Acesso em: 13 out. 2025.

RIBEIRO, M. E., SANTOS, A. E. C. S., SILVA, L. DE A. C., ALMEIDA, G. H. S., MARQUES, G. M., ; COUTO, E. DE A. DO. **Aplicação de bio sólido de ETE na produção de girassol como recuperação sustentável de recursos.** Revista Em Agronegócio E Meio Ambiente, 17, e12922. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2024v17n.Especial.e12922>. Acesso em: 10 ago. 2025.

- RICCI, A. B.; PADOVANI, V. C. R.; PAULA JÚNIOR, D. R. ***Use of stabilized sewage sludge on a humusless soil. II – chemical properties and revegetation.*** *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2010. Disponível em: <https://www.rbcjournal.org/article/use-of-stabilized-sewage-sludge-on-a-humusless-soil-ii-chemical-properties-and-revegetation/>.13 out. 2025
- RIGO, E.; FERNANDES, S.; SILVA, M. **Destinação de biossólidos:** desafios para aterros sanitários e alternativas de reaproveitamento. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 19, n. 2, p. 123–130, 2014.
- SANTOS, L. A.; MELO, G. W. B.; CAMARGO, F. A. O. **Aplicação de biossólidos e efeitos sobre a fertilidade do solo.** *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 27, n. 5, p. 853–862, 2003.
- SHI, B; WANG, S; JIAO, J; LI, G; YIN, C. ***Recognition on characteristics and applicability of typical modes for manure ; sewage management in pig farming: a case study in Hebei, China.*** *Waste Management*, v. 148, p. 83-97, jul. 2022. DOI: 10.1016/j.wasman.2022.05.018
- SILVA FILHO, José Cleto da; LIMA, Pedro Martins. **Dinâmica de nutrientes e sustentabilidade em solos tratados com biossólidos.** Lavras: UFLA, 2020.
- TRANNIN, I C B; SIQUEIRA, J O; MOREIRA, F M S. **Características químicas e microbiológicas de solos tratados com biossólidos.** *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, n. 5, p. 2253–2262, 2008.
- VIOLANTE, A.; *et al.* ***Forms of aluminium in soils; comportamento em função do pH e implicações para toxicidad.*** *Biology and Fertility of Soils*, 2018.

CAPÍTULO 4. PRODUTO TÉCNICO - TECNOLÓGICO

FICHA TÉCNICA PARA A PRODUÇÃO TÉCNICA E TECNOLÓGICA

2026. MESTRADO PROFISSIONAL EM SUSTENTABILIDADE E TECNOLOGIA AMBIENTAL (MPSTA) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG)

Não há direitos reservados. A reprodução está autorizada, no todo ou em parte, desde que a obra original seja devidamente referenciada.

GESTORES DO IFMG:

IFMG/BAMBUÍ – Fazenda Varginha – Rodovia Bambuí/Medeiros – Km 05
Caixa Postal 05 – Bambuí – MG - 38900-000 - www.bambui.ifmg.edu.br

REITOR DO IFMG – Prof. Dr. Rafael Bastos Teixeira

PRÓ-REITORA DE INOVAÇÃO, PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO - Prof. Dra. Gislayne Elisana Gonçalves

DIRETOR GERAL DO IFMG/BAMBUÍ - Prof. Dr. Humberto Garcia de Carvalho

DIRETOR DE INOVAÇÃO, PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO DO IFMG/BAMBUÍ – Prof. Dr. Gustavo Augusto Soares

COORDENADORA DO MPSTA/IFMG BAMBUÍ – Prof. Dra. Ana Cardoso Clemente Ferreira Filha de Paula

AUTORES

Débora Durães Almeida
Hygor Aristides Victor Rossoni
Marihus Altoé Baldotto

Catálogo na Fonte Biblioteca IFMG - Campus Bambuí

A447u Almeida, Débora Durães.

Uso sustentável de biofertilizantes como fertilizante em latossolo vermelho-amarelo distrófico: avaliação de doses e efeitos na matéria orgânica e fertilidade do solo ao longo de um ano. / Débora Durães Almeida, Hygor Aristides Victor Rossoni, Marihus Altoé Baldotto. – Bambuí, 2026.

45 p. : il. ; color.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Bambuí, MG, Curso Mestrado Profissional em Sustentabilidade e Tecnologia Ambiental, 2026.

1. Produto técnico. 2 Biofertilizante. 3. Sustentabilidade. I. Rossoni, Hygor Aristides Victor. II. Baldotto, Marihus Altoé. III. Título.

CDD 363.728

Elaborada por Douglas Bernardes de Castro- CRB-6/2802

SUMÁRIO

RESUMO EXECUTIVO	155
1. APRESENTAÇÃO	156
2. DESENVOLVIMENTO	158
2.1. Experimento I – Avaliação da qualidade do solo após aplicação de biossólidos	158
2.2. Experimento II – Avaliação do desenvolvimento inicial do milho.....	159
2.3. Análises estatísticas.....	159
3. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	160
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	163
5. REFERÊNCIAS.....	164

USO SUSTENTÁVEL DE BIOSSÓLIDOS COMO FERTILIZANTE EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO: Avaliação de doses e efeitos na matéria orgânica e fertilidade do solo ao longo de um ano

Este produto está vinculado a Dissertação de Mestrado - "Potencial de Aplicação no Solo Aproveitamento Agrícola de Biossólidos de Esgoto Sanitário". A proposta central insere-se na busca por soluções sustentáveis para a destinação do lodo de esgoto, como biossólidos e seu uso benéfico na agricultura como fonte de nutrientes e matéria orgânica, desviando-o dos aterros sanitários e mitigando os impactos ambientais associados à sua disposição inadequada.

CARACTERIZAÇÃO DO PRODUTO

A necessidade de uma destinação ambientalmente segura torna-se ainda mais evidente diante dos riscos potenciais. Quando não é submetido a um tratamento adequado, que garanta sua estabilização e higienização, o lodo pode se tornar uma fonte significativa de contaminação. O biossólido utilizado como objeto deste estudo é proveniente do município de Nova Serrana (MG). O contexto local reforça a relevância da pesquisa: de acordo com dados do Instituto Água e Saneamento, o município gera, anualmente, cerca de 4.532.020 m³ de esgoto. Deste total, aproximadamente 72,7% são coletados e 71,3% passam por algum nível de tratamento, o que significa que expressivos 1.237.000 m³ de esgoto ainda são despejados no ambiente sem qualquer tratamento prévio. Para se ter uma dimensão da geração de lodo, considera-se a média nacional de 17,5 kg de lodo seco por habitante ao ano. Aplicando esse parâmetro à população estimada de Nova Serrana, que é de aproximadamente 105.000 habitantes, chega-se a um potencial de geração de cerca de 1.837.500 kg de lodo seco anualmente, o equivalente a mais de 1.800 toneladas. Essa quantidade expressiva de resíduo, se não for adequadamente gerenciado e transformado em um insumo seguro, representa um desafio ambiental e sanitário de monta para o Município.

PÚBLICO-ALVO

Técnicos agrícolas e extensionistas, engenheiros agrônomos, profissionais de saneamento ambiental, gestores de resíduos sólidos, instituições públicas (como secretarias de meio ambiente e agricultura), produtores rurais e pesquisadores.

FORMATO DE APRESENTAÇÃO

O presente trabalho foi desenvolvido no formato de um artigo técnico-científico,

estruturado com os elementos clássicos de uma publicação acadêmica: apresentação, desenvolvimento, apresentação e análise dos resultados, discussão, considerações e recomendações finais. O objetivo é que o material tenha qualidade e rigor metodológico suficientes para ser submetido à avaliação e potencial publicação em uma revista técnica especializada.

APLICAÇÃO

Do ponto de vista da aplicação prática, este estudo visa gerar um impacto concreto e relevante. Seus resultados e conclusões servirão como alicerce fundamental para a formulação de diretrizes técnicas mais seguras e eficazes, bem como para a proposição de políticas públicas robustas que incentivem e regulamentem o reaproveitamento agrícola de biossólidos. Dessa forma, o artigo se constituirá como uma ferramenta de suporte essencial para a tomada de decisão por parte de gestores e órgãos ambientais, além de orientar e padronizar as práticas seguras a serem adotadas pelos profissionais no campo.

RESULTADOS ESPERADOS

A adoção dos parâmetros e recomendações originados por esta pesquisa produzirá um conjunto de resultados estratégicos de alto impacto. O primeiro deles é a validação técnica do uso de biossólidos como insumo fertilizante, comprovando sua eficácia agrônômica e estabelecendo bases científicas sólidas para sua aplicação. Consequentemente, espera-se uma significativa redução da rejeição técnica e institucional historicamente associada ao seu aproveitamento, substituindo percepções subjetivas por evidências concretas.

