

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel
Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água



Dissertação

**Lodos de estações de tratamento de água e de esgoto em Neossolo
Quartzarênico: atributos físicos e químicos do solo e acúmulo de nutrientes
em azevém (*Lolium multiflorum* Lam.)**

Marcela Rocha Martinez

Pelotas, 2026

Marcela Rocha Martinez

**Lodos de estações de tratamento de água e de esgoto em Neossolo
Quartzarênico: atributos físicos e químicos do solo e acúmulo de nutrientes
em azevém (*Lolium multiflorum* Lam.)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientador: Pesquisador Dr. Adilson Luís Bamberg

Coorientador: Dr. Ivan dos Santos Pereira

Pelotas, 2026

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação da Publicação

M385I Martinez, Marcela Rocha

Lodos de estações de tratamento de água e de esgoto em Neossolo Quartzarênico [recurso eletrônico] : atributos físicos e químicos do solo e acúmulo de nutrientes em azevém (*Lolium multiflorum* Lam.) / Marcela Rocha Martinez ; Adilson Luís Bamberg, orientador ; Ivan dos Santos Pereira, coorientador. — Pelotas, 2026.
102 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2026.

1. Resíduos de saneamento. 2. Solo arenoso. 3. Correção de acidez. 4. Plantas de cobertura. 5. Nutrição vegetal. I. Bamberg, Adilson Luís, orient. II. Pereira, Ivan dos Santos, coorient. III. Título.

CDD 631.821

Marcela Rocha Martinez

Lodos de estações de tratamento de água e de esgoto em Neossolo Quartzarênico:
atributos físicos e químicos do solo e acúmulo de nutrientes em azevém (*Lolium
multiflorum* Lam.)

Data da defesa: 27/02/2026

Banca examinadora:

Pesq. Dr. Adilson Luís Bamberg (Orientador)

Doutor em Agronomia pela Universidade de Pelotas, UFPEL.

Profa. Dra. Cláudia Liane Rodrigues de Lima

Doutora em Solos e Nutrição de Plantas pela Universidade de São Paulo, USP.

Dra. Juliana Maciel Bicca

Doutora em Ciências pela Universidade Federal de Pelotas, UFPEL.

Agradecimentos

A Deus, pela saúde, força e motivação para superar cada desafio encontrado ao longo da caminhada.

Aos meus pais, pelo amor incondicional, pelo apoio em todos os momentos e, sobretudo, por acreditarem em mim mesmo quando eu duvidei. A vocês, devo a base que me sustenta e a coragem para seguir em frente.

Ao meu namorado, por estar ao meu lado em todo processo, pelo apoio e pela paciência nos momentos difíceis.

Ao Pesquisador Dr. Adilson Luís Bamberg, pela orientação, pela disponibilidade de sempre e pela amizade construída ao longo da jornada. Agradeço a confiança, a paciência e o apoio nos momentos difíceis. Suas ajudas e incentivo foram essenciais para a realização deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água e ao seu corpo docente, pela oportunidade de realizar o mestrado e pelo ambiente de aprendizado que contribuíram para minha formação.

À Universidade Federal de Pelotas e à Embrapa Clima Temperado, pelo apoio indispensável à realização deste trabalho. Agradeço pela infraestrutura disponibilizada, pelo espaço para a condução dos experimentos e pelas análises realizadas. Sou extremamente grata aos profissionais dessas instituições, cuja colaboração e disponibilidade foram essenciais para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos amigos e colegas da Pós-Graduação, pela amizade, pela parceria e pelos momentos compartilhados ao longo deste período, que tornaram a caminhada mais leve.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, registro aqui o meu sincero MUITO OBRIGADA!

Resumo

MARTINEZ, Marcela Rocha. **Lodos de estações de tratamento de água em Neossolo Quartzarênico: atributos físicos e químicos do solo e acúmulo de nutrientes em azevém (*Lolium multiflorum* Lam.).** 2026. 102f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós - graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas - Brasil.

Lodos de estações de tratamento de água (LETAs) são resíduos gerados em grandes quantidades durante o processo de purificação da água para consumo humano, cuja destinação final adequada representa um desafio ambiental. Entre as alternativas propostas, o uso agrícola desses resíduos tem sido avaliado como uma estratégia potencial, especialmente em solos arenosos de baixa fertilidade natural. No entanto, a aplicação de LETAs em solos cultivados requer definição criteriosa de doses, formas de preparo e estratégias de manejo, bem como a avaliação de combinações com outros resíduos, como lodos de estação de tratamento de esgoto (LETES), visando benefícios agrônômicos sem comprometer a qualidade do solo e das plantas. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito da aplicação de doses crescentes de LETA, com e sem correção da acidez, isoladamente e em combinação com LETE, sobre o desempenho agrônômico do azevém (*Lolium multiflorum* Lam.), os atributos físicos e químicos de um Neossolo Quartzarênico e o acúmulo de macro e micronutrientes no tecido vegetal. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, na Estação Experimental Terras Baixas da Embrapa Clima Temperado, em delineamento experimental em blocos casualizados, com parcelas subdivididas, considerando o tipo de resíduo e as doses aplicadas (0, 30, 60 e 120 t ha⁻¹). Os resultados indicaram que a correção alcalina do LETA foi determinante para o aumento da produção de massa seca do azevém, enquanto o LETA não corrigido apresentou resposta agrônômica limitada. A aplicação dos resíduos promoveu alterações pontuais nos atributos químicos do solo, destacando-se a redução da acidez potencial, evidenciada pelo aumento do pH SMP e pela diminuição dos valores de H+Al, sem efeitos expressivos sobre os demais atributos químicos e físicos no período avaliado. As doses de LETA influenciaram de forma específica a dinâmica de alguns nutrientes, como o ferro no solo e o cobre, o molibdênio e o potássio no tecido vegetal, com respostas quadráticas às doses aplicadas. Não foram observados acúmulos excessivos de alumínio, ferro ou manganês no solo ou no tecido vegetal, indicando segurança ambiental nas condições avaliadas. De modo geral, os resultados demonstram que o uso agrícola de LETAs, especialmente quando previamente corrigidos quanto à acidez, pode ser adotado de forma tecnicamente viável em solos arenosos, promovendo respostas controladas no sistema solo-planta, sem comprometer a qualidade do solo ou o desenvolvimento do azevém.

Palavras-chave: resíduos de saneamento; solo arenoso; correção da acidez; plantas de cobertura; nutrição vegetal.

Abstract

MARTINEZ, Marcela Rocha. **Water treatment plant sludges in Quartzarenic Neosol: soil physical and chemical attributes and nutrient accumulation in ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.).** 2026. 102f. Dissertation (Master degree) - Postgraduate Program in Soil and Water Management and Conservation, Federal University of Pelotas, Pelotas - Brazil.

Water treatment plant sludges (WTPS) are residues generated in large quantities during the purification of water for human consumption, and their adequate final disposal represents an important environmental challenge. Among the proposed alternatives, agricultural use has been evaluated as a potential strategy, particularly in sandy soils with low natural fertility. However, the application of WTPS to cultivated soils requires a careful definition of appropriate doses, preparation strategies, and management practices, as well as the evaluation of combinations with other residues, such as sewage treatment plant sludge (STPS), in order to promote agronomic benefits without compromising soil and plant quality. In this context, the present study aimed to evaluate the effects of increasing doses of WTPS, with and without acidity correction, applied alone or combined with STPS, on the agronomic performance of ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.), the physical and chemical attributes of a Quartzipsamment soil, and the accumulation of macro- and micronutrients in plant tissue. The experiment was conducted under greenhouse conditions at the Terras Baixas Experimental Station of Embrapa Clima Temperado, using a randomized block design with split plots, considering residue type and applied doses (0, 30, 60, and 120 t ha⁻¹). The results showed that alkaline correction of WTPS was decisive for increasing ryegrass dry matter production, whereas non-corrected WTPS resulted in limited agronomic responses. Residue application promoted punctual changes in soil chemical attributes, especially a reduction in potential acidity, evidenced by increased SMP pH and decreased H+Al values, with no expressive effects on other chemical or physical attributes during the evaluated period. WTPS doses specifically affected the dynamics of certain nutrients, such as iron in the soil and copper, molybdenum, and potassium in plant tissue, showing quadratic responses to increasing doses. No excessive accumulation of aluminum, iron, or manganese was observed in either soil or plant tissue, indicating environmental safety under the evaluated conditions. Overall, the results demonstrate that agricultural use of WTPS, particularly when previously corrected for acidity, can be adopted in a technically viable manner in sandy soils, promoting controlled responses in the soil-plant system without compromising soil quality or ryegrass development.

Keywords: sanitation residues; sandy soil; acidity correction; cover crops; plant nutrition.

Lista de Figuras

Figura 1 - Localização dos pontos de coleta de solo e dos LETAs utilizados no experimento.....	27
Figura 2 - Etapas de obtenção e preparo dos LETAS e LETEs: (A) leitos de secagem; (B) coleta de LETA; (C) coleta de LETE; (D) solarização dos resíduos em estufa agrícola; e (E) peneiramento do LETA	28
Figura 3 - Massa seca da parte aérea (MSPA, g vaso ⁻¹) acumulada de plantas de azevém obtida após 5 cortes em função das doses de LETA (0, 30, 60 e 120 t ha ⁻¹), aplicadas na forma corrigida (C) e não corrigida (NC). Médias seguidas por letras distintas diferem entre si no teste de Tukey (p ≤ 0,05)	33
Figura 4 - Desenvolvimento vegetativo de plantas de azevém (<i>Lolium multiflorum</i> Lam.) submetidas à aplicação de diferentes tipos e doses de LETA e LETE	34
Figura 5 - Variação dos teores de Manganês (Mn) em função dos tipos de LETA (corrigido e não corrigido e doses de LETA (0, 30, 60 e 120 t.ha ⁻¹) na parte aérea de plantas de azevém (<i>Lolium multiflorum</i> Lam.)	36
Figura 6 - Teores de fósforo (P) em função das doses de LETA em plantas de azevém (<i>Lolium multiflorum</i> Lam.)	37
Figura 7 - Teor de zinco (Zn) e de alumínio (Al) (mg.kg ⁻¹) em plantas de azevém (<i>Lolium multiflorum</i> Lam.) submetidas a diferentes tipos de LETA (corrigido e não corrigido)	38
Figura 8 - Teores de nitrogênio (N), cálcio (Ca), magnésio (Mg), fósforo (P) (g.kg ⁻¹), cobre (Cu) e boro (B) (mg.kg ⁻¹) em plantas de azevém, submetidas a diferentes doses e tipos de LETA (corrigido e não corrigido)	39
Figura 9 - Interação entre tipos de LETA (corrigido e não corrigido) e doses de LETA (0, 30, 60 e 120 t.ha ⁻¹) sobre o teor de Níquel (Ni) em tecidos de plantas de azevém (<i>Lolium multiflorum</i> Lam.)	40
Figura 10 - Teores de Cobre (Cu) (A), Molibdênio (Mo) (B) e Potássio (K) (C) em função das doses de LETA em tecidos de plantas de azevém (<i>Lolium multiflorum</i> Lam.)	41
Figura 11 - Teor Molibdênio (Mo) em tecidos de plantas de azevém (<i>Lolium multiflorum</i> Lam.) submetidas a diferentes tipos de LETA (corrigido e não corrigido)	42
Figura 12 - Interação entre tipos de LETA (corrigido e não corrigido) e doses de LETA (0, 30, 60 e 120 t ha ⁻¹) sobre os acumulados de Massa Seca (MSS), nitrogênio (N), alumínio (Al), cobre (Cu), ferro (Fe) e manganês (Mn) em plantas de azevém (<i>Lolium multiflorum</i> Lam.)	44

Figura 13 - Acumulados de cálcio (Ca) (A), magnésio (Mg) (B), sódio (Na) (C) e boro (B) (D) em função das doses de LETA em plantas de azevém (<i>Lolium multiflorum</i> Lam.)	45
Figura 14 - Acumulado de fósforo (P) e cálcio (Ca) (mg.kg^{-1}) em plantas de azevém (<i>Lolium multiflorum</i> Lam.) submetidas a diferentes tipos de LETA (corrigido e não corrigido)	46
Figura 15 - Acumulado de zinco (Zn) em plantas de azevém (<i>Lolium multiflorum</i> Lam.) submetidas a diferentes doses e tipos de LETA (corrigido e não corrigido).....	47
Figura 16 - Interação entre tipos de LETA (corrigido e não corrigido) e doses de LETA (0, 30, 60 e 120 t ha^{-1}) sobre o acumulado de Níquel (Ni) (A), Cobre (Cu) (B), Molibdênio (Mo) (C) e Potássio (K) (D) em tecidos de plantas de azevém (<i>Lolium multiflorum</i> Lam.).....	49
Figura 17 - Etapas de coleta e preparo das amostras de solo: (A) coleta de solo na camada de 0–20 cm; (B) peneiramento do solo para homogeneização das amostras; (C) trado de rosca após os cinco cortes de azevém, utilizado para obtenção de amostras destinadas às análises físicas e químicas do solo.....	60
Figura 18 - Interação entre tipos de LETA (corrigido e não corrigido) e doses de LETA (0, 30, 60 e 120 t ha^{-1}) sobre a densidade de partículas de solo cultivado com plantas de azevém.....	62
Figura 19 - Teores de argila (A) e de areia (B) em função das doses de LETA	64
Figura 20 - Teores de silte em solos cultivados com diferentes doses de LETA.....	65
Figura 21 - Teores de Fe em função das doses de LETA.....	68
Figura 22 - pH SMP e acidez potencial ($\text{H}^+\text{+Al}$) em plantas de azevém (<i>Lolium multiflorum</i> Lam.) submetidas a diferentes tipos de LETA (corrigido e não corrigido).69	
Figura 23 - Variáveis que não apresentaram diferenças significativas: pH água, Al, Ca, Mg, Mn, K, Na, P, SB, CTC efetiva, CTC pH 7, Sat. Bases e Sat. Al.....	71

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Características químicas das matérias-primas avaliadas neste estudo	28
Tabela 2 - Análise química dos solos utilizados no experimento	30
Tabela 3 - Valores médios da massa seca da parte aérea (MSPA, g vaso ⁻¹) acumulada de 5 cortes, em função do tipo de LETA (corrigido e não corrigido).....	35
Tabela 4 - Resumo da análise de variância para os teores de macro e micronutrientes no tecido vegetal de azevém (<i>Lolium multiflorum</i> Lam.)	36
Tabela 5 - Resumo da análise de variância para os acumulados de elementos no tecido vegetal de azevém (<i>Lolium multiflorum</i> Lam.)	43
Tabela 6 - Cobalto (Co) no tecido foliar de plantas de azevém cultivadas, sob aplicação de doses crescentes (0, 30, 60, 120 ton ha ⁻¹) de LETAs com pH corrigido e não corrigido	48
Tabela 7 - Efeito dos fatores insumo, correção da acidez e da interação insumo × correção sobre os teores de nutrientes no tecido vegetal de azevém.....	51
Tabela 8 - Teores de macro e micronutrientes no tecido vegetal de azevém (<i>Lolium multiflorum</i> Lam.) em função do fator insumo	51
Tabela 9 - Teores de macro e micronutrientes no tecido vegetal de azevém (<i>Lolium multiflorum</i> Lam.) em função da correção da acidez do solo	52
Tabela 10 - Teores de sódio (Na, mg kg ⁻¹) no tecido vegetal de azevém (<i>Lolium multiflorum</i> Lam.) em função da interação entre insumo e correção da acidez do insumo.....	52
Tabela 11 - Efeito dos fatores insumo, correção da acidez e da interação insumo × correção sobre os acumulados de elementos químicos no tecido vegetal de azevém	53
Tabela 12 - Teores de macro e micronutrientes no tecido vegetal de azevém (<i>Lolium multiflorum</i> Lam.) em função do fator insumo	54
Tabela 13 - Teores de nitrogênio (N) e boro (B) no tecido vegetal de azevém (<i>Lolium multiflorum</i> Lam.) em função da correção da acidez do solo	54
Tabela 14 - Teores de potássio (K), ferro (Fe) e boro (B) no solo em função da interação entre insumo e correção alcalina	55
Tabela 15 - Características químicas das matérias-primas avaliadas neste estudo ..	59
Tabela 16 - Análise química dos solos utilizados no experimento	60
Tabela 17 - Composição granulométrica e densidade de partículas do Neossolo Quartzarênico (0–20 cm) submetido a doses de LETA corrigido e não corrigido.....	66

Tabela 18 - Resumo da análise de variância para os atributos químicos do solo (0–20 cm)67

Tabela 19 - Significância estatística dos fatores Insumo, Correção e da interação Insumo × Correção sobre os atributos químicos e físicos do solo, avaliada pelo teste F ($p \leq 0,05$).....73

Tabela 20 - Valores médios dos atributos químicos do solo e da densidade de partículas em função do fator insumo73

Tabela 21 - Valores médios do pH SMP e do teor de cálcio que apresentaram efeito significativo em função da correção da acidez.....74

Tabela 22 - Valores médios do pH SMP e do teor de cálcio que apresentaram interação significativa entre insumo e correção da acidez74

Sumário

1	Introdução	13
1.1	Hipóteses	14
1.2	Objetivos	14
1.2.1	Geral	14
1.2.2	Específicos.....	15
2	Revisão bibliográfica.....	16
2.1	Tratamento de água e originação de LETAs	16
2.2	Uso agrícolas dos LETAs	17
2.3	Dinâmica dos metais e do fósforo no solo com a aplicação de LETAs.	18
2.4	Combinação de LETAs com lodos de estações de tratamento de esgoto (LETES)	20
2.5	Solos arenosos (Neossolos Quartzarênicos): características e limitações	21
2.6	Resolução CONSEMA 461/2022 sobre a aplicação de LETAs no solo ..	22
2.7	Azevém (<i>Lolium multiflorum</i> Lam.) como planta de cobertura em sistemas agrícolas	24
3	Capítulo 1 – Desempenho agrônômico e acúmulo de nutrientes no tecido vegetal do azevém sob aplicações de doses de Lodos de Estação de Tratamento de Água e de Esgoto	25
3.1	Introdução	25
3.2	Material e Métodos	26
3.3	Resultados e discussão.....	32
3.3.1	Desempenho da aplicação de LETAs sobre a massa seca de azevém .	32
3.3.2	Teores de nutrientes no tecido vegetal de plantas de azevém.....	35
3.3.3	Acumulados de nutrientes no tecido vegetal de azevém	43
3.3.4	Teores de tecido vegetal à aplicação da mistura LETA:LETE (75:25) ...	50

3.3.5	Acumulados de tecido vegetal à aplicação da mistura LETA:LETE (75:25)	53
3.4	Conclusões	55
4	Capítulo 2 – Atributos físico-químicos sob doses de lodos de estação de tratamento de água incorporados em um Neossolo Quartzarênico	57
4.1	Introdução	57
4.2	Material e Métodos	58
4.3	Resultados e discussão	62
4.3.1	Atributos físicos do solo sob doses crescentes de LETAs com pH corrigido e não corrigido	62
4.3.2	Atributos químicos do solo sob doses crescentes de LETAs com pH corrigido e não corrigido	66
4.3.3	Combinação de LETA e LETE e seus efeitos nos atributos físicos e químicos do solo	72
4.4	Conclusões	76
5	Considerações finais	77
	Referências	78
	Apêndices	83
	Apêndice A – Incorporação das doses de lodos de tratamento de água, calcário dolomítico, cloreto de potássio e superfosfato triplo, nas unidades experimentais	84
	Apêndice B – Semeadura do azevém	85
	Apêndice C – Cultivo de plantas de azevém antes da realização do primeiro corte, para determinação de massa seca	86
	Apêndice D – Plantas de azevém após o corte, posteriormente, foi realizada a aplicação de ureia	87
	Apêndice E – Análise da variância (ANOVA) para as variáveis: densidade de partículas, argila, silte e areia em solo cultivado com plantas de azevém (<i>Lolium multiflorum</i> Lam.) submetidas a diferentes doses e tipos de LETA	88

Apêndice F – Análise da variância (ANOVA) para as variáveis químicas em solo cultivado com plantas de azevém (<i>Lolium multiflorum</i> Lam.) submetidos a diferentes doses e tipos de LETA.....	89
Apêndice G – Análise da variância (ANOVA) para os teores de nitrogênio (N), fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg), sódio (Na), alumínio (Al), boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) em função do tipo de LETA e doses aplicadas em plantas de azevém (<i>Lolium multiflorum</i> Lam.)	92
Apêndice H – Análise da variância (ANOVA) para os acumulados de massa seca (MSS), nitrogênio (N), fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg), sódio (Na), alumínio (Al), boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) em função do tipo de LETA e doses aplicadas em plantas de azevém (<i>Lolium multiflorum</i> Lam.)	95
Apêndice I – Análise da variância (ANOVA) para a mistura LETA_LETE (75:25) para os acumulados de nutrientes	98
Apêndice J – Análise da variância (ANOVA) para a mistura LETA_LETE (75:25) para os teores de nutrientes	100
Apêndice K – Análise da variância (ANOVA) para a mistura LETA_LETE (75:25) para variáveis químicas e físicas do solo	101

1 Introdução

A crescente demanda por alimentos e água potável impõe desafios significativos para a gestão sustentável dos recursos naturais, como a água destinada ao consumo humano, que exige processos rigorosos de purificação, que inclui a adição de coagulantes, como o sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), que promove a floculação de impurezas e resulta na formação de Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA) (Kleemann *et al.*, 2020). Os LETAs possuem argila, silte, matéria orgânica e uma quantidade razoável de nutrientes. Embora não sejam considerados fertilizantes, quando aplicados em doses consideráveis ($>10 \text{ ton ha}^{-1}$), esses resíduos possuem propriedades condicionadoras do solo, podendo melhorar a retenção de água, aumentar a capacidade de troca catiônica (CTC) de solos frágeis, como os arenosos (Rocha *et al.*, 2021).

Os LETAs são compostos por sedimentos naturais oriundos de mananciais hídricos, ricos em argilominerais e em elementos como óxidos de alumínio, ferro e manganês (Minto *et al.*, 2023). A solubilidade em água depende primariamente das condições do pH do meio, e a disponibilidade desses três elementos pode ser gerenciada por práticas agronômicas adequadas, como a correção alcalina (Ippolito *et al.*, 2011). Dessa forma, estratégias de manejo tornam-se essenciais para viabilizar o uso agrícola de LETAs. A correção do pH do lodo é uma das medidas mais eficazes para imobilizar Al, Fe e Mn, reduzindo os riscos de toxicidade e melhorando a eficiência agronômica da aplicação (Ribeiro *et al.*, 2022). A reutilização de LETAs no setor agrícola também se alinha aos princípios da economia circular e aos objetivos do Desenvolvimento Sustentável previstos na Agenda 2030 da ONU, reduzindo os custos operacionais das companhias de saneamento e minimizando a sobrecarga dos aterros sanitários (Minto *et al.*, 2023). Atualmente, o descarte desse material representa um passivo ambiental significativo.

Nos últimos anos, a legislação ambiental tem avançado ao permitir a reutilização dos LETAs como insumos agrícolas. O estado do Rio Grande do Sul tornou-se pioneiro ao estabelecer uma normativa específica que regulamenta critérios de correção, qualidade química e limites de aplicação no solo (Rio Grande do Sul, 2022). Esse marco legal abre caminho para a integração dos LETAs em práticas agrícolas sustentáveis, promovendo benefícios ambientais, como a redução do volume destinado a aterros sanitários, e vantagens econômicas, ao transformar um

passivo ambiental em recurso produtivo, desde que, seja de forma ambientalmente segura.

Outra abordagem promissora consiste na combinação de lodos de estações de tratamento de água (LETAs) com materiais orgânicos, como compostos ou lodos de estação de tratamento de esgoto (LETES), estratégia que pode atenuar a elevada afinidade dos LETAs pelo aprisionamento do fósforo, associada à presença de óxidos de ferro e alumínio, além de ampliar os benefícios agronômicos e ambientais do uso desses resíduos em sistemas agrícolas (Lombi *et al.*, 2010; Silveira *et al.*, 2013; Ibrahim *et al.*, 2015).

Entretanto, apesar dos avanços recentes, a literatura ainda apresenta lacunas importantes. Estudos como os de Kleemann *et al.* (2020) e Ribeiro *et al.* (2022) demonstram efeitos positivos de aplicações moderadas, mas não há informações consolidadas sobre a eficiência agrônômica de doses mais elevadas ($>60 \text{ t ha}^{-1}$) sobre o desempenho agrônômico das culturas agrícolas. Nesse contexto, torna-se essencial investigar como diferentes doses de LETAs afetam a qualidade do solo e o desenvolvimento de plantas de cobertura. Assim, este estudo busca ampliar o conhecimento sobre o uso agrícola desses resíduos e contribuir para sua utilização de forma segura e sustentável.

1.1 Hipóteses

Doses adequadas de LETAs, isoladas ou combinadas com LETES, podem ser aplicadas em solos agrícolas, favorecendo as suas características físico-químicas e sem riscos à segurança ambiental.

A disposição de LETAs em solos é ambientalmente segura em termos de acúmulo de formas biodisponíveis dos metais como alumínio, ferro e manganês em tecidos vegetais de azevém.

1.2 Objetivos

1.2.1 Geral

O estudo tem como objetivo geral avaliar os efeitos da aplicação de lodos de estações de tratamento de água e de esgoto, com pH corrigido e não corrigido, sobre os atributos físico-químicos de um Neossolo Quartzarênico e o acúmulo de nutrientes

em plantas de azevém cultivado em condições controladas, visando gerar informações para o uso agrícola seguro e sustentável desses resíduos.

1.2.2 Específicos

1 – Avaliar as alterações na fertilidade do solo após a incorporação de lodos de ETA e ETE.

2 – Monitorar o acúmulo de nutrientes e de íons metálicos no tecido vegetal de azevém.

3 – Avaliar, com base nos atributos químicos e físicos do solo, o potencial de uso de LETAs e LETES corrigidos, como condicionadores de solos.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Tratamento de água e origem de LETAs

O abastecimento de água potável à população urbana depende, principalmente, do tratamento de águas superficiais e subterrâneas em estações de tratamento de água (ETAs), cujo objetivo é remover impurezas físicas, químicas e biológicas, garantindo a potabilidade da água conforme os padrões estabelecidos pela legislação vigente. No Brasil, o tratamento convencional da água compreende uma sequência de etapas físico-químicas destinadas à remoção de partículas em suspensão, matéria orgânica, microrganismos e outros contaminantes presentes na água bruta (Richter, 2016).

De modo geral, o processo de tratamento inicia-se com a captação da água em mananciais superficiais ou subterrâneos, seguida de etapas de coagulação e floculação. Na coagulação, são adicionados produtos químicos, comumente sais de alumínio ou de ferro, como o sulfato de alumínio e o cloreto férrico, cuja função é neutralizar as cargas elétricas das partículas coloidais presentes na água. Esse processo permite a aproximação e agregação dessas partículas, que passam a formar estruturas maiores, denominadas flocos, durante a etapa subsequente de floculação, realizada sob agitação controlada (Richter, 2016).

Após a formação dos flocos, a água segue para a etapa de sedimentação ou decantação, na qual o material floculado, por apresentarem maior densidade, sedimentam-se no fundo dos decantadores, separando-se da fase líquida. É nessa etapa que ocorre a geração da maior parte do lodo de estação de tratamento de água (LETAs), constituído basicamente por partículas minerais, originalmente presentes na água bruta, matéria orgânica e hidróxidos metálicos formados a partir dos coagulantes empregados no processo (Reali, 1999). A água clarificada, por sua vez, segue para as etapas seguintes do tratamento.

Posteriormente, a água passa pela filtração, com o objetivo de remover partículas remanescentes que não foram retidas na sedimentação. Após a filtração, são realizadas as etapas finais do tratamento, que incluem a desinfecção, normalmente por meio da adição de cloro ou de seus derivados, a fluoretação e a correção final do pH, assegurando que a água distribuída à população atenda aos padrões microbiológicos e físico-químicos exigidos para consumo humano (Richter, 2016).

Segundo a NBR 10.004/2004, os LETAs são considerados resíduos sólidos, classificados como resíduo Classe IIA, não perigoso e não inerte. Do ponto de vista químico, os LETAs são caracterizados pela presença significativa de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, provenientes tanto da água bruta quanto dos coagulantes utilizados no tratamento. Além disso, esses resíduos podem conter macronutrientes e micronutrientes em concentrações variáveis, bem como pequenas quantidades de impurezas associadas aos produtos químicos empregados no processo de tratamento. Essa composição confere aos LETAs características semelhantes às de solos minerais de baixa fertilidade natural, aspecto que tem despertado interesse quanto ao seu potencial de uso agrícola ou ambiental (Reali, 1999; Richter, 2016).

Após sua geração, o lodo de ETA pode passar por diferentes processos de adensamento, desidratação ou secagem, visando reduzir seu volume e facilitar o transporte e a disposição final. Tradicionalmente, a destinação desses resíduos tem sido realizada em aterros sanitários, prática que implica elevados custos operacionais e ambientais, além de reduzir a vida útil desses sistemas. Diante desse cenário, tem-se intensificado o interesse por alternativas de reaproveitamento do lodo de ETA, incluindo sua aplicação em solos agrícolas ou em áreas degradadas, desde que atendidos critérios técnicos e ambientais que assegurem a proteção do solo, da água e das plantas (Reali, 1999; Awwa, 2018).

2.2 Uso agrícolas dos LETAs

A principal questão quanto à disposição dos resíduos sólidos provenientes do tratamento de água é que, após a desidratação, costuma-se encaminhá-los para aterros sanitários. Esta prática, além de apresentar elevado custo, reduz a vida útil dos aterros sanitários, demanda grandes áreas e, em vez de solucionar o problema, apenas o transfere. Especial atenção deve ser dada aos lodos gerados em ETAs que utilizam sulfato de alumínio, pois os aterros, por serem ambientes anaeróbios e produtores de ácidos voláteis, mantêm o pH entre 5 e 5,5, condição que favorece a dissolução do alumínio (Al^{3+}) e de outros metais, tornando-os disponíveis para as plantas, o que pode aumentar o potencial de mobilidade desses elementos no lixiviado, a depender das condições do aterro sanitário (Reali, 1999).

A gestão de serviços públicos, como o tratamento de água, envolve processos de geração de resíduos e preocupações com a segurança ambiental. Essa gestão deve ser economicamente viável e segura, o que exige o desenvolvimento de saídas confiáveis e seguras para o aproveitamento dos resíduos (Barbosa *et al.*, 2000).

Em estudo sobre a aplicação de lodo de LETA em solo degradado, concluiu-se que o LETA pode ser aplicado em áreas degradadas, pois eleva os teores de macronutrientes e o pH do solo. Porém, altas doses podem aumentar a salinidade do solo (Teixeira *et al.*, 2018).

Considerando que os possíveis efeitos positivos proporcionados pelos LETAs estão relacionados ao fornecimento de uma quantidade razoável de nutrientes, ao aumento do CTC e retenção de água no solo, e que esses resíduos apresentam características similares às dos solos onde a ETA está inserida. Logo, destacam-se os solos arenosos e os degradados como os destinos potenciais para a utilização agrícola dos LETAs (Silva, 2020).

Sob a perspectiva da economia circular, a utilização de LETAs em aplicações agrícolas configura-se como uma alternativa para transformar o resíduo em um recurso potencialmente útil, contribuindo para a redução da disposição em aterros e para a valorização desses materiais. No Estado do Rio Grande do Sul, essa abordagem é respaldada por instrumentos normativos que regulamentam o uso agrícola dos LETAs, os quais estabelecem que essa valorização somente é viável quando atendidos critérios técnicos e ambientais rigorosos, capazes de assegurar a segurança agronômica e ambiental (Rio Grande do Sul, 2022).

A literatura indica que o uso agrícola dos LETAs apresenta grande potencial, mas também limites claramente definidos. A variabilidade composicional dos resíduos, as interações com fósforo e outros nutrientes, a dependência das condições do solo e do manejo justificam a necessidade de estudos experimentais controlados, capazes de avaliar as respostas do solo e das plantas sob diferentes doses e condições de aplicação. Esses fundamentos sustentam a relevância de investigações que busquem benefícios agronômicos com segurança ambiental.

2.3 Dinâmica dos metais e do fósforo no solo com a aplicação de LETAs

O comportamento do fósforo no solo é fortemente controlado por reações de adsorção aos óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, especialmente em solos ácidos

e de baixa capacidade tampão. Materiais ricos desses constituintes, como os lodos de estações de tratamento de água, tendem a aumentar a retenção de fósforo na fase sólida, reduzindo sua disponibilidade na solução do solo e, conseqüentemente, sua absorção pelas plantas. Esse comportamento é descrito na literatura e constitui um dos principais fatores que condicionam a resposta agrônômica de solos que recebem LETAs (Ippolito *et al.*, 2011).

A dinâmica do fósforo no solo depende muito das características químicas e mineralógicas, especialmente da presença de ferro (Fe) e de alumínio (Al) na fração argila. Os óxidos e hidróxidos desses elementos têm grande afinidade por íons fosfato, o que faz com que o fósforo seja adsorvido às superfícies minerais por ligações químicas fortes. Isso leva à formação de formas de fósforo pouco disponíveis, especialmente em solos ácidos, onde a atividade de Al^{3+} e Fe^{3+} na solução do solo é maior (Raij, 2011).

Pesquisas em solos subtropicais mostram que a capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP) está associada às formas e quantidades de ferro e alumínio no solo. Vilar *et al.* (2010) notaram que solos com mais óxidos de Fe e Al, especialmente nas formas amorfas e pouco cristalinas, retêm mais fósforo. Isso destaca a importância desses minerais no controle da disponibilidade do nutriente. Os autores afirmam que a CMAP pode ser um bom indicador para compreender o comportamento do fósforo em diferentes tipos de solo.

Materiais ricos em ferro e alumínio amorfos, como os lodos de estações de tratamento de água (LETAs), apresentam comportamento químico semelhante ao de solos com elevada atividade desses óxidos. Por terem grande área superficial e grupos hidroxila reativos, os LETAs têm alta afinidade pelo fósforo e podem aumentar a adsorção do nutriente quando aplicados ao solo (Hernández; Meurer, 1998).

Estudos relatam que a adição desses resíduos pode reduzir a disponibilidade imediata de fósforo para as plantas, principalmente quando usados em grandes quantidades ou em solos com baixa capacidade tampão (Ippolito *et al.*, 2011).

Por outro lado, aplicar LETAs ao solo pode alterar características químicas, como o pH, a capacidade de troca de cátions e a retenção de água, o que, indiretamente, pode afetar a dinâmica do fósforo, variando conforme o tipo de solo e a quantidade aplicada. Esses fatores influenciam a mobilidade do fósforo e sua relação com as raízes, podendo gerar resultados distintos conforme o solo, o resíduo e o manejo adotados (Ippolito *et al.*, 2011). Por isso, os efeitos dos LETAs sobre o

fósforo devem ser avaliados de forma integrada. O pH do solo influencia a disponibilidade de fósforo, solos muito ácidos aumentam a adsorção de hidróxidos de alumínio e ferro. Já o pH moderadamente ácido ou próximo do neutro reduz essas reações e diminui a solubilidade do alumínio na solução do solo (Raij, 2011).

Em pesquisas sobre uso agrícola de LETAs, Ribeiro (2022) aponta que é importante controlar o pH do solo e do material aplicado. Esse controle reduz a retenção de fósforo e os efeitos do alumínio, permitindo o uso agrônômico dos LETAs sem prejudicar a disponibilidade do nutriente.

Além dos efeitos diretos sobre a disponibilidade de fósforo, revisões recentes destacam que a aplicação de LETAs pode ter implicações positivas ao reduzir o risco de perdas de fósforo por lixiviação ou por escoamento superficial. A elevada afinidade dos hidróxidos de alumínio e de ferro pelo fosfato contribui para a retenção do nutriente na fase sólida do solo, reduzindo sua mobilidade (Ippolito *et al.*, 2011).

No entanto, a literatura também alerta que essa mesma propriedade pode se tornar um fator limitante em sistemas agrícolas quando não há ajuste adequado das doses ou da adubação fosfatada. Revisões sobre o uso de LETAs destacam que a imobilização de fósforo é uma das principais limitações associadas à aplicação desses resíduos, podendo reduzir a disponibilidade de P e, em doses elevadas, induzir deficiência em plantas, sobretudo em solos de baixa fertilidade ou em culturas mais exigentes em fósforo (Lombi *et al.*, 2010).

2.4 Combinação de LETAs com lodos de estações de tratamento de esgoto (LETES)

A literatura aponta que o uso agrícola de LETAs apresenta melhores resultados quando integrado a outras práticas de manejo do solo, especialmente por meio da coaplicação com materiais orgânicos, como os lodos de estações de tratamento de esgoto (LETES), que são gerados durante o tratamento de efluentes sanitários, cuja composição inclui teores relevantes de matéria orgânica e nutrientes (Yang *et al.*, 2018). Essa abordagem surge como uma estratégia para potencializar os benefícios agrônômicos e, ao mesmo tempo, mitigar limitações associadas ao uso isolado dos resíduos, como a imobilização excessiva de fósforo e alterações indesejáveis na disponibilidade de nutrientes (Ippolito *et al.*, 2011).

No entanto, a utilização desses materiais exige cuidados, uma vez, que lodos que não passam por tratamento adequado podem conter microrganismos patogênicos, o que torna necessária a adoção de processos de estabilização e higienização antes da aplicação ao solo, conforme estabelecido pela legislação brasileira (Brasil, 2020).

O uso agrícola de LETEs requer atenção especial devido à possível ocorrência de micro-organismos patogênicos em concentrações superiores às permitidas pela legislação ambiental vigente (Brasil, 2020). Essa condição reforça a necessidade de adotar estratégias de tratamento que promovam a inativação desses agentes, assegurando a redução do risco de contaminação associado à aplicação do resíduo no solo (Pereira *et al.*, 2020).

A combinação de LETAs com resíduos orgânicos vem sendo pesquisada como uma estratégia promissora, capaz de potencializar os efeitos positivos desses materiais (Ibrahim *et al.*, 2015), uma vez que, usualmente, são fontes de matéria orgânica e de nutrientes (Bittencourt *et al.*, 2012).

A literatura indica que LETAs podem influenciar de forma relevante os atributos do solo, especialmente quando utilizados de maneira integrada a outros materiais, como os resíduos orgânicos, desde que sua aplicação seja baseada em critérios técnicos que considerem a dose, a forma de aplicação e as características do solo receptor (Dayton; Basta, 2005).

Nesse sentido, os estudos indicam que a combinação de LETAs com LETEs deve ser avaliada com cautela, considerando não apenas os possíveis ganhos agrônômicos, mas também as restrições sanitárias e legais envolvidas. A exigência de atendimento aos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 498/2020 (Brasil, 2020), reforça que o uso agrícola de LETEs só é viável mediante o controle rigoroso da carga microbiológica, independentemente da associação com outros resíduos.

2.5 Solos arenosos (Neossolos Quartzarênicos): características e limitações

Os Neossolos Quartzarênicos constituem uma classe de solos caracterizada por baixo grau de desenvolvimento pedogenético, enquadrados na ordem Neossolos, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Esses solos se distinguem pela ausência de horizonte B diagnóstico, o que reflete processos pedogenéticos

incipientes e a atuação limitada dos fatores de formação do solo ao longo do tempo. São dominados por quartzo na fração mineral, com textura arenosa e areia franca em quase todo o perfil, cujo teor de argila é inferior a 150 g kg^{-1} até uma profundidade de 0,15 m ou até o contato lítico. Os solos têm baixa reatividade química, o que afeta suas propriedades físicas e químicas (Santos et al., 2018), estando isso diretamente associado à composição mineralógica simples.