Além disso, ao consolidar uma destinação ambientalmente adequada para um resíduo do saneamento, o trabalho atua como um potente estímulo à economia circular no setor, transformando um passivo ambiental em um ativo agrícola valioso e fechando o ciclo de nutrientes. Por fim, o fornecimento de dados robustos e específicos sobre doses seguras e eficientes de aplicação será crucial para garantir tanto a produtividade agrícola quanto a proteção da saúde humana e ambiental, oferecendo aos técnicos e produtores a segurança necessária para a adoção da prática em larga escala.

RESUMO EXECUTIVO

Este relatório técnico consolida o planejamento e a fundamentação teórica e metodológica da pesquisa de mestrado que investiga o uso de bioossólidos como condicionante de solos na classe Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico. O Produto Técnico-Tecnológico (PTT) possui caráter instrucional e técnico, com o intuito de promover a divulgação sistematizada de informações científicas e operacionais acerca do uso agrônomo de bioossólidos provenientes de esgoto sanitário. O estudo foi estruturado a partir de dois experimentos independentes, conduzidos sob delineamento experimental controlado, com o objetivo de avaliar os efeitos agrônômicos e ambientais da aplicação desse resíduo urbano em sistemas agrícolas. No primeiro experimento, foram avaliadas as doses de 10, 20, 40, 80, 120 e 160 Mg ha⁻¹, além de um tratamento controle sem aplicação de bioossólidos, visando à análise dos impactos sobre os atributos químicos e de fertilidade do solo, com o objetivo de analisar a resposta do sistema solo às diferentes doses, considerando indicadores físicos, químicos e biológicos, bem como os potenciais riscos ambientais associados ao uso agrícola do bioossólido. O segundo experimento utilizou as mesmas doses e tratamento controle, combinadas à condição com e sem correção da fertilidade do solo, a fim de avaliar o desenvolvimento inicial do milho, por meio de variáveis morfológicas e de produção de biomassa, visando avaliar a dose-resposta do milho em função da aplicação das doses de bioossólidos. No primeiro experimento, os resultados indicaram que as doses intermediárias, especialmente 40 e 80, promoveram melhorias significativas nos atributos do solo, com incremento da matéria orgânica, maior disponibilidade de nutrientes e estímulo à atividade biológica, sem ultrapassar os limites estabelecidos pela legislação ambiental vigente. As doses mais elevadas (120 e 160) apresentaram aumento no aporte nutricional, porém com menor eficiência marginal e maior necessidade de controle quanto ao acúmulo de elementos potencialmente tóxicos. No segundo experimento, observou-se resposta positiva mais pronunciada nas doses de 80 e 120, sugerindo influência das condições edafoclimáticas e do histórico de manejo do solo na capacidade de assimilação do bioossólido. Contudo, a dose 160 evidenciou tendência à estabilização ou redução dos benefícios agrônômicos, indicando possível saturação do sistema e maior risco ambiental em aplicações recorrentes. De forma integrada, os resultados demonstraram que a aplicação agrícola de bioossólidos é tecnicamente viável e ambientalmente segura quando realizada em doses entre 40 e 80, podendo atingir 120 em situações específicas, desde que acompanhada por monitoramento contínuo. A dose 160 não é recomendada para uso regular, devendo restringir-se a condições experimentais. As conclusões estão em consonância com as diretrizes técnicas e normativas nacionais e internacionais para o uso agrícola de bioossólidos.

Palavras-chave: Bioossólido. Sustentabilidade. Efeito dose-resposta.

1. APRESENTAÇÃO

O uso agrícola de biossólidos representa uma alternativa viável para reduzir a dependência de fertilizantes sintéticos. Sua aplicação pode contribuir para a recuperação de solos degradados e para o aumento da produtividade agrícola, especialmente em regiões com limitações hídricas (Nicholson *et al.*, 2018; Desjardins *et al.*, 2025). Os biossólidos são definidos como resíduos provenientes do tratamento de esgoto sanitário que passaram por processos adicionais de estabilização, higienização e controle de contaminantes, tornando-se aptos para aplicação no solo de forma ambientalmente segura (EPA, 1994; Sullivan *et al.*, 2023). Diferenciam-se do lodo bruto por atenderem a critérios específicos de qualidade microbiológica e de concentração de metais pesados, o que possibilita seu uso benéfico na agricultura.

Esses materiais apresentam elevada concentração de matéria orgânica, geralmente entre 60% e 80% em base seca, além de macro e micronutrientes essenciais às plantas, como nitrogênio, fósforo, cálcio, magnésio e enxofre (Cogger *et al.*, 2013a; Pan *et al.*, 2017). Dessa forma, os biossólidos configuram-se como insumos orgânicos com potencial fertilizante e condicionador de solo.

No Brasil, a classificação e o uso agrícola de biossólidos são regulamentados principalmente pelas Resoluções CONAMA n.º 375/2006 (Brasil, 2006) e n.º 498/2020 (Brasil, 2020), que estabelecem critérios para enquadramento, monitoramento e aplicação desses resíduos. Os biossólidos Classe II são aqueles que atendem aos limites máximos permitidos de metais pesados, porém apresentam restrições quanto ao uso, exigindo controle mais rigoroso da dose, do manejo e do tipo de cultura agrícola (Brasil, 2006). As atualizações normativas e diretrizes complementares reforçam a necessidade de avaliação contínua da qualidade do biossólido, da adequação das doses aplicadas e das características locais do solo e clima, consolidando o uso agrícola como alternativa ambientalmente responsável quando realizada de forma tecnicamente orientada.

O uso agrícola de biossólidos tem sido estudado em diferentes contextos edafoclimáticos, com resultados consistentes quanto à melhoria das propriedades químicas, físicas e biológicas do solo. Alguns estudos demonstraram incrementos significativos nos estoques de carbono orgânico, nitrogênio total e fósforo disponível, além do estímulo à atividade microbiana e ao crescimento radicular das plantas (Cogger *et al.*, 2013b; Desjardins *et al.*, 2025). Outros estudos em sistemas agrícolas de sequeiro indicam que a aplicação contínua de biossólidos contribui para o aumento da capacidade de retenção de água, redução da

densidade aparente e melhoria da estabilidade de agregados, fatores essenciais para a sustentabilidade produtiva em ambientes com restrição hídrica (Brown *et al.*, 2011; Tsadilas *et al.*, 2005). Além disso, a substituição parcial de fertilizantes minerais por biossólidos reduz custos de produção e impactos ambientais associados à fabricação de insumos sintéticos (Brown *et al.*, 2010).

O elevado teor de matéria orgânica estável presente nos biossólidos confere a esses resíduos grande potencial como condicionadores de solo. Estudos de longa duração evidenciam aumentos expressivos nos teores de matéria orgânica do solo, melhoria da estrutura física, maior capacidade de retenção hídrica e estímulo à biota edáfica, incluindo microrganismos e macrofauna, como minhocas (Nicholson *et al.*, 2018; Yucel *et al.*, 2015). Esses efeitos são particularmente relevantes em solos tropicais intemperizados, nos quais a manutenção da estrutura e da umidade do solo é determinante para a produtividade agrícola e a sustentabilidade dos agroecossistemas (Blanco-Canqui *et al.*, 2013; Bagnall *et al.*, 2022).

Embora os biossólidos Classe II apresentem reconhecido potencial agrônomo e ambiental, ainda persistem lacunas quanto à definição de doses agronomicamente seguras e eficientes, especialmente em relação aos seus efeitos sobre as propriedades químicas e físicas do solo e o desenvolvimento inicial das culturas em condições tropicais. Dessa forma, o objetivo deste relatório foi avaliar os efeitos da aplicação de biossólidos Classe II provenientes da Estação de Tratamento de Esgoto de Nova Serrana–MG sobre as propriedades químicas e físicas de um Latossolo Vermelho-Amarelo e sobre o desenvolvimento inicial da cultura do milho, considerando diferentes doses de aplicação e períodos de incubação do resíduo no solo.

A utilização de biossólidos na agricultura insere-se diretamente nos princípios da economia circular, ao promover o reaproveitamento de resíduos urbanos oriundos de estações de tratamento de esgoto como insumos agrícolas, reduzindo a destinação final em aterros sanitários e minimizando passivos ambientais. Essa prática contribui para o fechamento de ciclos de nutrientes, especialmente de nitrogênio, fósforo e carbono, diminuindo a dependência de fertilizantes minerais de origem não renovável e energeticamente intensivos. Além dos benefícios agrônômicos, o uso agrícola de biossólidos favorece a valorização de resíduos, a eficiência no uso de recursos naturais e a sustentabilidade dos sistemas produtivos, alinhando-se às diretrizes de gestão integrada de resíduos sólidos e às políticas de desenvolvimento sustentável no contexto urbano-rural.