Ocorrem principalmente em ambientes de deposição arenosa recente, como áreas costeiras, planícies fluviais, depósitos eólicos e superfícies retrabalhadas, sendo frequentes no sul do país, especialmente no Rio Grande do Sul. Os solos nessas regiões têm limitações para o uso agrícola, portanto, precisam ser manejados especificamente para garantir sua conservação e uso sustentável (Streck *et al.*, 2018).

Quimicamente, os Neossolos Quartzarênicos têm baixa fertilidade natural, associada ao baixo teor de matéria orgânica, baixa CTC (Capacidade de Troca Catiônica) e, frequentemente, baixa saturação por bases. Além disso, a baixa coesão entre as partículas permite que processos erosivos ocorram, especialmente quando os solos são manejados de forma inadequada ou mantidos na ausência de cobertura vegetal (Reichert *et al.*, 2016).

No entanto, diante dessas limitações, o uso agrícola dos Neossolos Quartzarênicos requer a adoção de práticas conservacionistas, com destaque para o aumento do teor de matéria orgânica, a manutenção da cobertura do solo e o uso de sistemas de manejo que minimizem as perdas de água e de nutrientes. Estudos indicam que a adição de resíduos orgânicos e de condicionadores de solo pode contribuir para a melhoria da agregação, o aumento da CTC e a maior retenção de água nesses ambientes arenosos, desde que realizada de forma criteriosa e com monitoramento ambiental adequado (Bayer; Mielniczuk, 2006; Ippolito *et al.*, 2011).

Tais características justificam a escolha do Neossolo Quartzarênico como modelo experimental para avaliar o efeito de LETAs e LETEs em condições de baixa fertilidade e baixa capacidade tampão

2.6 Resolução CONSEMA 461/2022 sobre a aplicação de LETAs no solo

O Rio Grande do Sul foi pioneiro no Brasil ao estabelecer uma regulamentação específica para o uso agrícola de lodos gerados em estações de tratamento de água (LETAs). Esse avanço ocorreu com a publicação da Resolução CONSEMA nº

461/2022, que define critérios e diretrizes técnicas para a aplicação desses materiais em solos, buscando conciliar a destinação ambientalmente adequada dos resíduos com a preservação da qualidade do solo (Rio Grande do Sul, 2022).

A resolução destaca a importância de alternativas que permitam a reutilização desses materiais de forma segura. De acordo com a norma, os LETAs são formados predominantemente por partículas minerais finas e matéria orgânica originalmente presentes na água bruta, podendo conter produtos resultantes da aplicação de reagentes ao longo do processo de tratamento da água (Rio Grande do Sul, 2022).

A norma considera que os solos brasileiros são predominantemente ácidos e apresentam, naturalmente, baixos teores de nutrientes e concentrações significativas de elementos como alumínio, ferro e manganês. Em razão de sua origem e das etapas do tratamento, os LETAs podem apresentar pH ácido e teores disponíveis desses elementos em níveis potencialmente limitantes ao desenvolvimento das culturas agrícolas, o que justifica a necessidade de estabelecer critérios técnicos para sua utilização em solos agrícolas (Rio Grande do Sul, 2022).

Entre esses critérios, destaca-se a exigência de correção do pH dos LETAs quando necessário, de modo que o material apresente pH, na relação 1:5, entre 6,5 e 7,5 antes de sua incorporação ao solo. A Resolução define ainda conceitos fundamentais relacionados à aplicação no solo, como a taxa de aplicação, os produtos derivados e a carga máxima acumulada de substâncias inorgânicas, fornecendo a base normativa para o uso agrícola dos LETAs (Rio Grande do Sul, 2022).

A resolução estabelece limites máximos de concentração total para substâncias inorgânicas potencialmente tóxicas presentes nos LETAs, relacionados aos valores admitidos para fertilizantes orgânicos e condicionadores de solo. A norma também reconhece a possibilidade de os LETAs contribuírem para a melhoria dos atributos químicos do solo, como o aumento do teor de matéria orgânica e da capacidade de troca de cátions, especialmente em solos de textura arenosa, desde que respeitados os critérios técnicos estabelecidos (Rio Grande do Sul, 2022).

Portanto, a Resolução CONSEMA nº 461/2022 consolida o Rio Grande do Sul como referência nacional na regulamentação do uso agrícola de LETAs, ao estabelecer diretrizes que permitem a valorização desses resíduos como alternativa ambientalmente adequada, respeitando os limites e critérios estabelecidos na legislação (Rio Grande do Sul, 2022).

2.7 Azevém (*Lolium multiflorum* Lam.) como planta de cobertura em sistemas agrícolas

O azevém (*Lolium multiflorum* Lam.) é uma gramínea anual de inverno amplamente utilizada nos sistemas agrícolas do sul do Brasil, destacando-se pela boa adaptação às condições climáticas regionais, pelo rápido estabelecimento e pela elevada produção de biomassa. Entre as cultivares disponíveis da espécie, o azevém BRS Integração foi desenvolvido pela Embrapa, em parceria com instituições de pesquisa, com recomendação para uso em sistemas de integração lavoura-pecuária, em plantio direto e como planta de cobertura (Embrapa, 2017).

De acordo com a Embrapa, a cultivar BRS Integração apresenta porte intermediário a ereto, bom vigor inicial e elevado potencial de rebrote, características que favorecem seu uso no período outono-inverno, quando a manutenção da cobertura vegetal é fundamental para a proteção do solo e para o funcionamento dos sistemas agrícolas (Embrapa, 2017).

No presente estudo, a escolha do azevém BRS Integração fundamenta-se em sua ampla adaptação às condições climáticas da região sul e em suas características agronômicas descritas nos materiais técnicos da Embrapa. A elevada produção de massa seca e a alta velocidade de estabelecimento, associadas ao cultivar favorecem a observação do crescimento vegetal, contribuindo para a interpretação dos efeitos do uso agrícola de LETAs sobre o desempenho da cultura.

Dessa forma, o uso do azevém BRS Integração permite integrar a avaliação do uso agrícola de LETAs à resposta de uma planta de cobertura amplamente recomendada para a região sul do Brasil, considerando suas características agronômicas e sua adaptação regional.

3 Capítulo 1 – Desempenho agrônômico e acúmulo de nutrientes no tecido vegetal do azevém sob aplicações de doses de Lodos de Estação de Tratamento de Água e de Esgoto

3.1 Introdução

O interesse pelo uso agrícola dos LETAs tem aumentado em função dos grandes volumes gerados durante o tratamento de água destinada ao abastecimento público e das limitações ambientais associadas à sua disposição final em aterros ou em corpos hídricos (Turner *et al.*, 2019; Zhao *et al.*, 2018). A aplicação em áreas agrícolas surge, assim, como uma alternativa potencialmente sustentável, especialmente, em solos de baixa fertilidade natural (Dassanayake *et al.*, 2015). Contudo, o uso desses resíduos requer cautela, sobretudo devido à presença de alumínio proveniente dos coagulantes, que pode afetar o crescimento das plantas e a disponibilidade de fósforo no solo, além da possibilidade de ocorrência de outros elementos potencialmente tóxicos (Wang *et al.*, 1998; Tay *et al.*, 2017; Wasserman *et al.*, 2018).

A análise de tecido vegetal é reconhecida como uma ferramenta fundamental para avaliar a resposta das plantas ao manejo do solo, pois reflete o estado nutricional das plantas e o acúmulo de nutrientes na parte aérea (Prado, 2021). Diferentemente da análise química do solo, que indica a disponibilidade potencial de nutrientes, a composição do tecido vegetal expressa os nutrientes efetivamente absorvidos e assimilados pelas plantas (Marschner, 2012).

Além disso, a associação entre a concentração de nutrientes e a produção de matéria seca permite estimar o acúmulo total de elementos, conectando o manejo do solo ao desempenho agrônômico e à ciclagem de nutrientes no solo (Martinazzo *et al.*, 2020). Corroborando com isso, a análise de tecido vegetal torna-se ainda mais importante em estudos que envolvem a aplicação de resíduos, como os LETAs.

Em solos arenosos, estudos indicam que a aplicação de LETA pode promover melhorias nos atributos físicos e químicos, e favorecer o crescimento vegetal. No entanto, esses resíduos também podem interferir na disponibilidade de nutrientes, especialmente do fósforo, devido às interações com o alumínio presente no material, o que reforça a necessidade de uma avaliação criteriosa da resposta das plantas (Ribeiro *et al.*, 2022).

O uso de plantas de cobertura, como o azevém, amplamente cultivado no sul do Brasil, destaca-se como uma estratégia eficiente para avaliar os efeitos da aplicação de LETAs no sistema solo-planta, devido à elevada produção de biomassa e à alta capacidade de absorção de nutrientes. Essas características tornam a espécie relevante em estudos que avaliam o desempenho agrônomo e a nutrição vegetal em sistemas submetidos à aplicação de resíduos (Silveira *et al.*, 2013). Neste contexto, o objetivo desse estudo foi avaliar doses crescentes de LETAs e combinação com LETEs em relação: i) ao desempenho agrônomo de azevém, ii) aos atributos químicos relacionados a fertilidade do solo, iii) à concentração de metais pesados no solo e iv) à absorção de nutrientes e de metais pesados em plantas de azevém visando subsidiar o uso agrícola desses resíduos de forma segura.

3.2 Material e Métodos

O estudo foi realizado em casa de vegetação na Estação Experimental Terras Baixas da Embrapa Clima Temperado, localizada no Capão do Leão, RS. Os LETAs e LETEs foram obtidos de leitos de secagem da Companhia Rio-grandense de Saneamento (CORSAN), localizados no município de Rio Grande, RS. O solo utilizado no experimento foi coletado dentro dos leitos de secagem, conforme apresentado na Figura 1. O solo é classificado como Neossolo Quartzarênico, de textura arenosa e baixa fertilidade, típico de regiões costeiras de deposição quartzosa, apresentando baixa capacidade de retenção de nutrientes e de água. Essas características tornam o solo apropriado para estudar o efeito dos LETAs e LETEs (Streck *et al.*, 2018).

Figura 1 - Localização dos pontos de coleta de solo e dos LETAs utilizados no experimento.

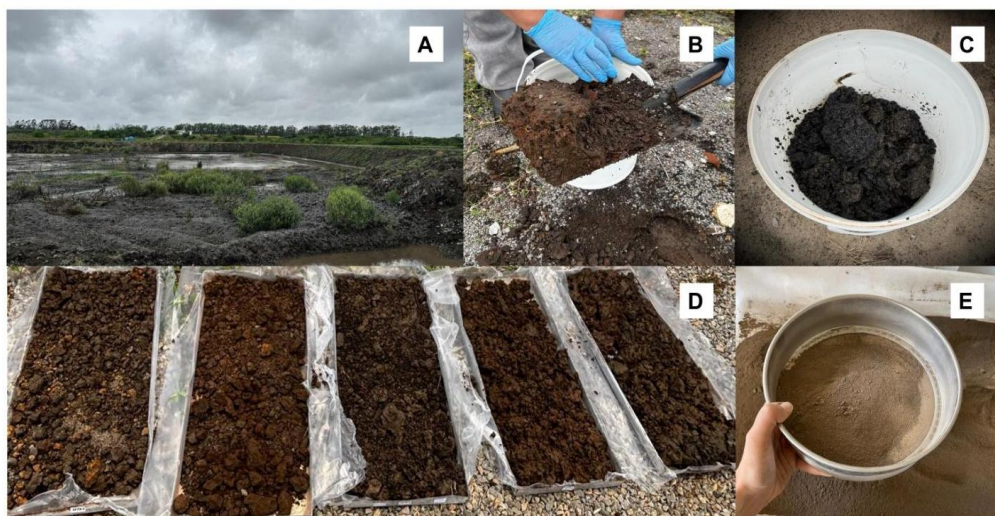


Fonte: elaborado pela autora (2026).

Os tratamentos consistiram em doses crescentes (0, 30, 60 e 120 t ha⁻¹ de massa seca) de LETA solarizado moído, com pH corrigido e não corrigido, além da mistura de LETA solarizado e moído, com pH corrigido e não corrigido, e de LETÉ solarizado e moído (30 t ha⁻¹), na proporção de 75% de LETA e 25% de LETÉ de massa seca, respectivamente.

A solarização do LETA e do LETÉ foi realizada em estufa agrícola até atingir teor de umidade inferior a 20%. Posteriormente, os lodos foram moídos e peneirados até a obtenção de partículas de 0,2 mm, conforme apresentado na Figura 2, o que facilitou a incorporação e a homogeneização, assegurando uma aplicação uniforme nos baldes experimentais.

Figura 2 - Etapas de obtenção e preparo dos LETAS e LETEs: (A) leitos de secagem; (B) coleta de LETA; (C) coleta de LETE; (D) solarização dos resíduos em estufa agrícola; e (E) peneiramento do LETA



Fonte: elaborado pela autora (2026).

Posteriormente, os lodos foram encaminhados ao Laboratório Laborsolo para a caracterização química dos resíduos utilizados no estudo, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Características químicas das matérias-primas avaliadas neste estudo

Parâmetro	Unidade	LETA ¹	LETE ²
Nitrogênio total (N)	%	0,6	1,34
Fósforo total (P ₂ O ₅)	%	0,23	3,46
Potássio solúvel (K ₂ O)	%	0,01	0,02
Cálcio total (Ca)	%	0,11	1,65
Magnésio total (Mg)	%	0,29	0,26
Enxofre total (S)	%	0,28	0,64
Carbono orgânico	%	6,55	19,51
Relação C/N	—	10,92	14,56
Relação C/P	—	65,22	12,91
pH (CaCl ₂)	—	5,47	6
Umidade (perda a 65 °C)	%	8,45	4,73
Cobre total (Cu)	mg kg ⁻¹	89,44	151,4

Fonte: elaborado pela autora (2026).

Nota: (1) LETA (Lodo de estação de tratamento de água). (2) LETE (Lodo de estação de tratamento de esgoto). (3) N.I. (não identificado).

Tabela 1 - Características químicas das matérias-primas avaliadas neste estudo

Parâmetro	Unidade	LETA¹	LETE²
Ferro total (Fe)	mg kg ⁻¹	30.280,00	35.590,00
Manganês total (Mn)	mg kg ⁻¹	262,80	330,00
Zinco total (Zn)	mg kg ⁻¹	78,56	1.804,00
Sódio total (Na)	mg kg ⁻¹	241,00	811,80
Boro total (B)	mg kg ⁻¹	N.I. ³	N.I. ³
Molibdênio total (Mo)	mg kg ⁻¹	N.I. ³	N.I. ³
Níquel total (Ni)	mg kg ⁻¹	N.I. ³	33,49
Cobalto total (Co)	mg kg ⁻¹	N.I. ³	N.I. ³

Fonte: elaborado pela autora (2026).

Nota: (1) LETA (Lodo de estação de tratamento de água). (2) LETE (Lodo de estação de tratamento de esgoto). (3) N.I. (não identificado).

O experimento foi instalado em delineamento de blocos casualizados com parcelas subdividida, com 2 fatores de tratamento, considerando o fator 1: tipo de LETA (nível 1: corrigido e nível 2: não corrigido) a ser alocado na parcela e o fator 2: Dose de LETA, com quatro doses crescentes de LETAs (0; 30; 60 e 120 ton ha⁻¹, em base seca), alocadas nas subparcelas. Cada tratamento, teve quatro repetições, totalizando 32 unidades experimentais, já a mistura LETA:LETE na proporção (75:25) de massa seca, respectivamente, teve quatro repetições, totalizando oito unidades experimentais. O experimento foi implantado em 04/04/2025, quando todos os tratamentos foram incorporados manualmente em cada balde experimental.

Antes da implantação do experimento, foram coletadas amostras de solo com estrutura não preservada na camada de 0–0,20 m, visando à caracterização inicial do solo, e encaminhadas ao Laboratório de Química do Solo da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), conforme demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Análise química dos solos utilizados no experimento

Variável	Unidade	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
pH H ₂ O	—	4,8	5,4	4,8	5,0
Índice SMP	—	6,4	6,9	5,7	6,4
Argila	%	5	5	5	5
Matéria orgânica	%	0,7	0,2	1,2	0,5
P	mg L ⁻¹	26,5	26,6	11,8	13,1
K	mg L ⁻¹	44	20	24	12
Ca	cmolc L ⁻¹	0,54	0,24	0,62	0,55
Mg	cmolc L ⁻¹	0,22	0,12	0,29	0,18
Al	cmolc L ⁻¹	0,31	0,00	0,63	0,36
H+Al	cmolc L ⁻¹	2,8	1,6	6,2	2,8
CTC efetiva	cmolc L ⁻¹	1,2	0,4	1,6	1,1
CTC pH 7,0	cmolc L ⁻¹	3,7	2,0	7,2	3,6
Saturação por bases	%	23,5	20,6	13,6	21,2
Saturação por Al	%	25,8	0,0	39,4	32,7
Zn	mg L ⁻¹	0,64	0,34	0,32	0,26
Cu	mg L ⁻¹	0,63	0,48	0,48	0,7
S	mg L ⁻¹	6,6	2,5	7,5	4,0
B	mg L ⁻¹	0,25	0,47	0,65	0,76
Fe	mg L ⁻¹	120,46	92,75	155,49	119,49
Mn	mg L ⁻¹	7,78	5,85	6,82	5,72

Fonte: elaborado pela autora (2026).

Nota: Amostras coletadas na camada de 0,00–0,20 m de Neossolo Quartzarênico, no mesmo local, em pontos distintos. Resultados conforme laudo do Laboratório de Análise de Solo (UFSM).

Cada tratamento foi aplicado manualmente, incorporando-se a dose do lodo ao solo de forma homogênea em baldes de 10 L. A correção da acidez do solo foi realizada com calcário dolomítico, conforme necessidade previamente determinada, e a adubação complementar foi realizada com cloreto de potássio (KCl) e superfosfato triplo (SFT) para elevar os teores de P disponível e K trocável até o limite superior do nível “médio” de cada elemento (CQFS-RS/SC, 2016).

A cultivar de azevém BRS Integração (*Lolium multiflorum* Lam.) foi semeada a lanço no dia 15 de abril de 2025, diretamente nos baldes na quantidade de 0,5 g por unidade experimental, sem desbaste posterior, mantendo a população de plantas

intacta. Após a emergência e o estabelecimento inicial das plantas, quando se observou a presença de três plantas por unidade experimental, realizou-se a primeira aplicação de ureia, como fonte de nitrogênio. Foram realizados 5 cortes da parte aérea, com intervalo de 28 dias entre cada corte, visando simular manejo sob pastejo, mantendo-se altura residual de 0,08 m após cada corte. Após cada avaliação, aplicou-se ureia como fonte de nitrogênio, na dose de 45 kg N ha⁻¹, com objetivo de estimular a rebrota e manter suprimento adequado de N ao longo do ciclo experimental.

As amostras da parte aérea das plantas foram coletadas após cada corte, secas em estufa a 65 °C até atingir peso constante, moídas em moinho do tipo Willey e, posteriormente, submetidas à digestão ácida úmida, utilizando uma mistura de ácido nítrico (HNO₃) e peróxido de hidrogênio (H₂O₂), conforme a metodologia descrita por Tedesco *et al.* (1995). Os extratos obtidos foram analisados na Central Analítica da Embrapa Clima Temperado, em equipamento do tipo MIP (Microwave Induced Plasma), para a determinação dos teores de macro e micronutrientes.

Foram quantificados os teores de nitrogênio (N), fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K), alumínio (Al), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn), boro (B), cobre (Cu), molibdênio (Mo), níquel (Ni) e cobalto (Co). Os resultados foram expressos em g kg⁻¹ ou mg kg⁻¹, conforme o elemento avaliado. A partir dos teores e da produção de matéria seca, foram calculados os acúmulos de nutrientes por unidade experimental.

A matéria seca (MS) da parte aérea foi submetida à análise de variância (ANOVA), seguida do teste de comparações múltiplas de Tukey, com nível de significância de 5%.

Os dados das variáveis-resposta referentes aos teores de N, P, Ca, Mg, K, Al, Fe, Mn, Zn, B, Cu, Mo e Ni no tecido vegetal foram inicialmente avaliados quanto ao atendimento aos pressupostos estatísticos básicos. A normalidade dos resíduos foi verificada pelo teste de Shapiro–Wilk, enquanto a homogeneidade das variâncias foi avaliada pelo teste de Levene.

Os teores de cobalto (Co) no tecido vegetal foram inferiores ao limite de quantificação do método em todos os tratamentos avaliados, não sendo possível realizar análise estatística dessa variável.

Após o atendimento aos pressupostos estatísticos, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), e a significância dos efeitos foi avaliada pelo teste F, adotando-se o nível de significância de 5%.

A análise estatística foi conduzida utilizando a linguagem de programação Python (versão 3.12.x), em ambiente Visual Studio Code. A organização e o tratamento dos dados foram realizados com o auxílio das bibliotecas Pandas e NumPy, a visualização gráfica com Matplotlib e Seaborn, e as análises estatísticas com a biblioteca Statsmodels.

Os dados referentes aos tratamentos do LETA e da mistura LETA:LETE, ambos nas condições de pH corrigido e não corrigido, aplicados na dose de 60 t ha⁻¹, foram submetidos à análise estatística no software Winstat, com a análise da variância (ANOVA), avaliada pelo teste F (nível de significância de 5%) e a respectiva comparação de médias pelo teste de Tukey, adotando-se o nível de significância de 5%.

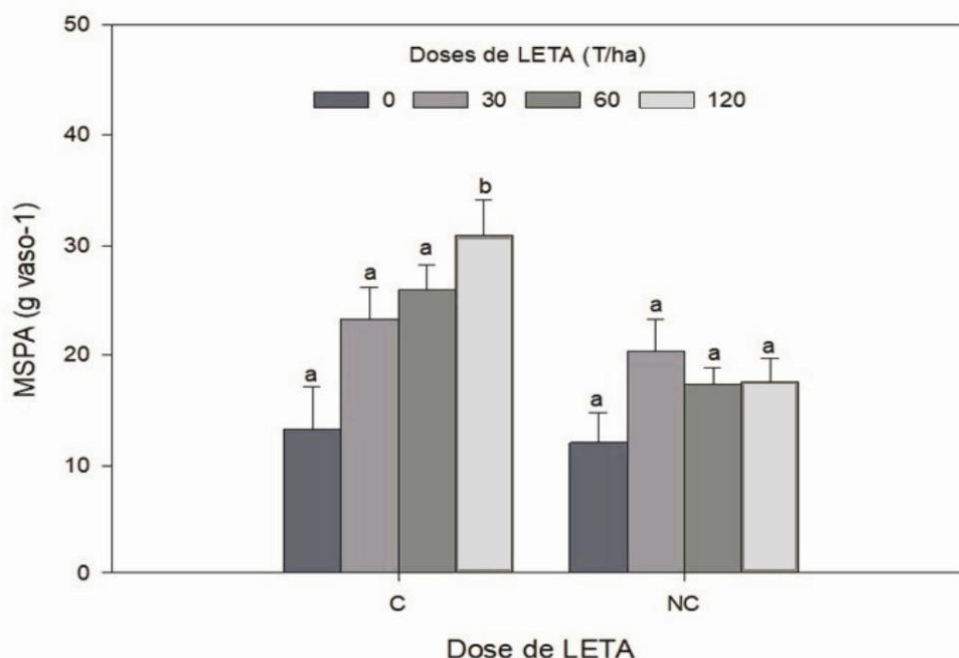
3.3 Resultados e discussão

3.3.1 Desempenho da aplicação de LETAs sobre a massa seca de azevém

A produção de massa seca é um indicador direto do desempenho agrônomo das plantas e, fornece a base para a interpretação dos resultados de nutrição vegetal e de acúmulo de nutrientes. Assim, inicialmente avaliou-se a resposta da biomassa do azevém às doses e ao tipo de LETA aplicado.

O tipo de LETA aplicado influencia diretamente o desempenho do azevém, uma vez que, a correção do pH do resíduo altera as condições químicas do próprio material e consequentemente do solo, especialmente a disponibilidade de nutrientes e a solubilidade de elementos potencialmente tóxicos (Silva *et al.*, 2015). Nesse contexto, a Figura 3, apresenta a massa seca da parte aérea (MSPA) do azevém em função das doses de LETA, comparando-se os lodos com pH corrigido (C) e pH não corrigido (NC).

Figura 3 - Massa seca da parte aérea (MSPA, g vaso⁻¹) acumulada de plantas de azevém obtida após 5 cortes em função das doses de LETA (0, 30, 60 e 120 t ha⁻¹), aplicadas na forma corrigida (C) e não corrigida (NC)



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Nota: Médias seguidas por letras distintas diferem entre si no teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Os resultados indicam que o uso de LETA corrigido aumenta a produção de massa seca de azevém em solos arenosos, desde que o resíduo seja previamente corrigido quanto ao pH. No tratamento de LETA corrigido (C), observa-se aumento crescente da massa seca acumulada de azevém após 5 cortes à medida que as doses aumentam, passando de 13 g na dose 0 (testemunha) à 23,38 g em 30 t ha⁻¹, 26 g em 60 t ha⁻¹ e 30,92 g em 120 t ha⁻¹. A resposta positiva observada nas doses crescentes de LETA corrigido evidencia a importância da neutralização da acidez para reduzir a disponibilidade de elementos potencialmente tóxicos, como Al, Fe e Mn, criando condições mais favoráveis ao crescimento vegetal (Rio Grande do Sul, 2022).

Já no LETA não corrigido, a resposta às doses foi bastante limitada, sem diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos. A produtividade variou de 12,1 g (testemunha) à 20,4 g (30 t ha⁻¹), mas, nas doses mais elevadas (60 e 120 t ha⁻¹), permaneceu em torno de 17 g. Esse comportamento é indicativo à maior disponibilidade de elementos potencialmente tóxicos, como alumínio e manganês, em condições de ausência de correção do pH, os quais tendem a limitar o crescimento das plantas (Ribeiro *et al.*, 2022).

Em contraste, o desempenho limitado do LETA não corrigido, especialmente nas doses mais elevadas, indica restrições ao desenvolvimento da cultura em ambientes mais ácidos, evidenciando a importância da correção do pH como condição fundamental para o desenvolvimento da forrageira. O fator Tipo de LETA apresentou efeito altamente significativo ($p < 0,001$), com médias superiores nos tratamentos com lodo com pH corrigido, refletindo diretamente na produtividade e no maior acúmulo de biomassa, enquanto o LETA não corrigido apresentou valores inferiores. Esse comportamento está de acordo com os resultados apresentados por Ribeiro et al. (2022), que destacam a correção alcalina como etapa fundamental para a eficiência agrônômica e a segurança ambiental da aplicação de LETAs em solos arenosos.

No LETA não corrigido, a resposta às doses foi limitada, sem diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos. A produtividade variou de 12,1 g (testemunha) à 20,4 g (30 t ha^{-1}), mantendo-se em torno de 17 g nas doses de 60 e 120 t ha^{-1} , comportamento indicativo da maior disponibilidade de elementos potencialmente tóxicos, como alumínio e manganês, em condições de ausência de correção do pH, os quais tendem a limitar o crescimento das plantas (Ribeiro et al., 2022).

De forma complementar aos resultados quantitativos de produção de massa seca, a Figura 4 apresenta o aspecto visual das plantas de azevém cultivadas sob diferentes tratamentos, evidenciando diferenças no crescimento vegetativo entre as condições avaliadas.

Figura 4 - Desenvolvimento vegetativo de plantas de azevém (*Lolium multiflorum* Lam.) submetidas à aplicação de diferentes tipos e doses de LETA corrigido e LETE corrigido



Fonte: elaborado pela autora (2026).

Nota: A = 0 t ha^{-1} ; B = 30 t ha^{-1} ; C = 60 t ha^{-1} ; D = 120 t ha^{-1} ; E = mistura LETA + LETE (60 t ha^{-1}).

Na Tabela 3 são apresentados os valores de massa seca da parte aérea, evidenciando maior acúmulo quando utilizado LETA corrigido em relação ao não corrigido.

Tabela 3 - Valores médios da massa seca da parte aérea (MSPA, g vaso⁻¹) acumulada de 5 cortes, em função do tipo de LETA (corrigido e não corrigido)

Tipo de LETA	Médias	nObs	G1
Corrigido	23,39	16	a
Não corrigido	16,84	16	b

Fonte: elaborado pela autora (2026).

Nota: Médias = Médias da variável; nObs = número de observações; G1 = grupo de médias homogêneas. Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

3.3.2 Teores de nutrientes no tecido vegetal de plantas de azevém

A análise de macro e micronutrientes do tecido vegetal fornece informações relevantes sobre o estado nutricional das plantas, permitindo identificar desequilíbrios nutricionais durante o crescimento. Associada à análise do solo, essa abordagem auxilia na compreensão da dinâmica de absorção de nutrientes pelas plantas. (Embrapa, 2005). Diante disso, os resultados de elementos do tecido vegetal de azevém permitem compreender, como o tipo e a dose de LETA afetam o desempenho das plantas.

Os teores de macro e micronutrientes no tecido vegetal de azevém (*Lolium multiflorum* Lam.) são apresentados a seguir como um resumo da análise de variância, com o objetivo de sintetizar os efeitos do tipo de LETA, das doses aplicadas e da interação entre esses fatores (Tabela 4).

Essa abordagem permite identificar, de forma clara, quais nutrientes responderam significativamente aos tratamentos, servindo como base para a apresentação e discussão dos resultados individuais de teor e acúmulo de nutrientes ao longo desta seção.

Tabela 4 - Resumo da análise de variância para os teores de macro e micronutrientes no tecido vegetal de azevém (*Lolium multiflorum* Lam.)

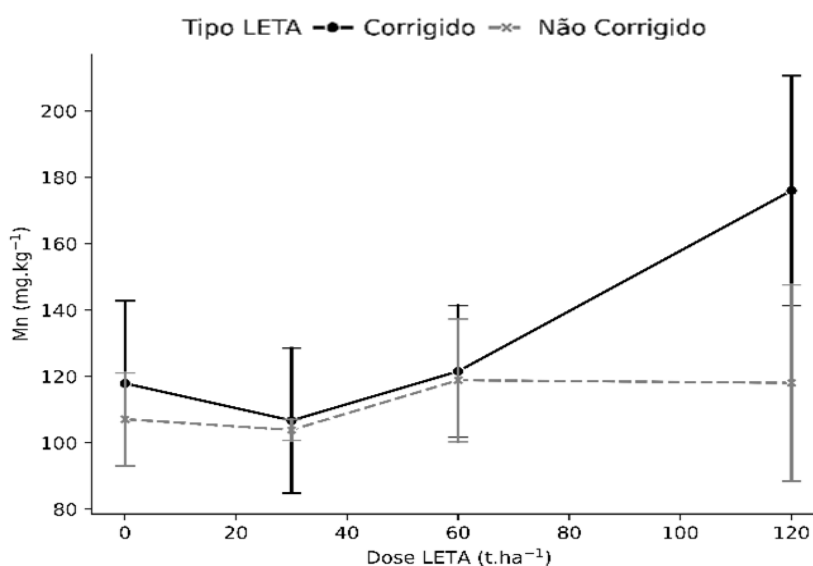
Fonte de Variação	Significância													
	Teores de macro e micronutrientes em tecido vegetal de azevém													
	N	P	K	Ca	Na	Mg	Zn	Al	Fe	Mn	B	Ni	Cu	Mo
Tipo de LETA (P)	NS	NS	NS	NS	*	NS	*	*	NS	NS	NS	*	NS	*
Dose (S)	NS	*	*	NS	*	NS	NS	NS	NS	*	NS	NS	*	*
Interação P x S	NS	NS	NS	NS	*	NS	NS	NS	NS	*	NS	*	NS	NS

Fonte: elaborado pela autora (2026).

Nota: NS = não significativo; * = significativo pelo teste F ($p \leq 0,05$).

Os resultados da análise de variância para os teores no tecido vegetal evidenciam respostas pontuais aos tratamentos, dependentes do elemento avaliado, não havendo alteração uniforme entre os tratamentos. A discussão a seguir é conduzida individualmente para cada elemento. Entre os micronutrientes avaliados, o manganês (Mn) merece destaque por apresentar elevada sensibilidade às variações de pH e por estar presente em concentrações relevantes nos LETAs (Figura 5).

Figura 5 - Variação dos teores de Manganês (Mn) em função dos tipos de LETA (corrigido e não corrigido e doses de LETA (0, 30, 60 e 120 t ha⁻¹) na parte aérea de plantas de azevém (*Lolium multiflorum* Lam.)

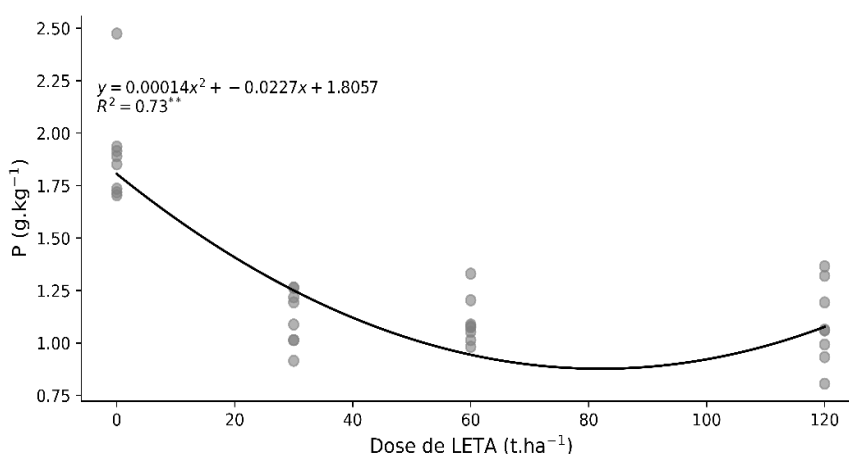


Fonte: elaborado pela autora (2026).

Para o manganês (Mn), a análise estatística não indicou efeito significativo das doses de LETA, nem da interação entre dose e correção do resíduo. No entanto, houve efeito significativo do tipo de LETA, com maiores teores de Mn observados nos tratamentos com LETA corrigido em comparação ao não corrigido. Esse resultado indica que a variação nos teores de Mn esteve mais associada à correção do material do que ao aumento das doses aplicadas, corroborando com resultados encontrados por Ribeiro *et al.*, 2022.

O fósforo é um dos nutrientes mais diretamente afetados pela aplicação de LETAs, devido à sua elevada afinidade com os óxidos de alumínio e ferro presentes nesses resíduos (Figura 6).

Figura 6 - Teores de fósforo (P) em função das doses de LETA em plantas de azevém (*Lolium multiflorum* Lam.)



Fonte: elaborado pela autora (2026).

Nota: Os pontos representam observações individuais e as curvas indicam modelos de regressão Significativos ($p \leq 0,05$).

Como apresentado na Figura 6, o teor de fósforo (P) no tecido vegetal foi significativamente afetado pelas doses de LETA (0, 30, 60 e 120 t ha⁻¹), independentemente do tipo de material (LETA), ajustando-se a um modelo quadrático. Observa-se uma redução dos teores de P até doses intermediárias, seguida de tendência de estabilização ou de leve aumento nas doses mais elevadas.

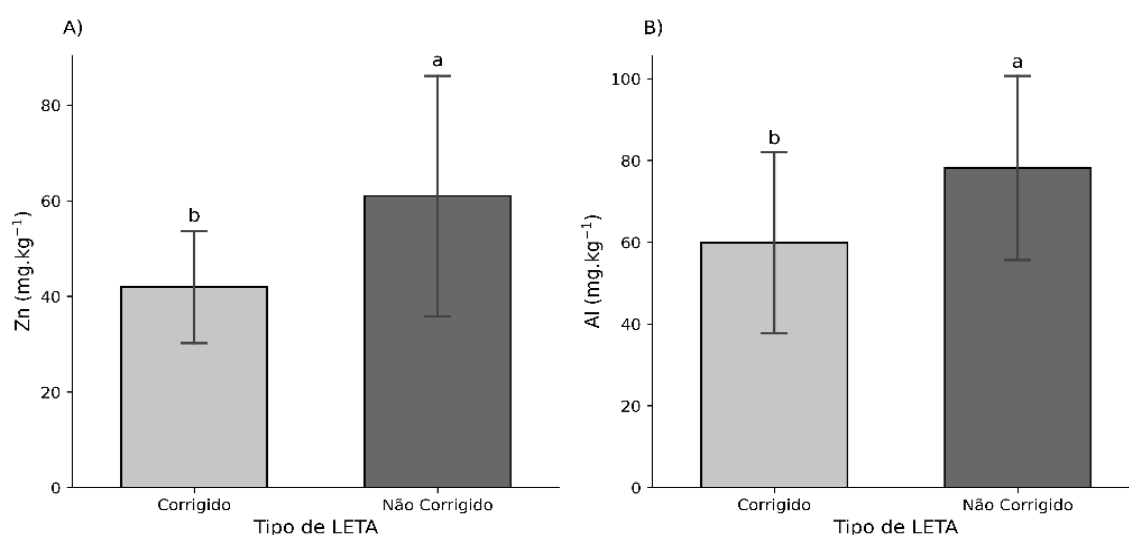
Esse comportamento tem sido associado à aplicação de resíduos ricos em óxidos de alumínio e ferro, como os lodos de ETA, que apresentam elevada afinidade pelo fósforo, favorecendo sua adsorção às superfícies reativas e reduzindo a fração disponível na solução do solo para absorção pelas plantas (Ippolito *et al.*, 2011; Lombi *et al.*, 2010). Dessa forma, a aplicação de doses elevadas de LETA pode limitar a

disponibilidade de P às plantas, mesmo em solos com teores totais elevados, reforçando a necessidade de manejo criterioso das taxas de aplicação desse resíduo.

Assim, a resposta quadrática observada indica que o aumento das doses de LETA nem sempre se traduz em maior disponibilidade de P para as plantas, especialmente em solos arenosos.

Além dos nutrientes essenciais, avaliou-se o comportamento de elementos potencialmente limitantes ao crescimento vegetal. Nesse contexto, a Figura 7 apresenta os teores de zinco (Zn) e alumínio (Al) em função do tipo de LETA. Enquanto o Zn é um micronutriente essencial, o Al é um elemento tóxico para as plantas em geral.

Figura 7 - Teor de zinco (Zn) e de alumínio (Al) (mg kg^{-1}) em plantas de azevém (*Lolium multiflorum* Lam.) submetidas a diferentes tipos de LETA (corrigido e não corrigido)



Fonte: elaborado pela autora (2026).

Os teores de zinco (Zn) e alumínio (Al) foram influenciados significativamente apenas pelo fator Tipo de LETA ($p \leq 0,05$), não apresentando resposta significativa às doses aplicadas nem à interação entre os fatores. Observou-se que as plantas cultivadas com o LETA corrigido apresentaram teores médios de Zn e Al inferiores aos obtidos com o material não corrigido, com valores de 41,96 ($\pm 11,74$) e 61,01 ($\pm 25,12$), respectivamente, em contraste com os valores obtidos com o material não corrigido: 59,86 ($\pm 22,16$) e 78,16 ($\pm 22,51$) para Zn e Al, respectivamente (Figura 6).