O relatório técnico justifica-se pela necessidade de subsidiar tecnicamente o uso agrícola de biossólidos no Brasil, contribuindo para a gestão sustentável de resíduos, a melhoria da qualidade dos solos e a redução da dependência de fertilizantes minerais.

2. DESENVOLVIMENTO

O estudo foi desenvolvido em duas etapas complementares, sendo a primeira voltada à avaliação dos efeitos do biossólido na fertilidade do solo, e a segunda, direcionada à análise do desenvolvimento inicial da cultura do milho (*Zea mays* L.), cultivar BM 3063 PRO 3® (Bio Matrix).

2.1. Experimento I – Avaliação da qualidade do solo após aplicação de biossólidos

O biossólido utilizado é proveniente da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) do município de Nova Serrana–MG, localizado na região Centro-Oeste de Minas Gerais. O material foi coletado conforme a ABNT NBR 10007:2004 e classificado como Resíduo Não Perigoso – Classe II A – Não Inerte, de acordo com a ABNT NBR 10004:2004, atendendo aos critérios da Resolução CONAMA n.º 498/2020 para uso agrícola. O biossólido passou por processo de digestão anaeróbia e desaguamento em leitos de secagem pavimentados até atingir teor mínimo de 60% de sólidos.

O solo utilizado foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, previamente caracterizado quanto aos atributos físicos e químicos. Para padronização experimental, determinaram-se a densidade do solo, a capacidade de campo e os teores de sólidos totais, sólidos voláteis e umidade do biossólido, sendo as doses calculadas em base seca.

O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados, com sete tratamentos e quatro repetições, totalizando 28 unidades experimentais. As doses de biossólido aplicadas corresponderam a 0, 10, 20, 40, 80, 100 e 160 t ha⁻¹, ajustadas à escala de vasos contendo 5 litros de solo. O biossólido foi incorporado ao solo por homogeneização mecânica, e a umidade foi mantida próxima à capacidade de campo durante todo o período experimental.

A condução da etapa ocorreu por 12 meses, com coletas mensais. Foram realizadas análises químicas e físicas do solo para determinação de pH, nitrogênio total, fósforo e potássio disponíveis, cálcio, magnésio e alumínio trocáveis, acidez potencial ($H^+ + Al^{3+}$), matéria orgânica, carbono orgânico, capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por bases, saturação por alumínio e capacidade de retenção de água, seguindo metodologias padronizadas pela Embrapa (1997).

2.2. Experimento II – Avaliação do desenvolvimento inicial do milho

A segunda etapa foi conduzida em casa de vegetação da Universidade Federal de Viçosa (UFV) – *Campus Florestal*, sob condições controladas de temperatura, luminosidade e irrigação. Utilizou-se a cultura do milho (*Zea mays* L.), cultivar BM 3063 PRO 3®.

O delineamento experimental adotado foi o de blocos casualizados, com 14 tratamentos e quatro repetições, totalizando 56 unidades experimentais. Os tratamentos foram organizados em dois grupos: um sem correção de pH e fertilidade (NPK) e outro com correção química do solo, conforme recomendação agrônômica ajustada ao volume dos vasos (1 L). O bio sólido foi incorporado ao solo antes da semeadura, a qual foi efetuada imediatamente após a incorporação. Foram utilizadas cinco sementes por vaso, com posterior desbaste para manutenção de duas plantas por unidade experimental. A irrigação foi realizada diariamente, mantendo o solo próximo à capacidade de campo.

O experimento foi finalizado aos 24 dias após a semeadura, em razão da observação de efeitos fitotóxicos nas maiores doses, visando preservar a representatividade do desenvolvimento inicial das plantas. As avaliações biométricas incluíram diâmetro do caule, medido com paquímetro digital na região do colo; altura das plantas, determinada com régua milimetrada; número de folhas, obtido por contagem direta de folhas completamente expandidas; massas fresca e seca da parte aérea e das raízes, determinadas por pesagem direta após colheita e secagem em estufa a 65 °C até massa constante.

A análise nutricional do tecido vegetal foi realizada a partir do material seco e moído, submetido à digestão química para determinação de macro e micronutrientes, conforme metodologias laboratoriais padronizadas.

2.3. Análises estatísticas

Os dados foram submetidos aos testes de Shapiro–Wilk (normalidade) e Levene (homogeneidade de variâncias), os quais indicaram ausência de normalidade, caracterizando os dados como não paramétricos. Dessa forma, não foi aplicada análise de variância (ANOVA). As relações entre as doses de bio sólido e as variáveis avaliadas foram analisadas por meio de modelos de regressão quadrática, permitindo a avaliação da resposta dose–efeito e a estimativa de faixas de máxima eficiência técnica. As análises estatísticas e a elaboração dos gráficos foram realizadas no *software* R. Para o segundo experimento, empregou-se, ainda, uma correlação de Pearson, para melhor interpretação dos dados.

3. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados do Experimento 1 demonstraram que a aplicação de biossólidos promoveu alterações significativas e consistentes na dinâmica da matéria orgânica (MO), do carbono orgânico (CO) e nos atributos químicos do Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, confirmando seu potencial como condicionador de solo. A MO e CO apresentaram tendências convergentes, porém a magnitude e a estabilidade das respostas diferiram, pois a MO exibiu variabilidade temporal, refletindo a rápida decomposição das frações lábeis adicionadas pelo biossólido, enquanto o CO apresentou comportamento mais amortecido, associado à incorporação gradual de carbono em frações mais estáveis.

Nas coletas mais recentes (8 a 13), consideradas mais representativas das condições atuais do sistema, verificou-se que aproximadamente metade da matéria orgânica adicionada foi estabilizada como carbono orgânico, com valores médios entre 3 e 4 dag kg⁻¹ de CO, o que demonstra eficiência do biossólido na promoção do sequestro de carbono no solo. Esse padrão é coerente com a literatura, que associa o incremento de carbono orgânico ao aumento da capacidade de troca catiônica, melhoria da estrutura física, maior retenção de água e estímulo à atividade biológica do solo (Bittencourt *et al.*, 2017).

A modelagem indicou doses estatísticas ótimas entre 100 e 150 t ha⁻¹ para maximização de MO e CO; contudo, doses elevadas apresentaram maior instabilidade estatística e coeficientes de variação mais altos. Assim, a análise integrada dos indicadores agrônômicos, estatísticos e operacionais apontou as doses intermediárias, especialmente em torno de 80 t ha⁻¹, como mais adequadas, por promoverem incrementos consistentes de MO e CO com maior estabilidade ao longo do tempo. A recomendação prática média de 121 t ha⁻¹, derivada das coletas mais recentes, reforça a importância de considerar o histórico temporal do solo, uma vez que amostras recentes refletem com maior precisão os processos de mineralização, estabilização do carbono e fertilidade efetiva.

Do ponto de vista químico, a aplicação de biossólidos desencadeou uma dinâmica temporal marcada por três fases: (i) fase inicial de elevação da fertilidade, caracterizada por fortes correlações positivas entre pH e nutrientes essenciais (Ca, Mg, K e P) e correlação negativa com Al³⁺, evidenciando efeito corretivo semelhante ao da calagem; (ii) fase intermediária de instabilidade, associada à mineralização intensa da matéria orgânica e liberação de ácidos orgânicos, resultando em queda de pH e aumento temporário da solubilidade do alumínio; e (iii) fase final de estabilização, na qual o sistema atinge novo

equilíbrio químico, com correlações mais fracas entre pH e nutrientes, mas elevada correlação entre os próprios nutrientes, indicando resposta coordenada aos efeitos residuais do biossólido.

Os resultados do Experimento 2 evidenciam resposta clara do milho às doses de biossólidos, com destaque para os tratamentos intermediários, especialmente T8 (0 t ha⁻¹ com correção), T10 (20 t ha⁻¹ com correção) e T11 (40 t ha⁻¹ com correção), que apresentaram desempenho agrônômico superior. Esses tratamentos promoveram maiores valores de altura de plantas (AP), diâmetro do caule (DC) e área média foliar (AMF), indicando que tais doses, associadas à correção do solo, proporcionaram condições nutricionais e estruturais adequadas ao crescimento inicial.

A elevada correlação monotônica entre AP e AMF ($\rho = 0,953$) confirma que plantas melhor posicionadas em altura tendem também a apresentar maior área foliar, potencializando a interceptação luminosa e a eficiência fotossintética, o que se refletiu no maior acúmulo de biomassa. Além disso, a forte associação entre AP e massa seca da parte aérea (MSPA) ($\rho = 0,930$) reforça que o crescimento longitudinal está intimamente relacionado ao acúmulo de matéria estrutural.