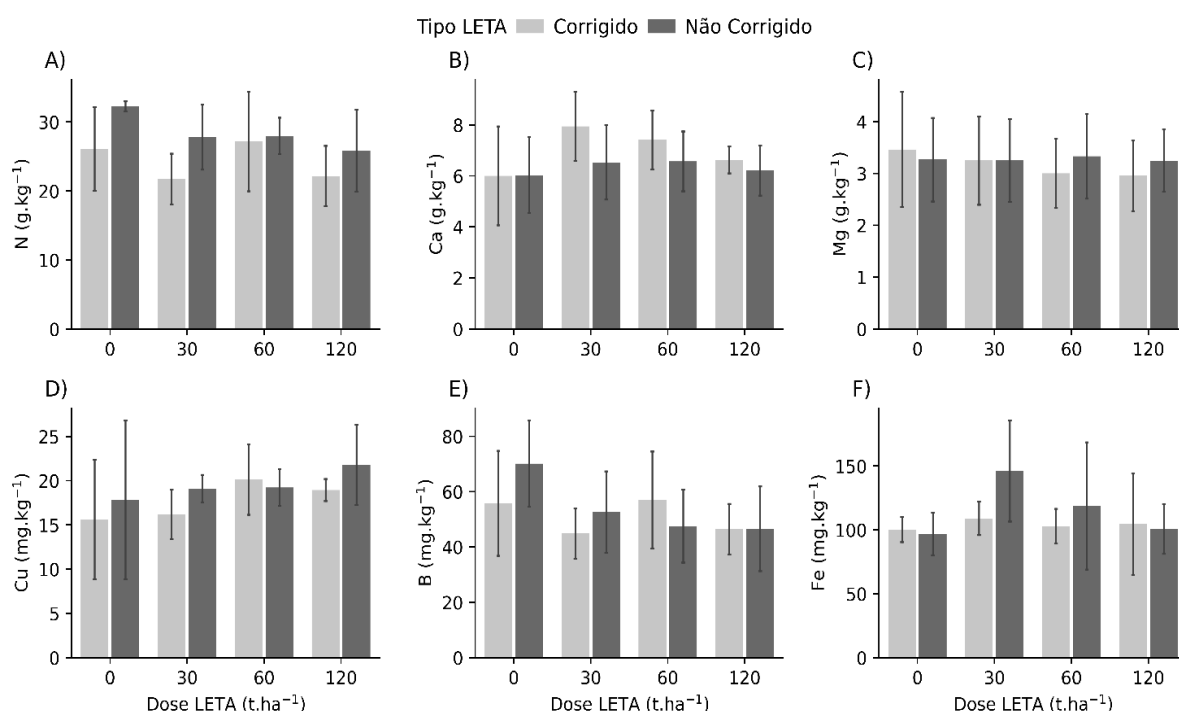
A correção alcalina do LETA promoveu redução significativa nos teores de alumínio (Al) e zinco (Zn) no tecido vegetal de azevém (Figura 7). Para o Al, a menor concentração observada no tratamento corrigido está associada à diminuição da

atividade desse elemento na solução do solo em condições de pH mais elevado, o que reduz sua solubilidade e, conseqüentemente, sua absorção pelas plantas (Rahman *et al.*, 2018).

De forma semelhante, o tecido vegetal de azevém apresentou menores teores de Zn após a aplicação do LETA corrigido, comportamento compatível com a redução de sua disponibilidade à medida que o pH do solo aumenta, em função da maior retenção desse micronutriente no solo e da diminuição da concentração de Zn^{2+} na solução do solo, visto que se trata de um micronutriente catiônico, cuja disponibilidade é reduzida com a correção da acidez (Villanueva *et al.*, 2012).

Para alguns nutrientes, a aplicação de LETA não resultou em alterações significativas nos teores do tecido vegetal, indicando estabilidade nutricional entre os tratamentos (Figura 8).

Figura 8 - Teores de nitrogênio (N), cálcio (Ca), magnésio (Mg), cobre (Cu), boro (B) e ferro (Fe) ($mg\ kg^{-1}$) em plantas de azevém, submetidas a diferentes doses e tipos de LETA (corrigido e não corrigido)



Fonte: elaborado pela autora (2026).

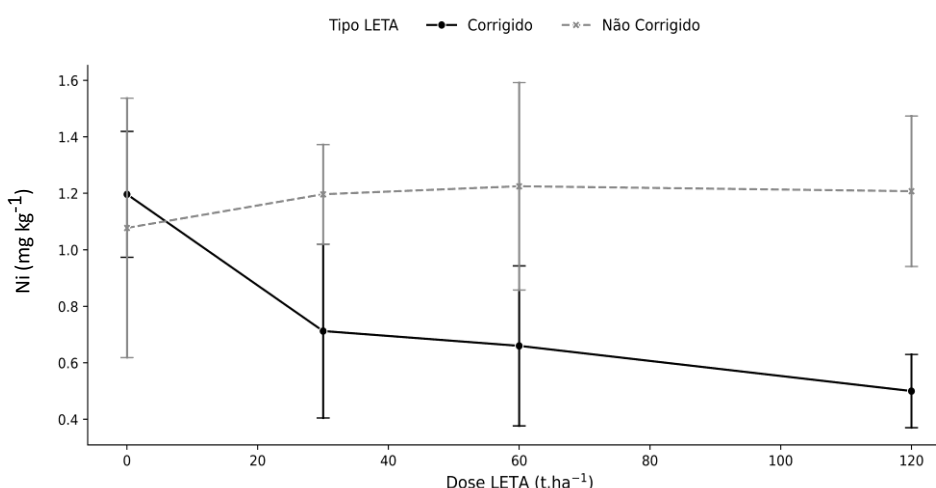
De acordo com a Figura 8, não foram observados diferenças significativas nos teores de nitrogênio (N), cálcio (Ca), magnésio (Mg), cobre (Cu), boro (B) e ferro (Fe) em função do tipo de LETA ou das doses aplicadas. A ausência de efeito significativo indica que, para esses elementos, a aplicação de LETA nas doses avaliadas não alterou de forma consistente a concentração no tecido vegetal.

Esse comportamento é compatível com o efeito de diluição da biomassa, no qual, variações no crescimento vegetal não se refletem necessariamente em alterações na concentração de nutrientes no tecido vegetal (Marschner, 2012).

Portanto, a aplicação de LETA nas doses avaliadas não promoveu desequilíbrios nutricionais nos elementos analisados, indicando segurança agrônômica quanto a esses nutrientes.

Observou-se interação significativa entre o tipo de LETA e as doses aplicadas sobre o teor de níquel no tecido vegetal de azevém, conforme mostrado na Figura 9.

Figura 9 – Interação entre tipo de LETA (corrigido e não corrigido) e doses aplicadas (0, 30, 60 e 120 t ha⁻¹) para o teor de níquel no tecido vegetal de azevém



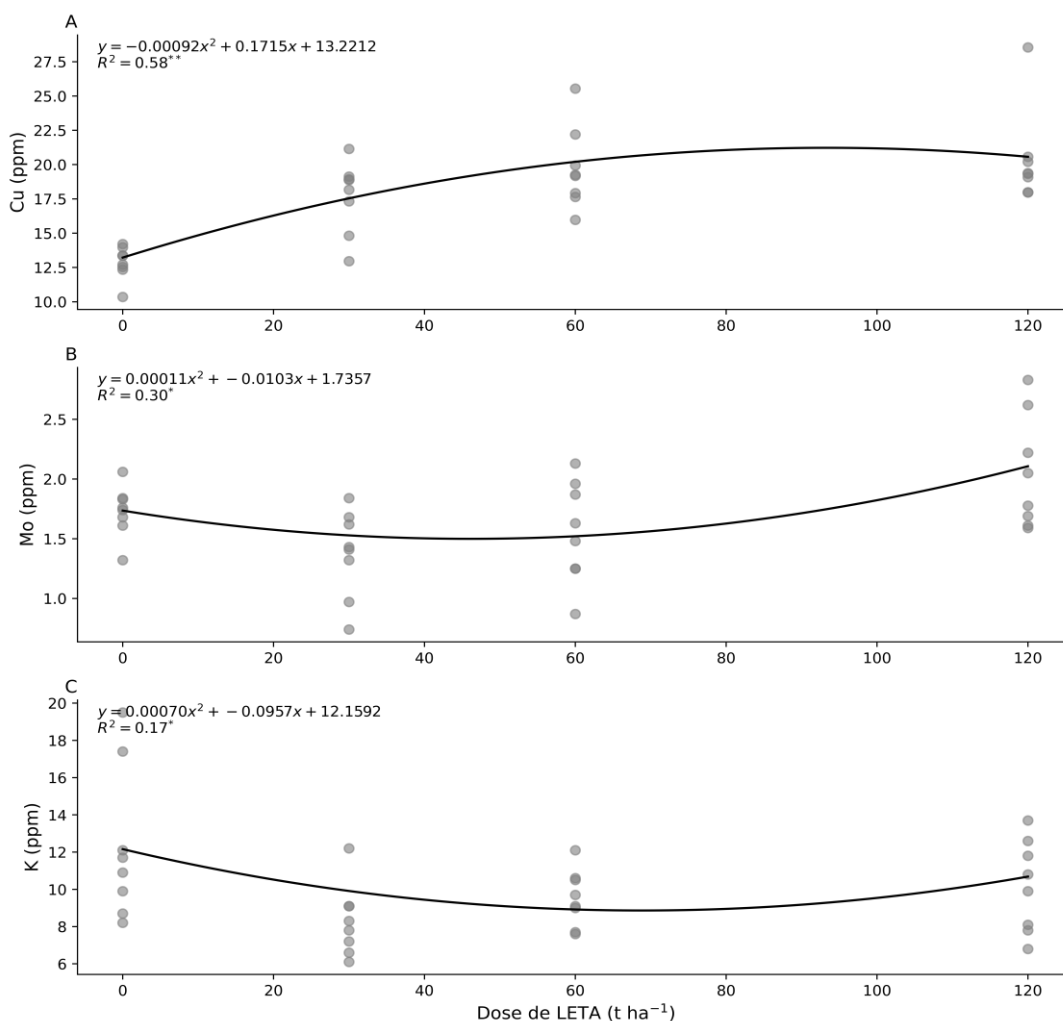
Fonte: elaborado pela autora (2026).

Pode-se observar que na Figura 9 que, para o LETA corrigido, o teor de Ni apresentou decréscimo com o aumento das doses, partindo de valores mais elevados na dose 0 t ha⁻¹ e atingindo menores teores na dose de 120 t ha⁻¹. Para o LETA não corrigido, os teores de Ni mantiveram-se relativamente constantes ao longo das doses, com valores entre 1,0 e 1,2 mg kg⁻¹. Na comparação entre os tipos de LETA, verifica-se que, a partir da dose de 30 t ha⁻¹, os teores de Ni foram superiores no LETA não corrigido.

De modo geral, os tratamentos avaliados não resultaram em concentrações de metais no tecido vegetal do azevém que indiquem risco de contaminação. Mesmo com a variação observada nos teores de níquel em função da correção da acidez, os valores permaneceram abaixo dos limites considerados adequados para plantas, conforme os critérios de suficiência e toxicidade descritos por Malavolta (2006).

A Figura 10 apresenta o efeito das doses de LETA corrigido sobre os teores de cobre (Cu), molibdênio (Mo) e potássio (K) nos tecidos de plantas de azevém, com ajuste de modelos de regressão, permitindo avaliar a resposta desses nutrientes ao aumento das doses aplicadas.

Figura 10 - Teores de Cobre (Cu) (A), Molibdênio (Mo) (B) e Potássio (K) (C) em função das doses de LETA em tecidos de plantas de azevém (*Lolium multiflorum* Lam.)



Fonte: elaborado pela autora (2026).

Nota: Os pontos representam observações individuais e as curvas indicam modelos de regressão significativos ($p \leq 0,05$).

Para o Cu (Figura 10A), observa-se resposta quadrática às doses de LETA, com aumento dos teores a partir da dose 0 até o valor máximo de 93 t ha⁻¹. O modelo ajustado explica 58% da variação observada.

Para o Mo (Figura 10B), os teores também se ajustam a um modelo quadrático, caracterizado por redução inicial com aumento das doses até valores intermediários,

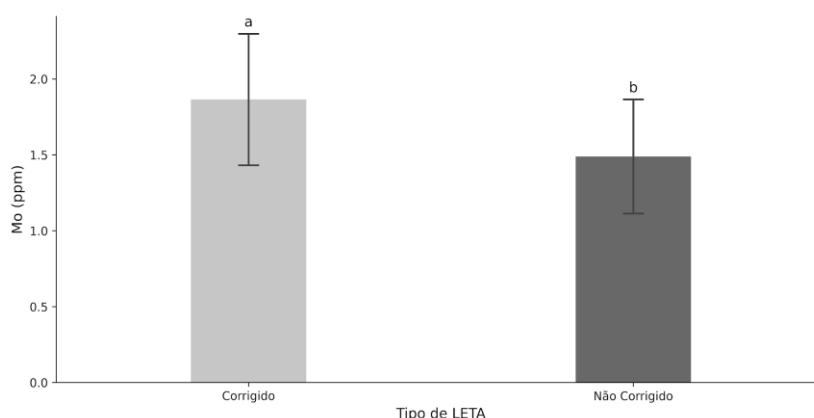
com valor mínimo estimado na dose de 47 t ha⁻¹, seguida de incremento nas doses mais elevadas, com coeficiente de determinação de 30%.

No caso do K (Figura 10C), observa-se tendência de comportamento quadrático, com redução dos teores da dose 0 até doses intermediárias e posterior aumento na maior dose de LETA. No entanto, esse ajuste deve ser interpretado com cautela, uma vez que o modelo apresentou baixo coeficiente de determinação ($R^2 = 0,17$), explicando apenas pequena parte da variabilidade dos dados.

As variações observadas nos teores de Cu, Mo e K em função das doses de LETA refletem ajustes na disponibilidade e na absorção desses elementos pelas plantas, sem indicar desequilíbrios nutricionais (Malavolta, 2006). Para esses nutrientes avaliados, os valores permaneceram dentro das faixas consideradas adequadas para o desenvolvimento vegetal, mesmo nas maiores doses aplicadas. Esses resultados indicam que a aplicação de LETA altera a dinâmica de nutrientes no tecido vegetal de forma controlada, sem evidência de excesso ou deficiência nas condições avaliadas.

A Figura 11 apresenta o teor de molibdênio em tecidos de plantas de azevém em função dos tipos de LETA. Observa-se que o LETA corrigido resultou em maior teor de Mo em comparação ao LETA não corrigido.

Figura 11 - Teor Molibdênio (Mo) em tecidos de plantas de azevém (*Lolium multiflorum* Lam.) submetidas a diferentes tipos de LETA (corrigido e não corrigido)



Fonte: elaborado pela autora (2026).

O maior teor de Mo observado no LETA corrigido está associado ao aumento da disponibilidade desse elemento em condições de pH mais elevado. Diferente de outros micronutrientes, o Mo é favorecido em ambientes menos ácidos, o que explica

os valores mais elevados no tratamento corrigido, mantendo-se dentro de faixas adequadas para o desenvolvimento vegetal, descritas por Malavolta (2006).

De modo geral, os tratamentos avaliados não resultaram em concentrações de metais no tecido vegetal do azevém que indiquem risco de contaminação. Esses resultados são relevantes considerando o uso do azevém como planta de cobertura e como forrageira, indicando segurança quanto à aplicação agrícola do LETA nas condições avaliadas. De forma consistente, estudos de revisão apontam que LETAs, na maioria dos casos, não apresentam teores relevantes de metais pesados capazes de restringir seu uso agrícola, ainda que ressaltem a importância da caracterização química prévia em função da variabilidade desses materiais (Zhao *et al.*, 2018).

3.3.3 Acumulados de nutrientes no tecido vegetal de azevém

Embora os teores indiquem a concentração dos elementos no tecido vegetal, o acúmulo permite avaliar a quantidade total absorvida pelas plantas, considerando a produção de biomassa. A Tabela 5 apresenta o resumo da análise de variância para os acumulados de elementos no tecido vegetal de azevém, evidenciando os efeitos do tipo de LETA, das doses aplicadas e da interação entre esses fatores.

Os resultados de acumulados evidenciam respostas diferenciadas entre os elementos avaliados, com maior destaque para o efeito das doses e da interação entre os fatores. A seguir, os acumulados são discutidos individualmente para cada elemento, considerando as respostas observadas no tecido vegetal.

Tabela 5 - Resumo da análise de variância para os acumulados de elementos no tecido vegetal de azevém (*Lolium multiflorum* Lam.)

Fonte de Variação	Significância													
	Acumulados de macro e micronutrientes em tecido vegetal de azevém													
	N	P	K	Ca	Na	Mg	Zn	Al	Fe	Mn	B	Ni	Cu	Mo
Tipo de LETA (P)	NS	*	*	*	*	NS	NS	NS	*	*	NS	NS	*	*
Dose (S)	*	NS	*	*	*	*	NS	*	*	*	*	NS	*	*
Interação P x S	*	NS	*	NS	NS	NS	NS	*	*	*	*	*	*	*

Fonte: elaborado pela autora (2026).

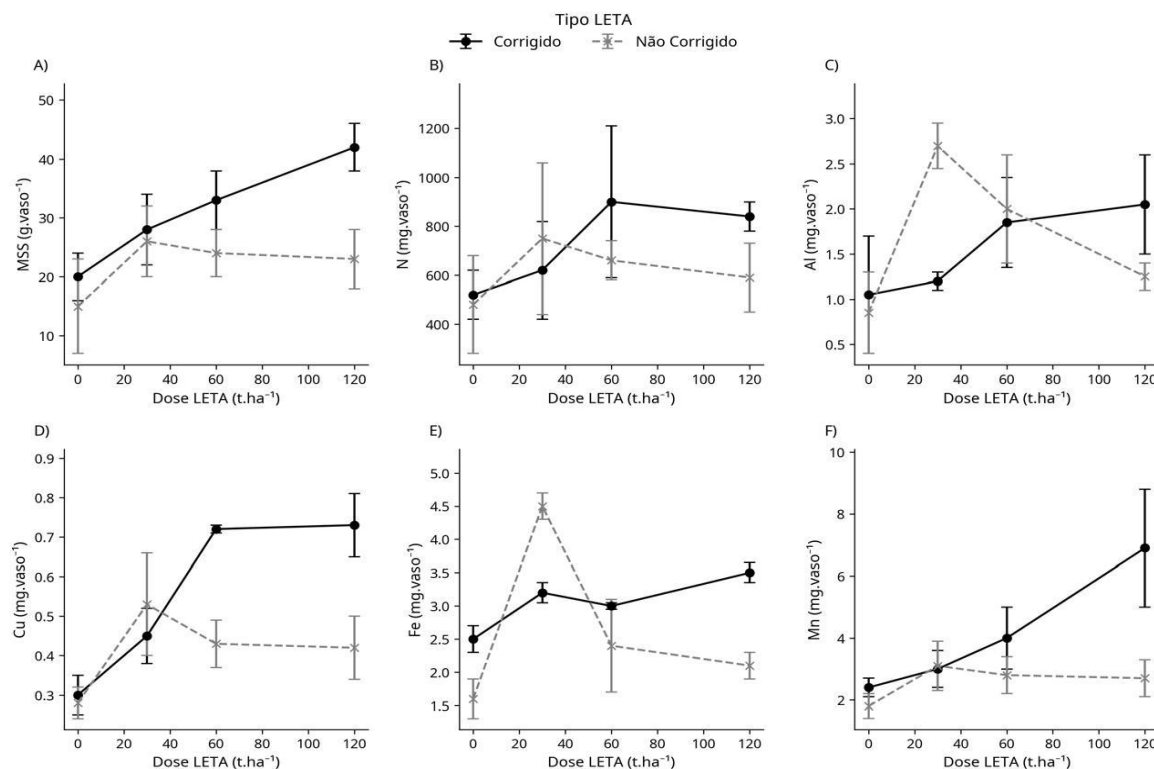
Nota: NS = não significativo; * = significativo pelo teste F ($p \leq 0,05$).

Os resultados de acumulados evidenciam respostas diferenciadas entre os elementos avaliados, com maior destaque para o efeito das doses e da interação entre

os fatores. A seguir, os acumulados são discutidos individualmente para cada elemento, considerando as respostas observadas no tecido vegetal.

Assim, a Figura 12 apresenta a interação entre o tipo de LETA e a dose aplicada na produção de massa seca e no acúmulo de nutrientes e elementos no azevém.

Figura 12 - Interação entre tipo de LETA (corrigido e não corrigido) e doses aplicadas (0, 30, 60 e 120 t ha⁻¹) sobre o acúmulo de massa seca (MS) e de nitrogênio (N), alumínio (Al), cobre (Cu), ferro (Fe) e manganês (Mn) em plantas de azevém



Fonte: elaborado pela autora (2026).

Conforme a Figura 12A, a produção de massa seca do azevém apresentou interação significativa entre o tipo de LETA e a dose. O LETA corrigido promoveu aumento contínuo da biomassa desde a dose 0 até 120 t ha⁻¹, enquanto o LETA não corrigido apresentou incremento até a dose de 30 t ha⁻¹, seguido de estabilização nas doses de 60 e 120 t ha⁻¹, evidenciando que a correção alcalina do resíduo foi determinante para o crescimento vegetal em doses mais elevadas.

Conforme as Figuras 12B a 12F, o acúmulo de N, Al, Cu, Fe e Mn apresentaram interação significativa entre tipo de LETA e dose, refletindo principalmente as diferenças na produção de biomassa entre os tratamentos. No LETA corrigido, observou-se maior acúmulo desses elementos nas doses de 60 e 120 t ha⁻¹, enquanto, no LETA não corrigido, os maiores valores concentraram-se na dose de 30

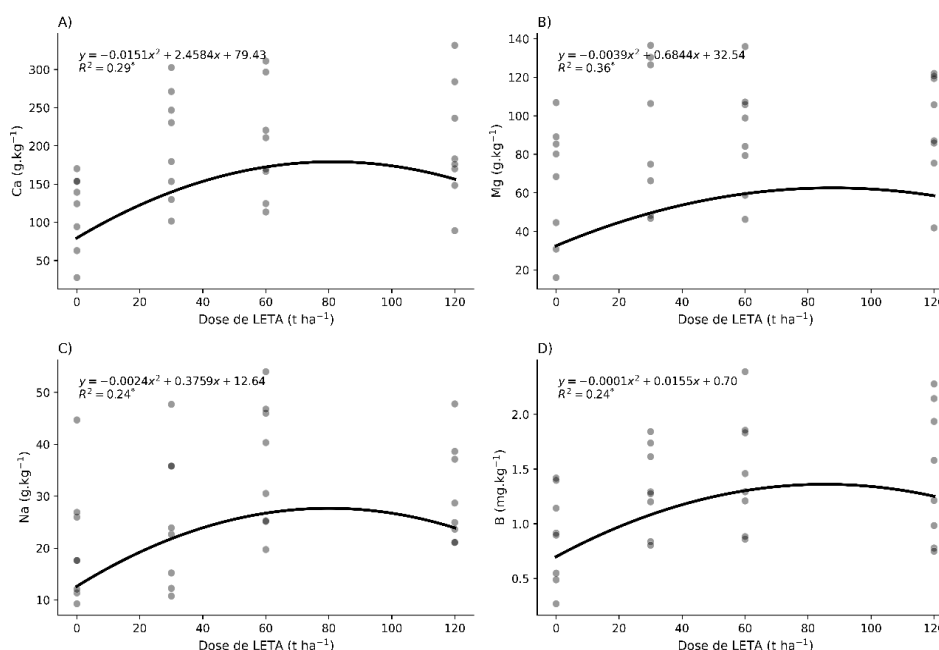
t ha⁻¹, com redução ou estabilização nas doses superiores, indicando que doses mais elevadas não resultaram em ganhos adicionais de crescimento, limitando o acúmulo total dos elementos.

Portanto, em condições de maior acidez, o aumento da dose do resíduo não resulta em um maior uso de nutrientes pela planta, podendo inclusive intensificar processos de imobilização ou interferências químicas na absorção, especialmente para Fe, Mn e Cu, que tendem a permanecer retidos no próprio LETA, limitando sua absorção pelas plantas em doses mais elevadas (Ippolito; Barbarick; Elliott, 2011).

De forma integrada, os resultados demonstram que o acúmulo de N, Al, Cu, Fe e Mn foi condicionado principalmente pela resposta da biomassa, sendo favorecido no LETA corrigido em doses mais elevadas e limitado no LETA não corrigido. Isso reforça a importância do tratamento prévio dos LETAs como estratégia para ampliar sua eficiência agrônômica e reduzir os efeitos negativos, mesmo com o aumento das doses aplicadas.

Para alguns nutrientes, a resposta ao aumento das doses de LETA não foi linear, indicando a existência de ajuste quadrático ($p < 0,05$) e de faixas de maior eficiência de absorção, como demonstra a Figura 13.

Figura 13 - Acumulados de cálcio (Ca) (A), magnésio (Mg) (B), sódio (Na) (C) e boro (B) (D) em função das doses de LETA em plantas de azevém (*Lolium multiflorum* Lam.)



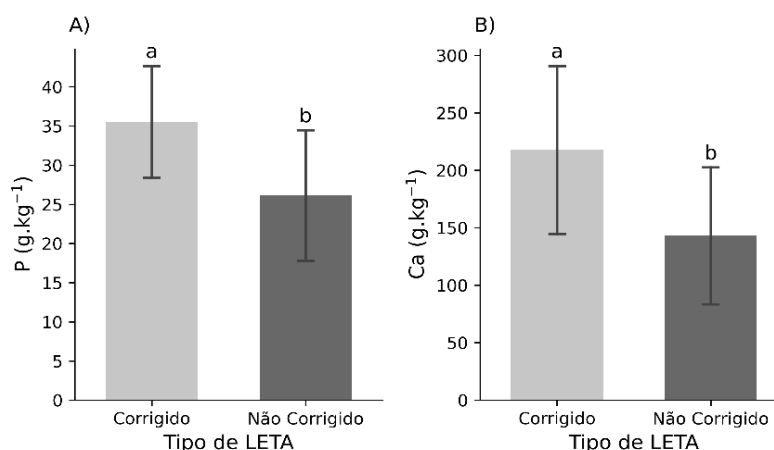
Fonte: elaborado pela autora (2026).

Nota: Os pontos representam observações individuais e as curvas indicam modelos de regressão significativos ($p \leq 0,05$).

Doses, entre 60 e 120 t ha⁻¹, favoreceram o acúmulo de Ca, Mg, na e B, enquanto o aumento das doses resultou na estabilização da resposta. Esse comportamento é comum em solos que recebem resíduos, que podem alterar a disponibilidade de nutrientes, promovendo respostas crescentes até determinado nível de aplicação (Dassanayake *et al.*, 2015). Os resultados indicam que o aumento das doses de LETA não necessariamente resulta em maior acúmulo desses nutrientes pelas plantas.

De forma complementar às respostas observadas em função das doses, avaliou-se o efeito do tipo de LETA sobre o acúmulo de fósforo e cálcio (Figura 14).

Figura 14 - Acumulado de fósforo (P) e cálcio (Ca) (mg kg⁻¹) em plantas de azevém (*Lolium multiflorum* Lam.) submetidas a diferentes tipos de LETA (corrigido e não corrigido)



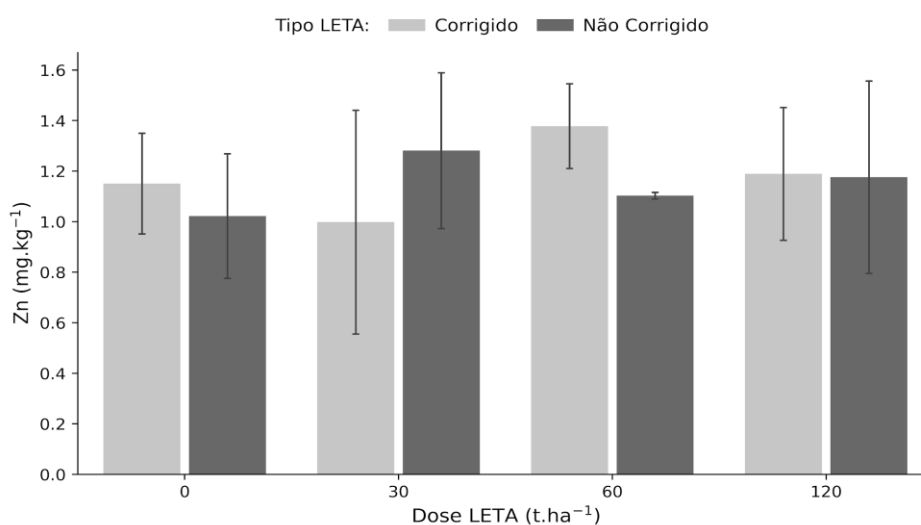
Fonte: elaborado pela autora (2026).

A Figura 14 demonstra que, independentemente da dose, a correção alcalina do LETA influenciou positivamente o acúmulo de fósforo (P) e cálcio (Ca) na parte aérea do azevém (*Lolium multiflorum*). Esse resultado indica que o condicionamento prévio do resíduo promoveu alterações químicas no solo, capazes de favorecer a disponibilidade e a absorção desses nutrientes pelas plantas. No caso do LETA, tais efeitos não estão associados ao aporte de matéria orgânica, mas principalmente à modificação do pH do solo e ao fornecimento de bases, especialmente Ca, além de influenciar a dinâmica do fósforo por meio de interações com óxidos e hidróxidos de alumínio e ferro presentes no resíduo (Santos, 2023). Estudos indicam que a correção do pH em solos tratados com LETAs pode reduzir a fixação de P e aumentar sua eficiência de absorção pelas plantas, refletindo em maior acúmulo na parte aérea (Kleemann *et al.*, 2018).

De forma integrada, os resultados indicam que a correção do LETA promove um equilíbrio mais favorável entre nutrientes essenciais e elementos potencialmente problemáticos, reforçando o papel da correção do resíduo como estratégia fundamental para o uso seguro na agricultura.

O acúmulo de zinco (Zn) no tecido vegetal de azevém em função das doses e do tipo de LETA (corrigido e não corrigido) é apresentado na Figura 15.

Figura 15 - Acumulado de zinco (Zn) em plantas de azevém (*Lolium multiflorum* Lam.) submetidas a diferentes doses e tipos de LETA (corrigido e não corrigido)



Fonte: elaborado pela autora (2026).

O nutriente Zinco (Zn) não apresentou variação significativa em resposta aos tratamentos aplicados para nenhum dos dois fatores (tipo de LETA e dose) ou a interação entre eles (Figura 15).

O Zinco apresenta baixa mobilidade no solo e sua disponibilidade para as plantas é fortemente influenciada pelo pH. Em condições mais ácidas, o Zn tende a estar mais disponível para absorção radicular, enquanto o aumento do pH favorece sua adsorção aos constituintes do solo, especialmente óxidos de ferro e alumínio e minerais de argila, reduzindo sua disponibilidade e, conseqüentemente, seu acúmulo no tecido vegetal. A variabilidade natural dos micronutrientes pode ter contribuído para a ausência de diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos.

De forma geral, a estabilidade dos teores de Zn evidencia que o uso do LETA, nas condições estudadas, não representa risco de contaminação nem de deficiência desse micronutriente.

Conforme apresenta a Tabela 6, os teores de cobalto (Co) no tecido vegetal foram inferiores ao limite de quantificação do método em todos os tratamentos avaliados, independentemente da dose e da correção do LETA.

Tabela 6 - Cobalto (Co) no tecido foliar de plantas de azevém cultivadas, sob aplicação de doses crescentes (0, 30, 60, 120 t ha⁻¹) de LETAs com pH corrigido e não corrigido

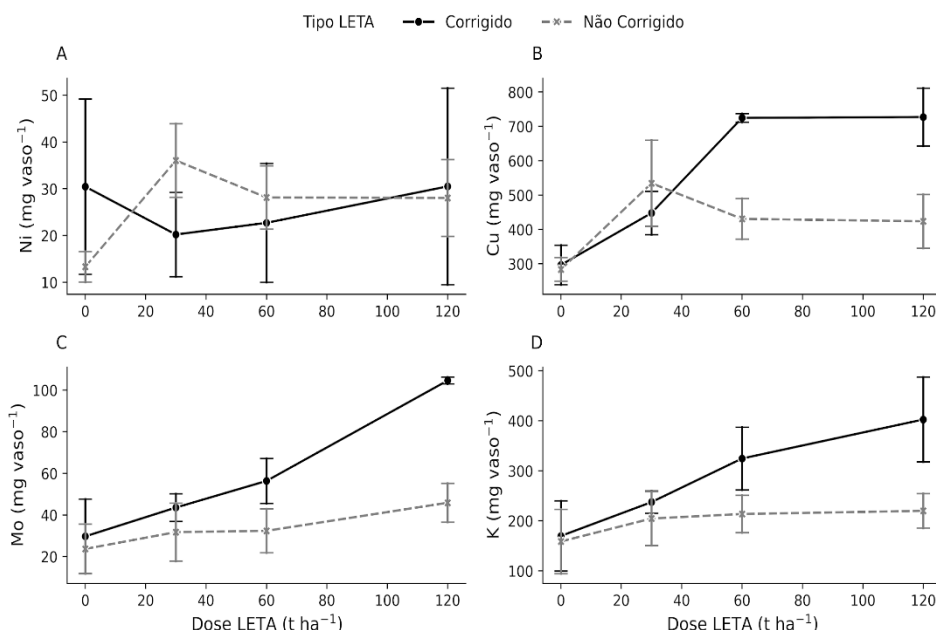
Tratamentos	Dose	Co
	mg kg ⁻¹	
LETA corrigido	0	<3,29
LETA corrigido	30	<3,29
LETA corrigido	60	<3,29
LETA corrigido	120	<3,29
LETA não corrigido	0	<3,29
LETA não corrigido	30	<3,29
LETA não corrigido	60	<3,29
LETA não corrigido	120	<3,29

Fonte: elaborado pela autora (2026).

Nota: Valores expressos como <3,29 indicam concentrações abaixo do limite de quantificação do método analítico para cobalto (Co).

A Figura 16 apresenta a interação entre os tipos de LETA (corrigido e não corrigido) e as doses aplicadas sobre os valores médios das quantidades acumuladas (mg vaso⁻¹) de níquel (Ni), cobre (Cu), molibdênio (Mo) e potássio (K) nos tecidos de plantas de azevém.

Figura 16 - Interação entre tipos de LETA (corrigido e não corrigido) e doses de LETA (0, 30, 60 e 120 t ha⁻¹) sobre o acumulado de Níquel (Ni) (A), Cobre (Cu) (B), Molibdênio (Mo) (C) e Potássio (K) (D) em tecidos de plantas de azevém (*Lolium multiflorum* Lam.).



Fonte: elaborado pela autora (2026).

Para o Ni (Figura 16A), no LETA corrigido observa-se redução do acúmulo da dose 0 para 30 t ha⁻¹, seguida de aumento gradual nas doses de 60 e 120 t ha⁻¹, enquanto no LETA não corrigido ocorre aumento do acúmulo até 30 t ha⁻¹, com redução em 60 t ha⁻¹ e novo incremento em 120 t ha⁻¹.

No Cu (Figura 16B), o LETA corrigido apresenta aumento acentuado do acúmulo com o incremento das doses até 60 t ha⁻¹, mantendo valores elevados em 120 t ha⁻¹; já o LETA não corrigido mostra aumento até 30 t ha⁻¹, seguido de redução e estabilização nas doses subsequentes.

Para o Mo (Figura 16C), o LETA corrigido promove aumento progressivo do acúmulo ao longo das doses, com maior valor em 120 t ha⁻¹, enquanto no LETA não corrigido há incremento mais discreto e gradual, mantendo valores inferiores ao corrigido em todas as doses.

No caso do K (Figura 16D), observa-se aumento contínuo do acúmulo com as doses no LETA corrigido, com máximos em 120 t ha⁻¹, enquanto no LETA não corrigido os valores aumentam levemente da dose 0 para 30 t ha⁻¹ e permanecem relativamente constantes nas demais doses.

Conforme apresentado nas Figuras 16A e 16B, os maiores valores de níquel (Ni) e cobre (Cu) observados no LETA corrigido indicam um ambiente químico mais

equilibrado, favorecendo a absorção desses micronutrientes pelas plantas. Em condições mais ácidas, como no LETA não corrigido, parte desses elementos tende a permanecer retida no solo, o que reduz sua absorção vegetal, pois a disponibilidade de Ni e Cu é fortemente influenciada pelo pH do solo (Raij, 2011).

O comportamento do molibdênio (Mo) (Figura 16C) foi ainda mais evidente, o Mo se torna mais disponível quando o pH do solo é mais elevado, isso explica o aumento contínuo do seu acúmulo no LETA corrigido (Raij, 2011; Marschner, 2012).

No caso do potássio (K) (Figura 16D) o aumento do acúmulo no LETA corrigido reflete melhor aproveitamento deste nutriente pelas plantas, tanto pelo fornecimento do elemento quanto pelas condições químicas mais favoráveis do solo. Já no LETA não corrigido, a pequena variação do acúmulo indica que, mesmo com o aumento das doses, fatores do solo podem ter limitado a absorção do nutriente (Raij, 2011).

De forma geral, os resultados indicam que a correção do LETA cria condições mais favoráveis para a absorção de nutrientes e micronutrientes pelo azevém, reforçando a importância do tratamento prévio do resíduo para melhorar sua eficiência agrônômica.

3.3.4 Teores de tecido vegetal à aplicação da mistura LETA:LETE (75:25)

A utilização combinada de LETAs e de LETEs tem sido avaliada como uma estratégia promissora para otimizar os benefícios agrônômicos desses materiais e, simultaneamente, mitigar limitações associadas ao uso isolado de cada resíduo. Nesse contexto, a análise dos teores de nutrientes no tecido vegetal, em resposta à aplicação da mistura LETA:LETE (75:25), na dose de 60 t ha⁻¹, corrigida e não corrigida quanto à acidez, permite compreender como a combinação desses materiais influencia a disponibilidade e a absorção de elementos pelas plantas, especialmente em solos arenosos.

O resumo da significância estatística dos fatores insumo, correção da acidez e da interação entre ambos sobre os teores de macro e micronutrientes no tecido vegetal de azevém está apresentada na Tabela 7, obtida por meio do teste F, com objetivo de facilitar a visualização dos efeitos dos tratamentos aplicados.

As variáveis MS, P, Mg e Mn foram influenciadas significativamente pelo tipo de insumo (LETA x Mistura LETA:LETE). O fator correção (corrigido e não corrigido) apresentou efeito significativo sobre MS, Na, Al e Fe. A interação entre insumo e

correção foi significativa apenas para o teor de Na. Os valores dessas variáveis são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Efeito dos fatores insumo, correção da acidez e da interação insumo × correção sobre os teores de nutrientes no tecido vegetal de azevém

Fonte de Variação	Significância												
	Teores de macro e micronutrientes em tecido vegetal de azevém												
	MS	N	P	K	Ca	Mg	Na	Al	Fe	Mn	B	Cu	Zn
Insumo	*	NS	*	NS	NS	*	NS	NS	NS	*	NS	NS	NS
Correção	*	NS	NS	NS	NS	NS	*	*	*	NS	NS	NS	NS
Interação													
Insumo x Correção	NS	NS	NS	NS	NS	NS	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Fonte: elaborado pela autora (2026).

Nota: NS = não significativo pelo teste F ($p > 0,05$); * = significativo pelo teste F ($p \leq 0,05$).