O vigor estrutural das plantas também se mostrou fortemente associado ao acúmulo de biomassa aérea. A correlação entre DC e MSPA foi elevada ($\rho = 0,909$), evidenciando que o diâmetro do caule constitui um indicador morfológico robusto do desempenho produtivo inicial. De forma semelhante, a associação entre massa fresca da parte aérea (MFPA) e MSPA foi muito forte ($\rho = 0,883$), indicando elevada concordância entre os rankings dessas variáveis. Esse valor, embora inferior ao anteriormente citado, confirma que diferenças na biomassa fresca refletem, predominantemente, diferenças reais de crescimento estrutural, e não apenas variações no teor hídrico dos tecidos.

A alocação de biomassa entre raiz e parte aérea, expressa pela razão MSR/MSPA, contribuiu de maneira relevante para a interpretação dos resultados. Essa razão apresentou correlação negativa moderada com AP ($\rho = -0,433$), DC ($\rho = -0,380$) e MSPA ($\rho = -0,398$), indicando que plantas com maior desempenho vegetativo tendem a apresentar menor proporção relativa de biomassa radicular. Tratamentos de alto desempenho, como T8 e T10, apresentaram razões baixas (1,55 e 1,48, respectivamente), sugerindo alocação preferencial de recursos para a parte aérea sob condições nutricionais favoráveis. Em contraste, tratamentos submetidos a doses elevadas de biossólidos, sem correção de fertilidade (T5 = 80 t ha⁻¹, T6 = 100 t ha⁻¹ e T7 = 160 t ha⁻¹), exibiram razões elevadas (até 8,36), associadas a menor crescimento aéreo. Esse padrão é compatível com maior investimento proporcional no sistema radicular em resposta a possíveis desequilíbrios químicos ou estresses edáficos.

A massa seca radicular (MSR), por sua vez, apresentou correlações baixas com as variáveis da parte aérea (ρ variando de 0,125 a 0,188), indicando relativa independência entre crescimento radicular absoluto e crescimento aéreo. Já a massa fresca radicular (MFR) revelou correlações moderadas com as variáveis aéreas (ρ entre 0,408 e 0,478), sugerindo associação menos intensa quando comparada ao bloco altamente integrado da parte aérea.

De forma integrada, os resultados do Experimento 2 demonstraram que o crescimento inicial do milho é um processo altamente coordenado, no qual atributos morfológicos simples, como altura e diâmetro do caule, refletem com consistência o desempenho fisiológico e produtivo das plantas. Agronomicamente, os dados indicam que o manejo adequado de biossólidos, associado à correção da fertilidade do solo, permite maximizar os benefícios do insumo orgânico, reduzindo a dependência de fertilizantes minerais e aumentando a eficiência do sistema produtivo.

A aplicação gradual das doses de biossólido (0, 10, 20, 40, 80, 100 e 160 t ha⁻¹) evidenciou resposta positiva das variáveis até níveis intermediários, especialmente na faixa de 20 a 40 t ha⁻¹ sob solo corrigido, em que foram observadas melhorias consistentes nos indicadores de crescimento e biomassa, sem indícios de limitação estrutural. Doses superiores a 80 t ha⁻¹, particularmente 100 e 160 t ha⁻¹, exigem maior cautela, pois, embora aumentem o aporte nutricional, podem estar associadas à redução relativa do desempenho vegetativo e maior investimento radicular proporcional.

Os resultados indicam que as doses mais eficientes, sob as condições experimentais avaliadas, situam-se entre 20 e 40 t ha⁻¹, especialmente quando associadas à correção de pH e adubação mineral. Doses de 80 t ha⁻¹ podem apresentar desempenho intermediário, enquanto 100 e 160 t ha⁻¹ não se mostraram ideais como prática regular. Essa interpretação está alinhada às recomendações técnicas e às normativas ambientais que orientam o uso agrícola de biossólidos com base no equilíbrio entre produtividade, sustentabilidade e segurança ambiental.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos ao longo dos dois experimentos evidenciaram que o uso agrícola de biossólidos constitui uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente segura para a melhoria da fertilidade de Latossolos Vermelho-Amarelos, desde que respeitados critérios técnicos, doses adequadas e a legislação vigente. A aplicação controlada do biossólido promoveu incrementos nos teores de matéria orgânica e nutrientes essenciais, refletindo positivamente nos indicadores de crescimento vegetal e na qualidade química do solo, sem ultrapassar os limites estabelecidos para elementos potencialmente tóxicos.

Com base na integração dos resultados dos dois experimentos, a dose ideal de biossólido situa-se na faixa intermediária, entre 80 e 120 Mg ha⁻¹, com melhor desempenho agrônômico consistente em torno de 80–100 Mg ha⁻¹. Esses achados reforçam a importância do monitoramento contínuo e da adoção de manejos baseados em evidências científicas para a recomendação do uso de biossólidos em diferentes condições edafoclimáticas.

Este estudo contribuiu de forma significativa para a consolidação do biossólido como insumo agrícola estratégico, fortalecendo práticas alinhadas à economia circular e à agricultura sustentável. As informações geradas oferecem subsídios técnicos para tomada de decisão por produtores, gestores públicos e órgãos reguladores, além de abrir perspectivas para estudos futuros voltados à avaliação de efeitos de longo prazo, ampliação para outras classes de solo e integração com sistemas produtivos regionais.

5. REFERÊNCIAS

BAGNALL, D.K., MORGAN, C.L., BEAN, G.M., LIPTZIN, D., CAPPELLAZZI, S.B., COPE, M., HONEYCUTT, C.W. **Selecting soil hydraulic properties as indicators of soil health: measurement response to management and site characteristics**. Soil Sci. Soc. Am. J. 86 (5), 1206–1226. 2022a. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/saj2.20428>. Acesso em: 13 out. 2025

BLANCO-CANQUI, H., HOLMAN, J.D., SCHLEGEL, A.J., TATARKO, J., SHAVER,

T.M. **Replacing fallow with cover crops in a semiarid soil: effects on soil properties**. Soil Sci. Soc. Am. J. 77 (3), 1026–1034. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj2013.01.0006>. Acesso em: 13 out. 2025

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006**. Define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 30 ago. 2006.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020**. Dispõe sobre critérios e procedimentos para a aplicação de biossólidos em solos, revoga dispositivos da Resolução CONAMA nº 375/2006 e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 20 ago. 2020.

BROWN, S., BEECHER, N., CARPENTER, A. **Calculator tool for determining greenhouse gas emissions for biosolids processing and end use**. Environ. Sci. Technol. 44 (24), 9509–9515. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/es101210k>. Acesso em: 13 out. 2025

BROWN, S., KURTZ, K., BARY, A., COGGER, C. **Quantifying benefits associated with land application of organic residuals in Washington state**. Environ. Sci. Technol. 45 (17), 7451–7458., 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/es2010418>. Acesso em: 13 out. 2025

COGGER, C.G., BARY, A.I., KENNEDY, A.C., FORTUNA, A.-M. **Long-term crop and soil response to biosolids applications in dryland wheat**. J. Environ. Qual. 42 (6), 1872–1880. 2013a. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/jeq2013.05.0109>. Acesso em: 13 out. 2025

COGGER, C.G., BARY, A.I., MYHRE, E.A., FORTUNA, A.-M. **Biosolids applications to tall fescue have long-term influence on soil nitrogen, carbon, and phosphorus**. J. Environ. Qual. 42 (2), 516–522. 2013b. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/jeq2012.0269>. Acesso em: 13 out. 2025

DESJARDINS, M; IPPOLITO, J A.; BARY, A I.; CAPPELLAZZI, S B.; LIPTZIN, D; GRIFFIN-LAHUE, D. **Long-term biosolids applications improve key soil health functions for semi-arid dryland systems**. Science of the Total Environment, v. 997, p. 180130, 1 Oct. 2025. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.180130.

EPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **A Plain**

English Guide to the EPA Part 503 Biosolids Rule. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, 1994.

NICHOLSON, F; BHOGAL, A.; TAYLOR, M; MCGRATH, S; WITHERS, P. **Long-term Effects of Biosolids on Soil Quality and Fertility.** Soil Science. 183. 1. 2018. 10.1097/SS.0000000000000239.

PAN, W.L., PORT, L.E., XIAO, Y., BARY, A.I., COGGER, C.G. **Soil carbon and nitrogen fraction accumulation with long-term biosolids applications.** Soil Sci. Soc. Am. J. 81 (6), 1381–1388. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.03.0075>. Acesso em: 13 out. 2025.

SULLIVAN, D.M., et al.. **Fertilizing with biosolids**, PNW 508, 2023.

TSADILAS, C.D., MITSIOS, I.K., GOLIA, E. **Influence of biosolids application on some soil physical properties.** Commun. Soil Sci. Plant Anal. 36 (4–6), 709–716. 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1081/CSS-200043350>. Acesso em: 13 out. 2025.