A Tabela 8 apresenta os valores médios de massa seca (MS) e dos teores de P, Mg e Mn no tecido vegetal de azevém, em função do fator insumo (LETA*MISTURA LETA:LETE), considerando as diferenças significativas observadas.

Tabela 8 - Teores de macro e micronutrientes no tecido vegetal de azevém (*Lolium multiflorum* Lam.) em função do fator insumo

Fator de Tratamento	Tratamentos	Comparações de médias			
		Teores de macro e micronutrientes em tecido vegetal de azevém (<i>Lolium multiflorum</i> Lam.)			
		MS	P	Mg	Mn
Insumo	LETA	28,19 b	1,20 b	3,17 b	120,16 a
	Mistura				
	LETA_LETE	35,29 a	1,63 a	3,79 a	88,84 b

Fonte: elaborado pela autora (2026).

Nota: Médias seguidas por letras distintas na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$), considerando o insumo utilizado.

As variáveis MS, P, Mg e Mn foram influenciadas significativamente pelo tipo de correção (corrigido e não corrigido) e, desta forma, valores de MS e os teores de

Na, Al e Fe no tecido vegetal do azevém, em função do fator de tratamento, correção, são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Teores de macro e micronutrientes no tecido vegetal de azevém (*Lolium multiflorum* Lam.) em função da correção da acidez do solo

Tratamentos		Comparações de médias			
		Teores de macro e micronutrientes em tecido vegetal de azevém (Lolium multiflorum Lam.)			
		MS	Na	Al	Fe
Correção	Corrigido	34,43 a	1,83 b	55,63 b	99,33 b
	Não corrigido	29,04 b	2,48 a	105,50 a	153,47 a

Fonte: elaborado pela autora (2026).

Nota: Médias seguidas por letras distintas na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$), considerando a correção do solo.

A única variável influenciada significativamente pela interação entre o Tipo de Insumo e o tipo de correção foi o Na. Os valores médios do teor de Na em função da interação entre insumo e correção da acidez do solo são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Teores de sódio (Na, mg kg⁻¹) no tecido vegetal de azevém (*Lolium multiflorum* Lam.) em função da interação entre insumo e correção da acidez do insumo

Fator de tratamento	Tratamentos	Comparações de médias
		Atributos químicos do solo
		Na
Insumo*correção	LETA Corrigido	1,43 a
	LETA não corrigido	2,61 a
	Mistura LETA_LETE corrigido	2,23 b
	Mistura LETA_LETE não corrigido	2,33 a

Fonte: elaborado pela autora (2026).

Nota: Médias seguidas por letras distintas na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$), considerando a interação entre insumo e correção.

A análise da significância dos fatores insumo, correção e da interação entre ambos sobre os teores de macro e micronutrientes no tecido vegetal de azevém indica comportamentos distintos entre os elementos avaliados. A maior parte dos elementos

não apresentou resposta significativa aos tratamentos, indicando que, nas condições estudadas, a aplicação da mistura LETA:LETE (75:25), na dose de 60 t ha⁻¹, não promoveu alterações relevantes nos teores desses elementos no tecido vegetal.

Entre os elementos avaliados, MS, P, Mg e Mn apresentaram efeito dos fatores testados, porém sem evidência de interação entre insumo e correção da acidez. O sódio (Na) foi o único elemento que apresentou efeito significativo da interação entre os fatores, indicando que seus teores no tecido vegetal do azevém dependem da combinação entre o tipo de insumo aplicado e a correção da acidez do resíduo. Dessa forma, a aplicação de LETA isolado ou da mistura LETA:LETE resulta em respostas distintas de Na conforme o material tenha sido corrigido ou não corrigido.

3.3.5 Acumulados de tecido vegetal à aplicação da mistura LETA:LETE (75:25)

Além dos teores, a avaliação das quantidades acumuladas dos elementos químicos no tecido vegetal permite compreender a resposta das plantas, considerando simultaneamente a absorção de nutrientes e o acúmulo de elementos tóxicos e a produção de biomassa. Nesse contexto, a análise da resposta à aplicação da mistura LETA:LETE (75:25), na dose de 60 t ha⁻¹, corrigida e não corrigida quanto à acidez, possibilita uma interpretação mais integrada do aproveitamento nutricional pelas plantas, conforme a (Tabela 11), o acúmulo de elementos tóxicos.

Tabela 11 - Efeito dos fatores insumo, correção da acidez e da interação insumo × correção sobre os acumulados de elementos químicos no tecido vegetal de azevém

Fonte de Variação	Significância											
	Acumulados de elementos químicos em tecido vegetal de azevém											
	N	P	K	Ca	Mg	Na	Al	Fe	Mn	B	Cu	Zn
Insumo	NS	*	NS	*	*	*	NS	*	NS	NS	NS	*
Correção	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	*	NS	NS
Interação Insumo* Correção	NS	NS	*	NS	NS	NS	NS	*	NS	*	NS	NS

Fonte: elaborado pela autora (2026).

Nota: NS = não significativo pelo teste F ($p > 0,05$); * = significativo pelo teste F ($p \leq 0,05$).

Conforme apresentado na Tabela 12, o fator insumo influenciou significativamente os teores de P, Ca, Mg, Na, Fe e Zn no tecido vegetal do azevém.

Tabela 12 - Teores de macro e micronutrientes no tecido vegetal de azevém (*Lolium multiflorum* Lam.) em função do fator insumo

Fator de tratamento	Tratamentos	Comparações de médias					
		Teores de macro e micronutrientes em tecido vegetal de azevém					
		P	Ca	Mg	Na	Fe	Zn
Insumo	LETA	34,71 b	201,71 b	89,56 b	53,69 b	3,08 b	1,36 b
	Mistura LETA_LETE	57,37 a	312,13 a	135,27 a	84,69 a	4,97 a	2,40 a

Fonte: elaborado pela autora (2026).

Nota: Médias seguidas por letras distintas na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$), considerando a correção.

Conforme apresentado na Tabela 13, a correção da acidez influenciou significativamente os teores de N e B no tecido vegetal do azevém.

Tabela 13 - Teores de nitrogênio (N) e boro (B) no tecido vegetal de azevém (*Lolium multiflorum* Lam.) em função da correção da acidez do solo

Fator de tratamento	Tratamentos	Comparações de médias	
		Teores de macro e micronutrientes em tecido vegetal de azevém	
		N	B
Correção	Corrigido	923,97 a	1,65 a
	Não Corrigido	719,81 b	1,33 b

Fonte: elaborado pela autora (2026).

Nota: Médias seguidas por letras distintas na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$), considerando a correção.

A interação entre o tipo de insumo e a correção da acidez influenciou significativamente os teores de K, Fe e B no solo, conforme apresentado na Tabela 14.

Tabela 14 - Teores de potássio (K), ferro (Fe) e boro (B) no solo em função da interação entre insumo e correção alcalina

Fator de tratamento	Tratamentos	Comparações de médias		
		Atributos químicos do solo		
		K	Fe	B
Insumo*Correção	LETA Corrigido	324,46 a	3,39 a	1,84 a
	LETA não corrigido	213,98 b	2,76 b	1,10 b
	LETA_LETE Corrigido	255,39 a	3,53 a	1,47 b
	LETA_LETE não corrigido	308,34 a	6,42 a	1,55 a

Fonte: elaborado pela autora (2026).

Nota: Médias seguidas por letras distintas na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$), considerando a interação entre insumo e correção.

A análise da significância dos fatores insumo, correção da acidez e da interação entre ambos sobre os teores acumulados de macro e micronutrientes no tecido vegetal de azevém indica que as respostas estiveram mais associadas à combinação entre disponibilidade no solo e produção de biomassa do que aos teores isolados dos elementos. Observa-se que o fator insumo influenciou o acúmulo de P, Ca, Mg, Na, Fe e Zn, evidenciando que a composição do material aplicado teve papel determinante na quantidade total de nutrientes absorvida pelas plantas ao longo do ciclo. A correção da acidez apresentou efeito significativo apenas para o acúmulo de N e B, indicando que o manejo do pH exerceu influência pontual sobre esses elementos, possivelmente associada a alterações na disponibilidade e no aproveitamento nutricional pelas plantas. A interação entre insumo e correção foi significativa para o acúmulo de K, Fe e B, demonstrando que, para esses nutrientes, a resposta das plantas dependeu da combinação entre o tipo de resíduo aplicado e a condição de acidez do solo. Para os demais nutrientes avaliados, não foram observadas respostas significativas, indicando que, nas condições estudadas, a aplicação da mistura LETA:LETE (75:25) não promoveu alterações relevantes no acúmulo total desses elementos no tecido vegetal do azevém.

3.4 Conclusões

A matéria seca da parte aérea do azevém foi a principal variável resposta do estudo, apresentando efeito significativo do tipo de LETA ($p \leq 0,05$). O uso de LETA

corrigido promoveu maior produção de biomassa, com valores variando de aproximadamente 13 a 30 g vaso⁻¹, enquanto o LETA não corrigido apresentou produção entre 12 e 20 g vaso⁻¹, representando incremento médio de aproximadamente 30% nos tratamentos com correção da acidez.

As maiores produções foram observadas na dose de 120 t ha⁻¹ de LETA corrigido (~30 g vaso⁻¹), seguida das doses de 60 e 30 t ha⁻¹, indicando resposta crescente à aplicação quando associada à correção do pH. Em contraste, o LETA não corrigido apresentou resposta limitada, com pouca variação entre as doses e ausência de ganho expressivo de biomassa nas doses mais elevadas.

Esse comportamento evidencia que a eficiência agronômica do LETA está diretamente relacionada à correção da acidez.

4 Capítulo 2 – Atributos físico-químicos sob doses de lodo de estação de tratamento de água e lodo de estação de tratamento de esgoto incorporados em um Neossolo Quartzarênico

4.1 Introdução

O funcionamento do solo em sistemas agrícolas depende de um conjunto de características físicas e químicas que atuam em conjunto, regulando a água, o ar e os nutrientes. Essas características influenciam processos essenciais para o crescimento das plantas, como o crescimento das raízes, a absorção de nutrientes e a produtividade ao longo do tempo, sendo utilizadas como indicadores da qualidade do solo (Dexter, 2004; Reynolds *et al.*, 2009).

A avaliação do efeito e da viabilidade da aplicação de resíduos no solo pode ser realizada por meio do monitoramento de atributos químicos, como os teores de macro e micronutrientes, metais pesados e outros elementos potencialmente tóxicos, matéria orgânica, capacidade de troca de cátions, pH e os índices de saturação por bases e por alumínio (Martinazzo *et al.*, 2019). De forma complementar, variáveis agrônômicas associadas ao crescimento, ao desenvolvimento e à composição nutricional das plantas também constituem importantes indicadores da resposta aos resíduos aplicados (Silveira *et al.*, 2013).

A interação entre características físicas e químicas é importante, pois mudanças na estrutura e na porosidade do solo podem alterar a movimentação e a oferta de nutrientes. Mudanças químicas, como o aumento da matéria orgânica e dos minerais, contribuem para a estabilidade dos agregados e para a melhoria da qualidade física do solo (Six *et al.*, 2004).

Nesse contexto, a aplicação de resíduos e subprodutos em solos agrícolas tem sido investigada como estratégia para promover alterações simultâneas nos atributos físicos e químicos do solo, especialmente em ambientes com limitações naturais, como os solos arenosos. Esses solos, caracterizados por baixa capacidade de retenção de água e de nutrientes, podem responder positivamente à incorporação de materiais com maior proporção de partículas finas, dependendo das características do solo, do resíduo aplicado e das doses empregadas (Ippolito *et al.*, 2011; Ojeda *et al.*, 2015; Carvalho *et al.*, 2020; Ribeiro *et al.*, 2022).

Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar os efeitos de doses crescentes de LETAs, com e sem correção da acidez, sobre os atributos físicos e químicos de um Neossolo Quartzarênico, considerando: i) as alterações na composição granulométrica (argila, silte e areia) e na densidade de partículas; ii) as modificações nos teores de macro e micronutrientes do solo após o cultivo de azevém; e iii) o potencial do uso desses resíduos como condicionadores de solo em ambientes arenosos.

4.2 Material e Métodos

As análises apresentadas neste capítulo foram realizadas a partir do experimento descrito no Capítulo 1, no qual foram aplicadas doses crescentes de LETAs, com pH corrigido e não corrigido, em solo classificado como Neossolo Quartzarênico. Neste capítulo, a abordagem metodológica foi direcionada à caracterização dos atributos físicos e químicos do solo após o período de cultivo de azevém.

Os LETAs e LETEs utilizados neste estudo foram previamente submetidos a processos de solarização em estufa agrícola, moagem e peneiramento, resultando em materiais com teor de umidade inferior a 20% e tamanho de partícula inferior a 0,2 mm, conforme descrito no Capítulo 1. Essas etapas garantiram a homogeneidade do material aplicado e a padronização das condições para avaliação dos efeitos dos resíduos sobre os atributos físicos e químicos do solo. A caracterização química dos resíduos foi realizada no Laboratório Laborsolo, conforme os resultados apresentados na Tabela 15.

O solo utilizado no experimento foi coletado na camada de 0–0,20 m no entorno dos leitos de secagem de lodos da Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN), no município de Rio Grande, RS. Trata-se de um solo de textura arenosa, com baixa fertilidade natural e reduzida capacidade de troca de cátions, características típicas de Neossolos Quartzarênicos, o que justifica sua utilização em estudos que avaliam o efeito de materiais com potencial condicionador (Streck *et al.*, 2018).

Tabela 15 - Características químicas das matérias-primas avaliadas neste estudo

Parâmetro	Unidade	LETA ¹	LETE ²
Nitrogênio total (N)	%	0,6	1,34
Fósforo total (P ₂ O ₅)	%	0,23	3,46
Potássio solúvel (K ₂ O)	%	0,01	0,02
Cálcio total (Ca)	%	0,11	1,65
Magnésio total (Mg)	%	0,29	0,26
Enxofre total (S)	%	0,28	0,64
Carbono orgânico	%	6,55	19,51
Relação C/N	—	10,92	14,56
Relação C/P	—	65,22	12,91
pH (CaCl ₂)	—	5,47	6
Umidade (perda a 65 °C)	%	8,45	4,73
Cobre total (Cu)	mg kg ⁻¹	89,44	151,4
Ferro total (Fe)	mg kg ⁻¹	30.280,00	35.590,00
Manganês total (Mn)	mg kg ⁻¹	262,8	330
Zinco total (Zn)	mg kg ⁻¹	78,56	1.804,00
Sódio total (Na)	mg kg ⁻¹	241	811,8
Boro total (B)	mg kg ⁻¹	N.I. ³	N.I. ³
Molibdênio total (Mo)	mg kg ⁻¹	N.I. ³	N.I. ³
Níquel total (Ni)	mg kg ⁻¹	N.I. ³	33,49
Cobalto total (Co)	mg kg ⁻¹	N.I. ³	N.I. ³

Fonte: elaborado pela autora (2026).

(1) LETA (Lodo de estação de tratamento de água). (2) LETE (Lodo de estação de tratamento de esgoto). (3) N.I (não identificado).

Antes da implantação do experimento, amostras de solo com estrutura não preservada foram coletadas, secas ao ar, destorroadas e peneiradas em malha de 2 mm, sendo posteriormente encaminhadas ao Laboratório de Química do Solo da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) para caracterização química inicial do solo utilizado no estudo, conforme apresenta a Tabela 16 a seguir.

Ao final do período experimental, após a condução do cultivo descrito no Capítulo 1, foram coletadas novas amostras de solo, com estrutura não preservada, em cada balde experimental, com auxílio de trado de rosca, conforme apresenta a Figura 17. As amostras foram secas ao ar, destorroadas, peneiradas em malha de 2

mm e submetidas às análises físicas e químicas. Posteriormente, os solos foram analisados no Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal de Pelotas (UFPeI) considerando-se os seguintes parâmetros: densidade de partículas (D_p) e distribuição das partículas por tamanho nas frações areia, silte e argila, avaliada pelo método da pipeta, conforme descrito por Teixeira *et al.* (2017).

Tabela 16 - Análise química dos solos utilizados no experimento

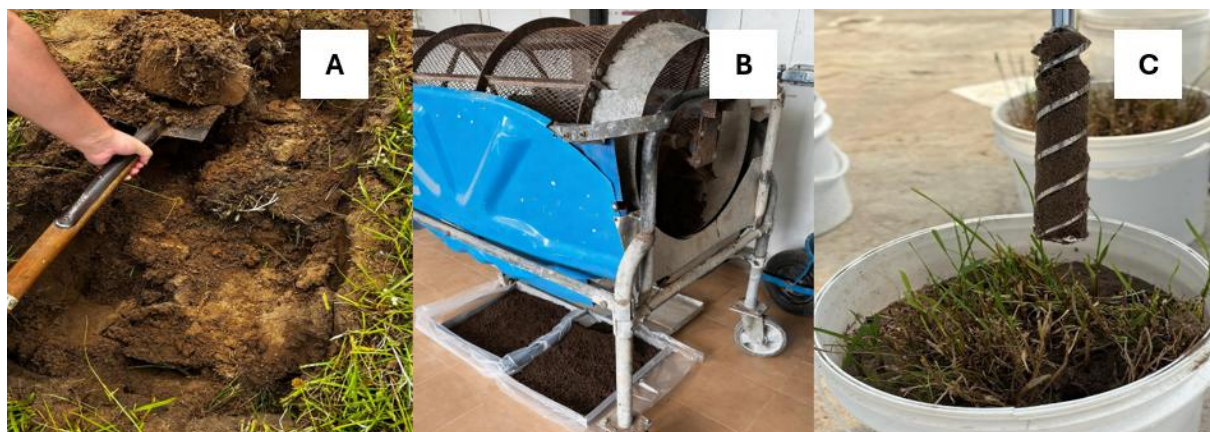
Variável	Unidade	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
pH H ₂ O	—	4,8	5,4	4,8	5
Índice SMP	—	6,4	6,9	5,7	6,4
Argila	%	5	5	5	5
Matéria orgânica	%	0,7	0,2	1,2	0,5
P	mg L ⁻¹	26,5	26,6	11,8	13,1
K	mg L ⁻¹	44	20	24	12
Ca	cmolc L ⁻¹	0,54	0,24	0,62	0,55
Mg	cmolc L ⁻¹	0,22	0,12	0,29	0,18
Al	cmolc L ⁻¹	0,31	0	0,63	0,36
H+Al	cmolc L ⁻¹	2,8	1,6	6,2	2,8
CTC efetiva	cmolc L ⁻¹	1,2	0,4	1,6	1,1
CTC pH 7,0	cmolc L ⁻¹	3,7	2	7,2	3,6
Saturação por bases	%	23,5	20,6	13,6	21,2
Saturação por Al	%	25,8	0	39,4	32,7
Zn	mg L ⁻¹	0,64	0,34	0,32	0,26
Cu	mg L ⁻¹	0,63	0,48	0,48	0,7
S	mg L ⁻¹	6,6	2,5	7,5	4
B	mg L ⁻¹	0,25	0,47	0,65	0,76
Fe	mg L ⁻¹	120,46	92,75	155,49	119,49
Mn	mg L ⁻¹	7,78	5,85	6,82	5,72

Fonte: elaborado pela autora (2026).

Nota: Amostras coletadas na camada de 0–20 cm em Neossolo Quartzarênico, no mesmo local, em pontos distintos. Resultados conforme laudo do Laboratório de análise de Solo (UFSM).

Figura 17 - Etapas de coleta e preparo das amostras de solo: (A) coleta de solo na camada de 0–0,20 m; (B) peneiramento do solo para homogeneização das amostras; (C) trado de rosca após os cinco

cortes de azevém, utilizado para obtenção de amostras destinadas às análises físicas e químicas do solo



Fonte: elaborado pela autora (2026).