YUCEL, D., YUCEL, C., AKSAKAL, E.L., BARIK, K., KHOSA, M., AZIZ, I., ISLAM, K.R. **Impacts of biosolids application on soil quality under alternate year no-till corn–soybean rotation.** 2015. Water Air Soil Pollut. 226, 168. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11270-015-2430-6>. Acesso em: 12 out. 2025.

6. RECOMENDAÇÕES

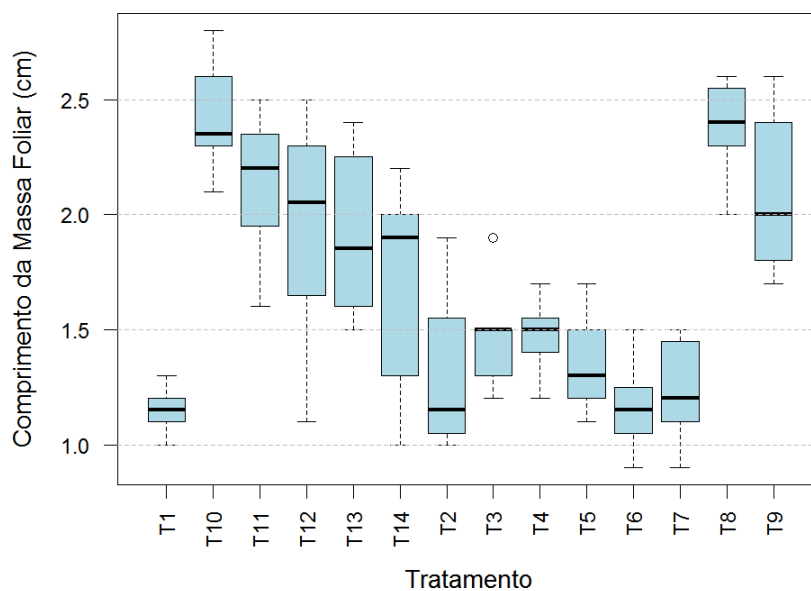
Considerando os resultados obtidos nos experimentos, recomenda-se que estudos futuros avancem em abordagens de médio e longo prazo, com foco na sustentabilidade agrônômica e ambiental do uso de bio sólidos. É fundamental a condução de experimentos de longa duração, avaliando aplicações sucessivas de bio sólidos nas doses de 40, 80 e 120 t ha⁻¹, com monitoramento contínuo dos atributos químicos, físicos e biológicos do solo. Especial atenção deve ser dada ao acúmulo potencial de metais pesados, à dinâmica do nitrogênio (mineralização e perdas por lixiviação) e às alterações na disponibilidade de fósforo, em conformidade com os limites estabelecidos pela CONAMA (Resolução n.º 498/2020).

Outro aspecto relevante consiste na avaliação da eficiência agrônômica comparativa entre bio sólidos e fertilizantes minerais convencionais, tanto de forma isolada quanto em sistemas integrados (adubação organomineral). Estudos envolvendo indicadores microbiológicos, como biomassa microbiana do solo e atividade enzimática, podem fornecer informações adicionais sobre a melhoria da qualidade biológica do solo.

Sugere-se, adicionalmente, a realização de análises econômicas e de viabilidade operacional, considerando custos de transporte, aplicação e monitoramento ambiental, de modo a subsidiar políticas públicas e programas de reciclagem agrícola de resíduos provenientes de estações de tratamento de esgoto. Por fim, recomenda-se o desenvolvimento de protocolos técnicos regionais que integrem critérios agrônômicos e ambientais, contribuindo para o uso seguro e eficiente de bio sólidos na agricultura, fortalecendo a articulação entre o setor de saneamento e a produção agrícola sustentável.

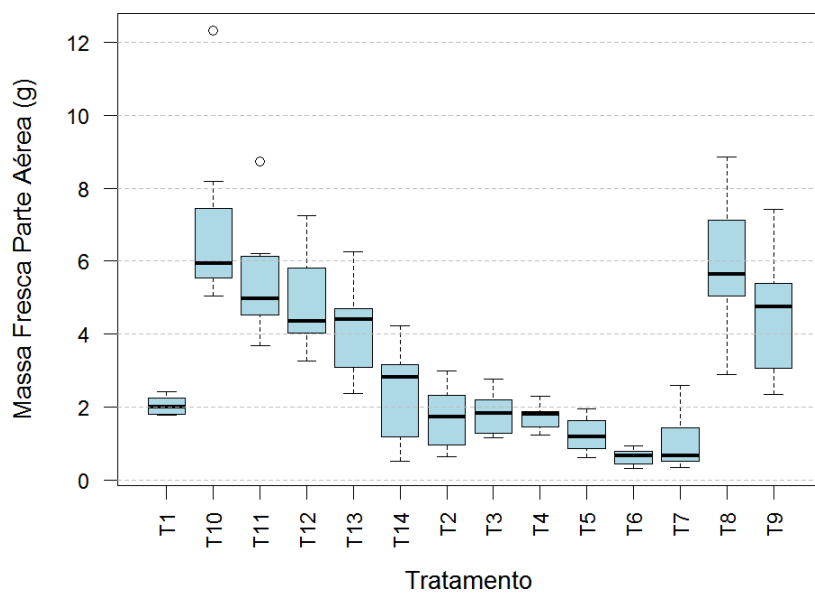
7. APÊNDICE II

Figura 24. LMF em resposta aos tratamentos



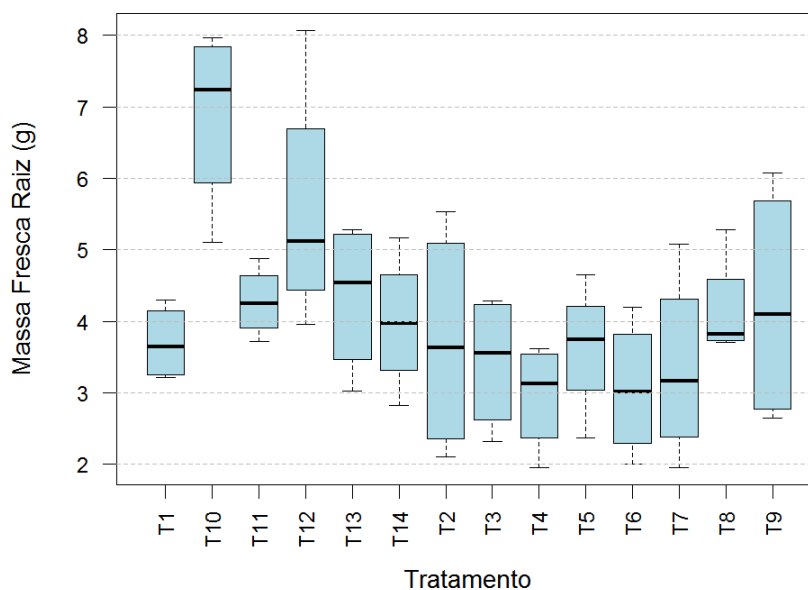
Fonte: A autora (2026).

Figura 25. MFPA em resposta aos tratamentos



Fonte: A autora (2026).

Figura 26. MFR em resposta aos tratamentos



Fonte: A autora (2026).

Tabela 28. Médias dos tratamentos com agrupamento

Tratamento	NF	DC	AP	AMF	LM	MFPA	MSPA	MFPA	MSPR
T1	5.25 b	2.86 bc	40.79 b	31.70 b	1.15 b	2.05 bc	0.26 b	3.70 b	0.97 a
T2	5.00 b	2.66 bc	35.84 bc	29.01 bc	1.30 b	1.72 bc	0.24 b	3.73 b	0.82 a
T3	5.00 b	2.87 bc	39.10 bc	30.94 bc	1.46 b	1.83 bc	0.24 b	3.43 b	0.94 a
T4	5.12 b	2.48 bc	40.16 bc	30.76 bc	1.48 b	1.74 bc	0.23 b	2.95 b	0.91 a
T5	5.12 b	2.46 bc	32.41 bc	26.69 bc	1.35 b	1.25 c	0.19 b	3.62 b	1.05 a
T6	4.62 b	1.71 c	23.85 c	19.39 c	1.16 b	0.64 c	0.12 b	3.06 b	0.91 a
T7	4.75 b	1.78 c	28.31 bc	23.35 bc	1.24 b	1.02 c	0.16 b	3.34 b	0.95 a
T8	6.12 ab	4.42 ab	62.92 a	49.17 a	2.39 a	5.92 ab	0.66 a	4.16 ab	0.99 a
T9	6.12 ab	3.87 ab	52.50 ab	40.90 ab	2.09 ab	4.53 ab	0.49 ab	4.23 ab	0.85 a
T10	6.25 a	4.64 a	58.21 ab	44.04 a	2.42 a	6.90 a	0.72 a	6.89 a	1.01 a
T11	6.00 ab	3.79 ab	58.71 ab	45.77 a	2.14 ab	5.46 ab	0.58 a	4.27 ab	0.93 a
T12	6.00 ab	3.51 ab	54.89 ab	42.49 ab	1.95 ab	4.87 ab	0.52 ab	5.57 ab	1.05 a
T13	5.75 ab	3.31 b	44.36 b	39.48 ab	1.91 ab	4.13 b	0.48 ab	4.34 ab	0.90 a
T14	5.62 ab	2.66 bc	40.01 bc	31.04 bc	1.70 b	2.39 bc	0.30 b	3.98 b	0.84 a

NF: número de folhas; LMF: largura da maior folha; AP: altura da planta; AMF: altura da maior folha; DC: diâmetro do caule; MFPA: massa fresca parte aérea; MFPR: massa fresca parte da raiz; MSPA: massa seca parte aérea; MSPR : massa seca parte raiz.

Fonte: A Autora (2026).

ANEXO I



Relatório de Análises 168173/2024.0.A

Amostra ID: 1028868

Proposta Comercial: PC4240/2024.1



Data de Publicação: 25/09/2024 08:56

Identificação Conta	
Ciente: COMPANHIA DE SANEAMENTO DE MINAS GERAIS COPASA MG	CNPJ/CPF: 17.281.106/0001-03
Contato: Frieda Keifer	Telefone: -
Endereço: Rua Mar da Espanha, N.º 525 - Santo Antônio - Belo Horizonte - Minas Gerais - CEP: 30.330-270 - Brasil	
Nº Amostra: 168173-1/2024.0 - Lote 2 - UNCE - ETE NOVA SERRANA_NOVA SERRANA - NOVA SERRANA - Lodo CENT	
Tipo de Amostra: Resíduo (Massa Bruta)	
Data Coleta: 22/08/2024 13:26	Data Recebimento: 23/08/2024 06:50
Atividade de Coleta: CO10458/2024	Metodologia de Coleta: ABNT NBR 10007:2004 e POP 231
Cor da Amostra: Preto	Estado Físico: Sólido

Resultados Analíticos							
COPASA - Contrato 05.2024/0112 - ABNT NBR 10004/2004 - Massa Bruta							
Análise	Resultado	NBR 10004:2004	LQ	LD	Incerteza	Referência	Data/Horas Análise
Inflamabilidade	Ausência	Ausente A/P	-	-	-	POP 173	27/08/2024 14:21
Corrosividade	Não Corrosivo	Não corrosivo	-	-	-	ABNT NBR 10004 - 2004	28/08/2024 08:46
pH 1:1	5,79 UpH	2,0 à 12,5 UpH	1,00	-	0,12	ABNT NBR 10004 - 2004	28/08/2024 08:41
Reatividade	Não Reativo	Não reativo	-	-	-	ABNT NBR 10004 - 2004	10/09/2024 18:14
Cianeto Livre	< 1 mg/kg	-	1	-	-	EPA SW-846 - 9013 A - 2004; SMEWW, 23ª Edição, 2017, Método 4500CN- E	29/08/2024 16:51
Sulfeto de Hidrogênio	410,3 mg/kg	500 mg/kg	1	0,3	16	POP 061	26/08/2024 14:53
Líquidos Livres	Ausente A/P	-	-	-	-	ABNT NBR 12986 - 1993	27/08/2024 14:24
Teor de Umidade	70,3 %	-	0,1	-	0,07	POP 174	28/08/2024 08:52
Teor Sólidos Secos	29,7 %	-	0,1	-	0,03	POP 174	28/08/2024 08:52
Sulfeto	435,6 mg/kg	-	1	0,3	17	POP 061	26/08/2024 14:52
Cianeto Total	< 1 mg/kg	-	1	0,1197	-	EPA SW-846 - 9013 A - 2004; SMEWW, 23ª Edição, 2017, Método 4500CN- E	29/08/2024 16:54
Cianeto de Hidrogênio	< 1 mg/kg	250 mg/kg	1	-	-	EPA SW-846 - 9013 A - 2004; SMEWW, 23ª Edição, 2017, Método 4500CN- E	30/08/2024 15:26
Arsênio Total	< 0,17 mg/kg	-	0,5	0,17	-	EPA SW-846 - 6010 D - 2018	28/08/2024 00:29
Mercurio Total	< 0,0038 mg/kg	-	0,01	0,0038	-	EPA SW-846 - 6010 D - 2018	28/08/2024 00:29
Cloreto	< 20 mg/kg	-	20	2,67	-	SMEWW, 23ª Edição, Método 4500Cl-, B B	05/09/2024 18:14
Sólidos Totais	29,7 %	-	0,1	0,03	1,3	SMEWW, 23ª Edição, 2017, Método 2540 G	29/08/2024 09:10
Sólidos Voláteis	56,6 %	-	0,1	0,03	2,5	SMEWW, 23ª Edição, 2017, Método 2540 G	29/08/2024 09:10
Enxofre Total	9988,1 mg/kg	-	50	18	1100	EPA SW-846 - 6010 D - 2018	28/08/2024 00:29
Nitrogênio Orgânico	9063,9 mg/kg	-	5	0,2724	1100	POP 083	24/09/2024 16:20
Fósforo Total	1131,1 mg/kg	-	50	17	130	EPA SW-846 - 6010 D - 2018	28/08/2024 00:29
Nitrogênio Total	9533 mg/kg	-	5	1,52	1200	SMEWW, 23ª Edição, Método 4500-N	20/09/2024 14:31
Ovos Viáveis de Helminthos	< 0,01 ovo/g ST	-	0,01	-	-	EPA 625 R-92/013, 2003	23/08/2024 07:00
Potássio Total	198,48 mg/kg	-	50	16	20	EPA SW-846 - 6010 D - 2018	28/08/2024 00:29
Cálcio Total	4668,4 mg/kg	-	50	19	480	EPA SW-846 - 6010 D - 2018	28/08/2024 00:29
Magnésio Total	383,2 mg/kg	-	50	15	38	EPA SW-846 - 6010 D - 2018	28/08/2024 00:29



Relatório de Análises 168173/2024.0.A

Amostra ID: 1028868

Proposta Comercial: PC4240/2024.1



COPASA - Contrato 05.2024/0112 - ABNT NBR 10004/2004 - Massa Bruta							
Análise	Resultado	NBR 10004:2004	LQ	LD	Incerteza	Referência	Data/Horas Análise
Ferro Total	15248,69 mg/kg	-	2,5	0,85	1500	EPA SW-846 - 6010 D - 2018	28/08/2024 00:29
Chumbo Total	6,12 mg/kg	-	0,5	0,19	0,64	EPA SW-846 - 6010 D - 2018	28/08/2024 00:29
Zinco Total	672,42 mg/kg	-	2,5	0,82	66	EPA SW-846 - 6010 D - 2018	28/08/2024 00:29
Sódio Total	151,9 mg/kg	-	50	17	15	EPA SW-846 - 6010 D - 2018	28/08/2024 00:29
Cobre Total	31,78 mg/kg	-	0,5	0,12	3,2	EPA SW-846 - 6010 D - 2018	28/08/2024 00:29
Manganês Total	31,3 mg/kg	-	2,5	0,76	3,1	EPA SW-846 - 6010 D - 2018	28/08/2024 00:29
Bário Total	125,84 mg/kg	-	0,5	0,12	12	EPA SW-846 - 6010 D - 2018	28/08/2024 00:29
Boro Total	< 0,97 mg/kg	-	2,5	0,97	-	EPA SW-846 - 6010 D - 2018	28/08/2024 00:29
Cádmio Total	< 0,03 mg/kg	-	0,1	0,03	-	EPA SW-846 - 6010 D - 2018	28/08/2024 00:29
Cromo Total	12,14 mg/kg	-	2,5	0,82	1,3	EPA SW-846 - 6010 D - 2018	28/08/2024 00:29
Níquel Total	6,81 mg/kg	-	0,5	0,13	0,65	EPA SW-846 - 6010 D - 2018	28/08/2024 00:29
Selênio Total	< 0,04 mg/kg	-	0,1	0,04	-	EPA SW-846 - 6010 D - 2018	28/08/2024 00:29
Silício Total	639,8 mg/kg	-	50	18	69	EPA SW-846 - 6010 D - 2018	28/08/2024 00:29
Prata Total	< 0,038 mg/kg	-	0,1	0,038	-	EPA SW-846 - 6010 D - 2018	28/08/2024 00:29
Molibdênio Total	5,13 mg/kg	-	2,5	0,78	0,53	EPA SW-846 - 6010 D - 2018	28/08/2024 00:29
Alumínio Total	1654,16 mg/kg	-	2,5	0,92	160	EPA SW-846 - 6010 D - 2018	28/08/2024 00:29
Cobalto Total	1,78 mg/kg	-	0,5	0,095	0,18	EPA SW-846 - 6010 D - 2018	28/08/2024 00:29
Escherichia coli	2,3 x 10 ⁵ NMP/100g	-	1,8	-	30000	SMEWW, 23ª Edição, 2017, Método 9221 A, C e F	23/08/2024 07:00
Cloro Total (Base seca)	0,2 %	-	0,1	-	-	EPA SW-846 - 5050 - 1994; SMEWW, 23ª Edição, 2017, Método 4500-Cl-B	06/09/2024 15:19

Outras Análises							
Análise	Resultado	NBR 10004:2004	LQ	LD	Incerteza	Referência	Data/Horas Análise
Poder Calorífico Superior - PCS	1560 kcal/kg	-	250	-	48	POP 178	06/09/2024 10:00
Poder Calorífico Inferior - PCI	1485 kcal/kg	-	250	-	46	POP 178	06/09/2024 10:00
Nitrogênio Kjeldahl	9434,3 mg/kg	-	10	3,03	1200	POP 083	16/09/2024 18:55
Nitrogênio Nitrato	98,7 mg/kg	-	10	3,03	18	POP 109	23/08/2024 12:25
Nitrogênio Nitrato	< 10 mg/kg	-	10	3,03	-	POP 108	23/08/2024 12:30
Preparo de Metais Totais - Matriz Sólida	-	-	-	-	-	EPA SW 846 - 3050-B - 1996	28/08/2024 16:28

Nº Amostra: 168173-2/2024.0 - Lote 2 - UNCE - ETE NOVA SERRANA_NOVA SERRANA - NOVA SERRANA - Lodo CENT	
Tipo de Amostra: Resíduos (Extrato Lixiviado)	
Data Coleta: 22/08/2024 13:26	Data Recebimento: 23/08/2024 06:50
Atividade de Coleta: CO10458/2024	Metodologia de Coleta: ABNT NBR 10007:2004 e POP 231
Cor da Amostra: Preto	Estado Físico: Sólido

Resultados Analíticos	
COPASA - Contrato 05.2024/0112 - ABNT NBR 10005/2004 - Extrato Lixiviado	

Rua Leão XIII, 281 - Vila dos Remédios - Osasco/SP - CEP: 06296-180 | Tel: (11) 3603-9552/8625/5487 | Caixa Postal 7520 - CEP: 06296-180

CNPJ: 05.431.967/0001-41 | I.E.: Isenta - I.M.: 71.982-0 | controleanalitico@controleanalitico.com.br

Pag. 2/5

		Relatório de Análises 168173/2024.0.A							
		Amostra ID: 1028868							
		Proposta Comercial: PC4240/2024.1							
Análise	Resultado	NBR 10005:2004	LQ	LD	Incerteza	Referência			Data/Horas Análise
Arsênio Total	< 0,0014 mg/L	1,0 mg/L	0,005	0,0014	-	SMEWW, 23ª Edição, 2017, Método 3120 B			28/08/2024 22:01
Bário Total	0,22 mg/L	70,0 mg/L	0,005	0,0008	0,018	SMEWW, 23ª Edição, 2017, Método 3120 B			28/08/2024 22:01
Cádmio Total	< 0,0003 mg/L	0,5 mg/L	0,001	0,0003	-	SMEWW, 23ª Edição, 2017, Método 3120 B			28/08/2024 22:01
Chumbo Total	< 0,0005 mg/L	1,0 mg/L	0,005	0,0005	-	SMEWW, 23ª Edição, 2017, Método 3120 B			28/08/2024 22:01
Cromo Total	< 0,0008 mg/L	5,0 mg/L	0,025	0,0008	-	SMEWW, 23ª Edição, 2017, Método 3120 B			28/08/2024 22:01
Fluoreto	0,22 mg/L	150 mg/L	0,1	0,0202	0,028	SMEWW, 23ª Edição, Método 4500-F-, B e C			28/08/2024 08:25
Mercurio Total	< 0,0015 mg/L	0,1 mg/L	0,005	0,0015	-	POP 036			28/08/2024 22:01
Prata Total	< 0,0005 mg/L	5,0 mg/L	0,005	0,0005	-	SMEWW, 23ª Edição, 2017, Método 3120 B			28/08/2024 22:01
Selênio Total	< 0,0013 mg/L	1,0 mg/L	0,005	0,0013	-	SMEWW, 23ª Edição, 2017, Método 3120 B			28/08/2024 22:01
Preparo de Lixiviado	-	-	-	-	-	ABNT NBR 10005 - 2004			26/08/2024 16:00
Volume Lixiviado	1000 mL	-	-	-	-	ABNT NBR 10005 - 2004			26/08/2024 16:00
Massa Lixiviado	50 g	-	-	-	-	ABNT NBR 10005 - 2004			26/08/2024 16:00
Tempo Lixiviado	18 h	-	-	-	-	ABNT NBR 10005 - 2004			26/08/2024 16:00
pH Lixiviado	5.03 UpH	-	1	-	0,025	ABNT NBR 9251 - 1986			27/08/2024 10:01
Outras Análises									
Análise	Resultado	NBR 10005:2004	LQ	LD	Incerteza	Referência			Data/Horas Análise
Preparo de Metais Totais (SMEWW)	-	-	-	-	-	SMEWW, 23ª Edição, 2017, Método 3030			28/08/2024 14:35
Preparo de Metais Totais (POP 036)	-	-	-	-	-	POP 076			28/08/2024 14:35
Nº Amostra: 168173-3/2024.0 - Lote 2 - UNCE - ETE NOVA SERRANA_NOVA SERRANA - NOVA SERRANA - Lodo CENT									
Tipo de Amostra: Resíduos (Extrato Solubilizado)				Data Recebimento: 23/08/2024 06:50					
Data Coleta: 22/08/2024 13:26				Metodologia de Coleta:					
Atividade de Coleta: CO10458/2024									
Resultados Analíticos									
COPASA - Contrato 05.2024/0112 - ABNT NBR 10006/2004 - Extrato Solubilizado									
Análise	Resultado	NBR 10006:2004	LQ	LD	Incerteza	Referência			Data/Horas Análise
Alumínio Total	0,042 mg/L	0,2 mg/L	0,025	0,0037	0,0036	SMEWW, 23ª Edição, 2017, Método 3120 B			05/09/2024 00:49
Arsênio Total	< 0,0014 mg/L	0,01 mg/L	0,005	0,0014	-	SMEWW, 23ª Edição, 2017, Método 3120 B			05/09/2024 00:49
Bário Total	0,037 mg/L	0,7 mg/L	0,005	0,0008	0,0031	SMEWW, 23ª Edição, 2017, Método 3120 B			05/09/2024 00:49
Cádmio Total	< 0,0003 mg/L	0,005 mg/L	0,001	0,0003	-	SMEWW, 23ª Edição, 2017, Método 3120 B			05/09/2024 00:49
Chumbo Total	< 0,0005 mg/L	0,01 mg/L	0,005	0,0005	-	SMEWW, 23ª Edição, 2017, Método 3120 B			05/09/2024 00:49
Cianeto Total	< 0,005 mg/L	0,07 mg/L	0,005	0,0015	-	SMEWW, 23ª Edição, 2017, Método 4500-CN-, E			03/09/2024 09:10
Cloreto	19,5 mg/L	250,0 mg/L	5	0,2114	1,2	SMEWW, 23ª Edição, Método 4500Cl-, B			02/09/2024 17:58
Cobre Total	< 0,0011 mg/L	2,0 mg/L	0,005	0,0011	-	SMEWW, 23ª Edição, 2017, Método 3120 B			05/09/2024 00:49
Cromo Total	< 0,0008 mg/L	0,05 mg/L	0,025	0,0008	-	SMEWW, 23ª Edição, 2017, Método 3120 B			05/09/2024 00:49
Ferro Total	206,2 mg/L	0,3 mg/L	0,025	0,005	18	SMEWW, 23ª Edição, 2017, Método 3120 B			05/09/2024 00:49
Fluoreto	0,55 mg/L	1,5 mg/L	0,1	0,0202	0,07	SMEWW, 23ª Edição, Método 4500-F-, B e C			05/09/2024 08:48



Relatório de Análises 168173/2024.0.A

Amostra ID: 1028868

Proposta Comercial: PC4240/2024.1



COPASA - Contrato 05.2024/0112 - ABNT NBR 10006/2004 - Extrato Solubilizado							
Análise	Resultado	NBR 10006:2004	LQ	LD	Incerteza	Referência	Data/Horas Análise
Manganês Total	1,238 mg/L	0,1 mg/L	0,025	0,005	0,12	SMEWW, 23ª Edição, 2017, Método 3120 B	05/09/2024 00:49
Mercurio Total	< 0,00004 mg/L	0,001 mg/L	0,0001	4E-5	-	POP 036	05/09/2024 00:49
Nitrogênio Nitrato	1,76 mg/L	10,0 mg/L	1,00	0,30	0,31	POP 109	31/08/2024 17:00
Prata Total	< 0,0005 mg/L	0,05 mg/L	0,005	0,0005	-	SMEWW, 23ª Edição, 2017, Método 3120 B	05/09/2024 00:49
Selênio Total	< 0,0013 mg/L	0,01 mg/L	0,005	0,0013	-	SMEWW, 23ª Edição, 2017, Método 3120 B	05/09/2024 00:49
Sódio Total	17,89 mg/L	200 mg/L	0,025	0,01	1,7	SMEWW, 23ª Edição, 2017, Método 3120 B	05/09/2024 00:49
Sulfato	1375 mg/L	250 mg/L	10	0,8986	59	POP 062	09/09/2024 08:51
Surfactantes Aniônicos (MBAS)	3,6 mg/L	0,5 mg/L	0,1	0,0121	0,46	SMEWW, 23ª Edição, 2017, Método 5540 C	31/08/2024 07:47
Zinco Total	0,239 mg/L	5,0 mg/L	0,025	0,004	0,021	SMEWW, 23ª Edição, 2017, Método 3120 B	05/09/2024 00:49
Preparo de Solubilizado	-	-	-	-	-	ABNT NBR 9251 - 1986 ABNT NBR 10006 - 2004	23/08/2024 16:00
pH Solubilizado	6,5 UpH	-	1	-	0,033	ABNT NBR 9251 - 1986	30/08/2024 16:10
Fenol	0,00562 mg/L	0,01 mg/L	2E-5	0,0000025	0,00013	EPA SW - 846 - 8270 E - 2018	09/09/2024 07:14

Outras Análises							
Análise	Resultado	NBR 10006:2004	LQ	LD	Incerteza	Referência	Data/Horas Análise
Preparo de Metais Totais (SMEWW)	-	-	-	-	-	SMEWW, 23ª Edição, 2017, Método 3030	02/09/2024 15:46
Preparo de Metais Totais (POP 036)	-	-	-	-	-	POP 076	02/09/2024 15:46
Preparo de SVOC - Líquido	-	-	-	-	-	EPA SW - 846 - 3510 C - 1996	05/09/2024 09:00

Especificações							
NBR 10006:2004: ABNT NBR 10006 DE 30/11/2004 - Extrato Solubilizado							
NBR 10005:2004: ABNT NBR 10005 DE 30/11/2004 - Extrato Lixiviado							
NBR 10004:2004: ABNT NBR 10004 DE 30/11/2004 - Massa Bruta							

Declaração de Conformidade							
A presente amostra ATENDE, conforme parâmetro(s) analisado(s), aos padrões estabelecidos pela ABNT NBR 10004: 2004 DE 30/11/2004 - Massa Bruta.							
A presente amostra ATENDE, conforme parâmetro(s) analisado(s), aos padrões estabelecidos pela ABNT NBR 10005:2004 DE 30/11/2004 - Extrato Lixiviado.							
A presente amostra NÃO ATENDE, conforme parâmetro(s) analisado(s), aos padrões estabelecidos pela ABNT NBR 10006:2004 DE 30/11/2004 - Extrato Solubilizado no(s) parâmetro(s) Ferro Total, Manganês Total, Sulfato, Surfactantes Aniônicos (MBAS).							

Opiniões e Interpretações (As opiniões e interpretações expressas abaixo não fazem parte do escopo da acreditação deste laboratório)							
Classificação do Resíduo: De acordo com a ABNT NBR 10004:2004 - Anexo G - Resíduo Não Perigoso - Classe II A – Não Inerte.							



Relatório de Análises 168173/2024.0.A

Amostra ID: 1028868

Proposta Comercial: PC4240/2024.1



Notas

Legendas:

LQ: Limite de Quantificação.
LD: Limite de Detecção.

%: por Cento

A/P: Ausência ou Presença

g: Grama

h: Horas

kcal/kg: Quilocaloria por Quilograma

mg/kg: Miligrama por Quilograma

mg/L: Miligrama por Litro

mL: Mililitro

NMP/100g: Número Mais Provável por 100 Gramas

ovo/g ST: Ovo por grama de Sólidos Totais

UpH: Unidade de pH

Informações Adicionais

A incerteza expandida (U) relatada é baseada na incerteza padrão combinada, multiplicada por um fator de abrangência $k=2$, para um nível de confiança de aproximadamente 95%;

Os resultados apresentados neste documento e suas respectivas declarações de conformidade, quando aplicável, possuem interpretação restrita e se aplicam somente à(s) amostra(s) analisada(s);

Este relatório somente poderá ser reproduzido na íntegra, qualquer alteração ou reprodução parcial somente com autorização prévia por escrito do laboratório;

Regra de decisão adotada pela Controle Analítico: A(s) incerteza(s) expressa(s) nos relatórios não são consideradas ao fazer uma conclusão/declaração de conformidade a uma especificação ou norma, ficando a critério do cliente e/ou parte interessada a aplicabilidade ou não das incertezas informadas.

As datas e horas apresentadas neste documento estão baseadas no fuso horário (UTC-03:00) Brasília

Francisco Prado Neto
Biólogo
Signatário Autorizado
CRBio-01: 082698/01-D

José Aristides Filho
Responsável Técnico
Signatário Autorizado
CRQ-IV: 04326731

Chave de Validação: 5750c77bba784ad580652003e621ac25

A validação deste documento pode ser realizada em: portal.mylmsweb.com.

ANEXO II

CARTA DE INTENÇÃO DE PARCERIA

Pelo presente Termo de Parceria, a Instituição situada no endereço Rodovia LMG 818 km 06 s/n Campus Universitário, na cidade de Florestal, CEP 35690-000, CNPJ nº 25.944.455/0003-58 declara colaborar na execução do Projeto do discente Débora Durães Almeida, concorrente a uma vaga no "Curso de Pós-graduação Mestrado Profissional em Sustentabilidade e Tecnologia Ambiental", do Campus Bambuí, em Bambuí (MG).

Nome do Pré-projeto apresentado no Processo Seletivo do MPSTA 2024.2

ANÁLISE SITUACIONAL E PROPOSIÇÃO DE AÇÕES INDIVIDUALIZADAS EM SANEAMENTO NO TERRITÓRIO RURAL EM ÁREAS (POPULAÇÕES) ISOLADAS - FLORESTAL - MINAS GERAIS

Cidade na qual será realizada a execução do Projeto
Florestal - MG

Atividade(s) na Instituição

- 1) Preparo de aulas práticas de fertilidade do solo para os níveis técnico, graduação e pós-graduação;
- 2) Auxílio na condução de aulas práticas;
- 3) Execução das análises químicas de solos e análises foliares para condução de pesquisas (Iniciação Científica, Mestrado e Doutorado) e Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's).
- 4) Responsável técnica pela preparação de amostras de solos, água e compostagens para posterior leitura no espectrofotômetro de absorção atômica;
- 5) Auxílio aos alunos na condução de experimentos referentes ao ensino, pesquisa e extensão;

Suporte da empresa/órgão na execução do Pré-projeto (marque as opções):

- ☒ (X) infraestrutura disponível
☒ (X) quadro de funcionários
☐ () recursos financeiros – valor estimado a R\$ (sem repasse financeiro)
☒ (X) outros suportes (descrever). Realização de procedimentos e ensaios analíticos em diversos laboratórios – multiusuários - disponíveis na UFV – Campus Florestal.

Contrapartida do discente para a empresa/órgão referente ao desenvolvimento do Projeto:

- 1) Aprimoramento técnico e profissional para a condução das atividades laborais;
- 2) Transferência de conhecimentos e habilidades visando tornar mais produtivo o desempenho de atividades referentes ao ensino, pesquisa e extensão; e
- 3) Empoderar a sociedade local e a comunidade universitária, promovendo interação e maior capacidade na resolução de conflitos na área de saneamento, buscando melhorar o convívio e qualidade de vida.

Em: 10/06/2024.

gov.br

Documento assinado digitalmente
 DÉBORA DURÃES ALMEIDA
 Data: 10/06/2024 17:15:01 -0300
 Verificar em: <https://validar.jc.gov.br>

Nome e assinatura do candidato

Eu, _____, representante da Instituição: Universidade Federal de Viçosa - Campus Florestal, CNPJ 25.944.455/0003-58 declaro haver interesse desta empresa em contribuir com o desenvolvimento do Projeto da discente Débora Durães Almeida.
Sendo assim, fica firmado o compromisso da empresa nos pontos relacionados nessa parceria.

Em: ____/____/____.

 Documento assinado digitalmente
ROGERIO DUARTE TORRES
Data: 13/06/2024 13:42:17 -0300
Verifique em <https://verificador.gov.br>

Assinatura e carimbo da Instituição parceira