As análises químicas do solo foram realizadas no Laboratório de Rotina da UFPel, no qual foram estimados o pH em água, o índice SMP e os cátions trocáveis cálcio (Ca), magnésio (Mg), sódio (Na), alumínio (Al) e manganês (Mn), conforme metodologia descrita por Tedesco *et al.* (1995). Os teores extraíveis de fósforo (P) e potássio (K) foram determinados pelo método Mehlich-1, conforme descrito no próprio manual. A partir desses resultados, foram estimadas a soma de bases, a CTC efetiva, a CTC a pH 7,0, a saturação por bases e a saturação por alumínio, permitindo avaliar as alterações químicas do solo decorrentes da aplicação dos LETAs.

Antes da realização da Análise de Variância (ANOVA), os dados referentes aos atributos físicos e químicos do solo foram submetidos à verificação dos pressupostos estatísticos de normalidade dos resíduos e de homogeneidade das variâncias. A normalidade foi avaliada pelo teste de Shapiro–Wilk, enquanto a homoscedasticidade foi verificada pelo teste de Levene.

As variáveis expressas em porcentagem, como areia, argila, silte, saturação por bases (V%) e saturação por alumínio (m%), foram submetidas à transformação arco-seno da raiz quadrada, com o objetivo de adequar os dados aos pressupostos exigidos para a aplicação das análises estatísticas.

Para as variáveis que, mesmo após a transformação arco-seno, não atenderam aos pressupostos de normalidade e homoscedasticidade ($p \leq 0,05$), foi aplicada a transformação de Box–Cox, utilizando-se o valor de lambda otimizado que maximiza a log-verossimilhança da função de densidade de probabilidade normal.

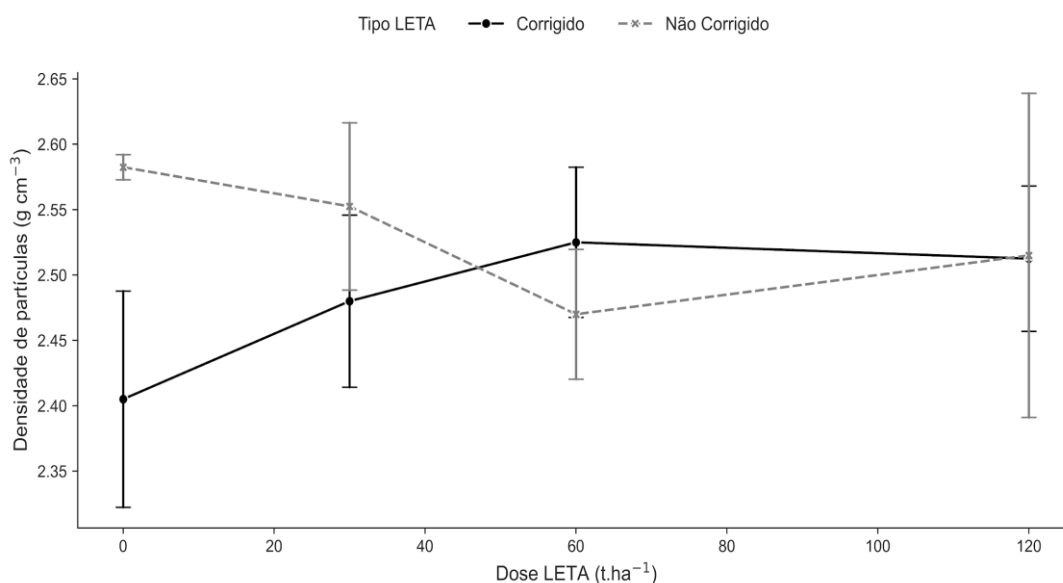
Após a adequação dos dados, procedeu-se à Análise de Variância (ANOVA), conforme o delineamento experimental adotado, considerando os efeitos dos fatores avaliados e de suas interações. Os dados referentes aos tratamentos com LETA e LETE foram submetidos à análise estatística no software Winstat, com comparação de médias pelo teste de Tukey, adotando-se o nível de significância de 5%.

4.3 Resultados e discussão

4.3.1 Atributos físicos do solo sob doses crescentes de LETAs com pH corrigido e não corrigido

A análise de variância revelou interação significativa entre o tipo de LETA e as doses aplicadas na variável densidade de partículas do solo ($p \leq 0,05$) (Figura 17), evidenciando respostas diferenciais dos materiais em função da dose.

Figura 18 - Interação entre tipos de LETA (corrigido e não corrigido) e doses de LETA (0, 30, 60 e 120 t ha⁻¹) sobre a densidade de partículas de solo cultivado com plantas de azevém



Fonte: elaborado pela autora (2026).

A densidade de partículas do solo foi influenciada pelas doses de LETA, apresentando comportamento distinto em função do manejo químico do solo (corrigido e não corrigido). Conforme Figura 18, observou-se incremento gradual da densidade de partículas com o aumento das doses de LETA, partindo de aproximadamente 2,40 g cm⁻³ na ausência de aplicação para valores próximos a 2,52 g cm⁻³ na dose de 60 t ha⁻¹. A partir dessa dose, houve tendência de estabilização ou discreta redução da

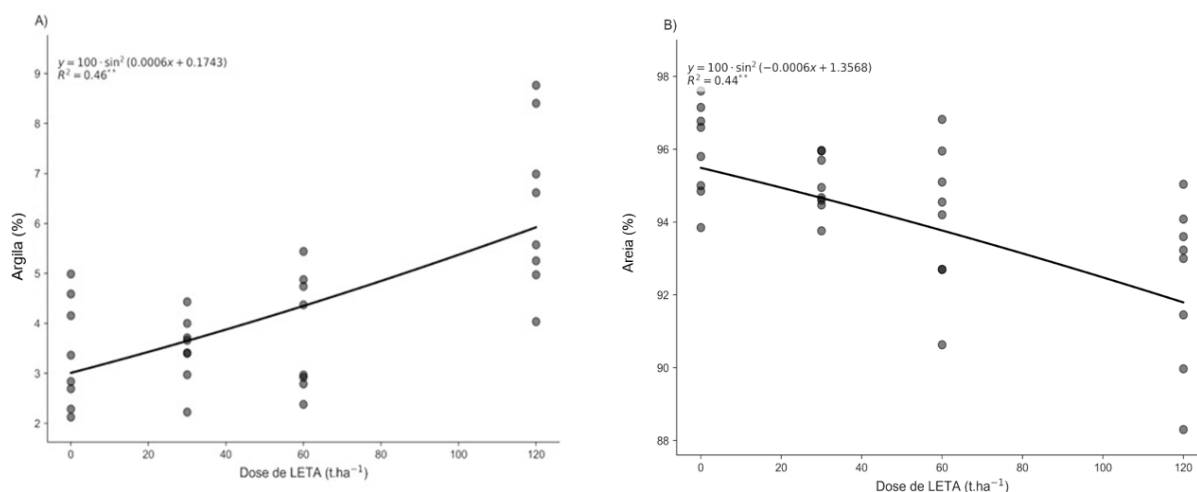
densidade até a dose máxima avaliada (120 t ha^{-1}), indicando que o efeito da LETA tende a atingir um ponto de estabilização da resposta observada.

Em contraste, no LETA não corrigido, a densidade de partículas apresentou valores iniciais mais elevados, próximos de $2,58 \text{ g cm}^{-3}$ na dose zero, com redução progressiva até a dose de 60 t ha^{-1} , quando atingiu aproximadamente $2,47 \text{ g cm}^{-3}$. Esse decréscimo indica que, em condições de solo não corrigido, doses intermediárias de LETA podem estar associadas a maior reorganização das partículas do solo, resultando em redução da densidade de partículas. Entretanto, na maior dose aplicada (120 t ha^{-1}), observou-se um novo aumento da densidade, aproximando-se dos valores registrados no solo corrigido, sugerindo que aplicações elevadas de resíduo tendem a promover um efeito semelhante, independentemente do manejo químico inicial. Esse comportamento indica que o efeito do resíduo sobre a fase sólida do solo está condicionado não apenas à quantidade aplicada, mas também às condições químicas do sistema, que influenciam os processos de dispersão, floculação e reorganização das partículas minerais.

Do ponto de vista da composição dos LETAs, gerados na etapa de coagulação da água, são constituídos, em sua maior parte, por materiais amorfs e por partículas minerais finas removidas da água bruta (Ippolito *et al.*, 2011; Likus *et al.*, 2021). Esses materiais apresentam elevada reatividade superficial e comportamento coloidal, podendo interferir nas propriedades físico-químicas do solo quando incorporados, especialmente em solos de textura arenosa, naturalmente mais sensíveis à adição de frações finas. Assim, as variações observadas na densidade de partículas refletem principalmente a introdução de material externo ao solo, com características mineralógicas distintas daquelas originalmente predominantes, e não necessariamente alterações estruturais permanentes no solo.

A ANOVA indicou efeito isolado do fator dose nas variáveis argila e areia, sendo ajustado um modelo de regressão descrito por uma função senoidal ao quadrado (Figura 19).

Figura 19 - Teores de argila (A) e de areia (B) em função das doses de LETA



Fonte: elaborado pela autora (2026).

Nota: Os pontos representam as observações individuais e a linha contínua corresponde ao modelo ajustado, descrito por uma função senoidal ao quadrado ($p \leq 0,05$).

Na Figura 19A, observa-se uma tendência crescente do teor de argila com o aumento das doses de LETA. Os valores médios iniciais, próximos de 3 % na ausência de aplicação, aumentam gradativamente até superar 5 % na dose de 120 t ha⁻¹. O modelo ajustado ($y = 100 \cdot \sin^2(0,0006x + 0,1743)$; $R^2 = 0,46$) indica que aproximadamente 46% da variação do teor de argila é explicada pelas doses de LETA.

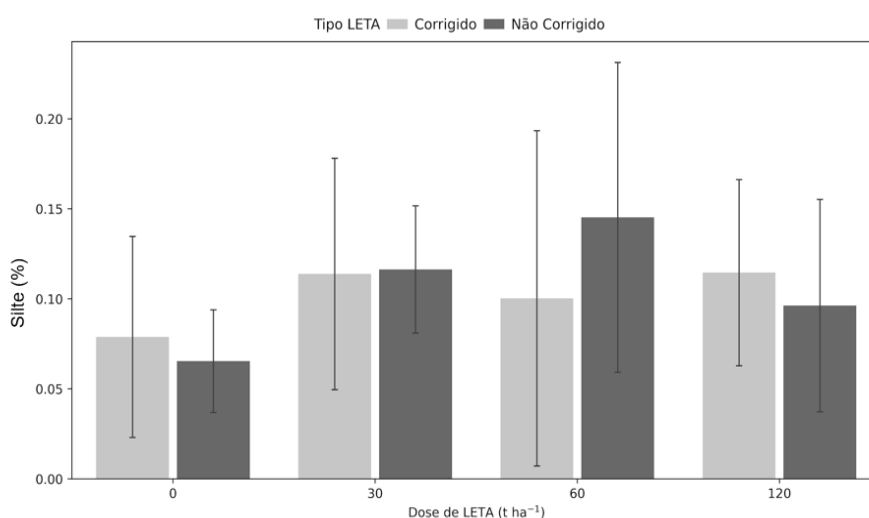
Na Figura 19B, observa-se uma tendência oposta, com redução do teor de areia à medida que aumentam as doses de LETA. Os valores iniciais, próximos de 95–96 %, diminuem gradualmente até cerca de 92 %, na dose máxima avaliada. O modelo ajustado ($y = 100 \cdot \sin^2(-0,0006x + 1,3568)$; $R^2 = 0,44$) indica que cerca de 44% da variação do teor de areia é explicada pela dose de LETA. A redução do teor de areia não indica perda real dessa fração, mas sim um efeito de diluição proporcional, decorrente do acréscimo de partículas finas ao sistema solo.

A interpretação desses resultados deve considerar o método da pipeta empregado para a determinação granulométrica, que se baseia na velocidade de sedimentação das partículas, conforme a Lei de Stokes, e é sensível à presença de partículas finas incorporadas ao sistema (Ge; Bauder, 1986; Teixeira, 2017). Nesse contexto, o aumento do teor de argila observado é um reflexo da incorporação de partículas finas e de materiais amorfs provenientes do LETA, detectados pela metodologia de sedimentação.

Os resultados indicam tendência linear de resposta do solo às doses de LETA, com aumento dos teores de argila (Figura A) e redução dos teores de areia (Figura B) com o incremento das doses. Esse comportamento sugere efeito gradual das aplicações, sem evidência clara de resposta não linear nas condições avaliadas.

Os teores médios de silte do solo em função das doses de LETAs nos tratamentos corrigido e não corrigido, é apresentado na Figura 20, permitindo avaliar possíveis alterações dessa fração textural em resposta à aplicação do resíduo.

Figura 20 - Teores de silte em solos cultivados com diferentes doses de LETA



Fonte: elaborado pela autora (2026).

Já a variável silte não apresentou diferenças significativas na ANOVA ($p \leq 0,05$) (Figura 20). A ausência de efeito significativo sobre o teor de silte indica que as alterações detectadas se concentraram principalmente nos extremos granulométricos, com maior sensibilidade da fração argila à incorporação do resíduo e, consequentemente, diluição proporcional da fração areia.

Assim, os resultados indicam que a aplicação de LETAs altera a proporção das frações nas amostras analisadas, com efeitos dependentes da dose aplicada e do manejo químico inicial, devendo essas respostas ser interpretadas de forma integrada às demais variáveis físicas e químicas avaliadas no estudo. A Tabela 17 apresenta um resumo descritivo da composição granulométrica e da densidade de partículas do Neossolo Quartzarênico (0–0,20 m), expressos como média $\pm$ desvio-padrão, para os tratamentos com LETA corrigido e não corrigido, com o objetivo de sintetizar os valores médios já apresentados nas análises estatísticas, facilitando a visualização das variáveis avaliadas.

Tabela 17 - Composição granulométrica e densidade de partículas do Neossolo Quartzarênico (0–0,20 m) submetido a doses de LETA corrigido e não corrigido

Tratamento	Dose (t ha ⁻¹)	Dp (Mg m ⁻³)	Argila ¹ (%)	Silte ¹ (%)	Areia ¹ (%)
LETA corrigido	0	2,41 ± 0,04	3,70 ± 0,42	0,85 ± 0,43	95,45 ± 0,69
LETA corrigido	30	2,46 ± 0,05	3,34 ± 0,39	1,59 ± 0,54	95,07 ± 0,54
LETA corrigido	60	2,48 ± 0,06	3,88 ± 0,63	1,63 ± 1,15	94,49 ± 1,37
LETA corrigido	120	2,51 ± 0,03	5,75 ± 0,94	1,50 ± 0,64	92,76 ± 1,51
LETA não corrigido	0	2,58 ± 0,00	3,06 ± 0,66	0,49 ± 0,21	96,46 ± 0,58
LETA não corrigido	30	2,55 ± 0,03	3,62 ± 0,31	1,44 ± 0,41	94,95 ± 0,27
LETA não corrigido	60	2,47 ± 0,02	3,74 ± 0,63	2,63 ± 1,17	93,68 ± 0,59
LETA não corrigido	120	2,52 ± 0,06	6,91 ± 0,72	1,18 ± 0,41	91,91 ± 0,76

Fonte: elaborado pela autora (2026).

Nota: (1) Determinados pelo método da pipeta (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

4.3.2 Atributos químicos do solo sob doses crescentes de LETA com pH corrigido e não corrigido

A aplicação de LETAs em solos agrícolas pode influenciar os atributos químicos do solo, dependendo da composição do resíduo, da dose aplicada e da correção química adotada. A avaliação desses atributos é importante para compreender o comportamento dos elementos químicos no solo, especialmente quando se comparam materiais com pH corrigido e não corrigido, que podem apresentar interações distintas.

A Tabela 18 apresenta o resumo da significância estatística dos fatores Tipo de LETA (P), Dose (S) e da interação entre ambos (P × S) sobre os atributos químicos avaliados, obtido por meio do teste F, com o objetivo de facilitar a visualização dos efeitos dos tratamentos aplicados.

Tabela 18 - Resumo da análise de variância para os atributos químicos do solo (0–0,20 m)

Fonte de Variação	Significância															
	Resultados variáveis químicas															
	pH em água	pH SMP	Al	Ca	Mg	Fe	Mn	K	Na	P	H+Al	SB	V (%)	CTCe	CTC pH 7	SAT. Al (%)
Correção (P)	NS	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	*	NS	NS	NS	NS	NS
Dose (S)	NS	NS	NS	NS	NS	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Interação P x S	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

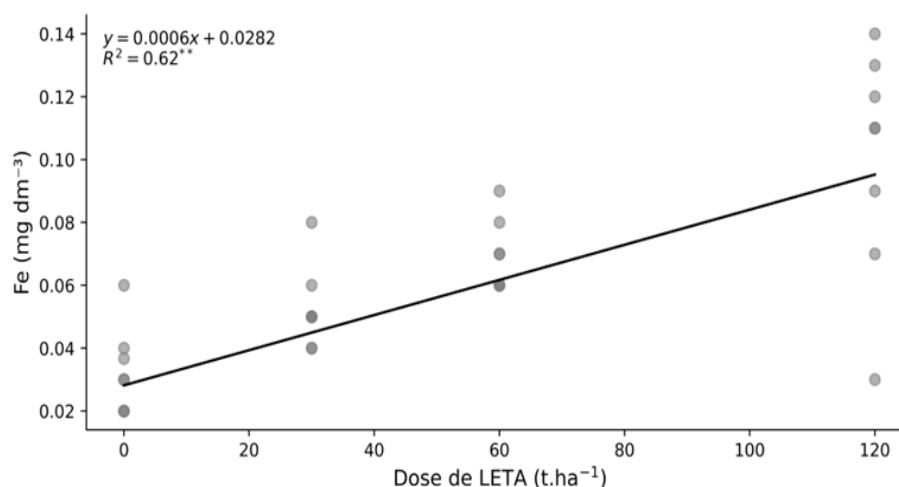
Fonte: elaborado pela autora (2026).

Nota: NS = não significativo pelo teste F ($p > 0,05$); * = significativo pelo teste F ($p \leq 0,05$).

A análise de variância indica que, nas condições do experimento, a aplicação dos tratamentos promoveu alterações pontuais nos atributos químicos do solo, restritas ao pH SMP, H+Al e aos teores de Fe, sem efeito combinado entre Tipo de LETA e dose. Em função dos resultados obtidos, a discussão a seguir concentra-se nos atributos que apresentaram significância estatística.

A ANOVA indicou efeito isolado do fator dose sobre a variável Fe (Ferro), e ajustou-se um modelo de regressão linear (Figura 21). A Figura 21 demonstra a relação entre as doses de LETA aplicadas ao solo e o teor de ferro (Fe), expresso em mg dm^{-3} . Observa-se uma tendência de aumento do teor de Fe à medida que as doses de LETA aumentam, indicando uma resposta positiva do solo à aplicação desse resíduo. Esse comportamento foi confirmado pela análise estatística, que indicou efeito significativo do fator dose sobre os teores de Fe, independentemente do tipo de LETA (corrigido e não corrigido) utilizado.

Figura 21 - Teores de Fe em função das doses de LETA.



Fonte: elaborado pela autora (2026).

Nota: Os pontos representam as observações individuais e a linha contínua corresponde ao modelo ajustado, descrito por uma função senoidal ao quadrado ($p \leq 0,05$).

A regressão linear ajustada ($y = 0,0006x + 0,0282$) evidencia que o aumento das doses de LETA promove uma elevação gradual do teor de ferro no solo. O coeficiente angular positivo indica que, para cada tonelada por hectare de LETA aplicada, há um aumento médio no teor de Fe, ainda que de pequena magnitude, o que é esperado para micronutrientes. O coeficiente de determinação ($R^2 = 0,62$) indica que 62% da variação observada nos teores de ferro pode ser explicada pelas doses de LETA, o que evidencia um ajuste satisfatório do modelo aos dados experimentais.

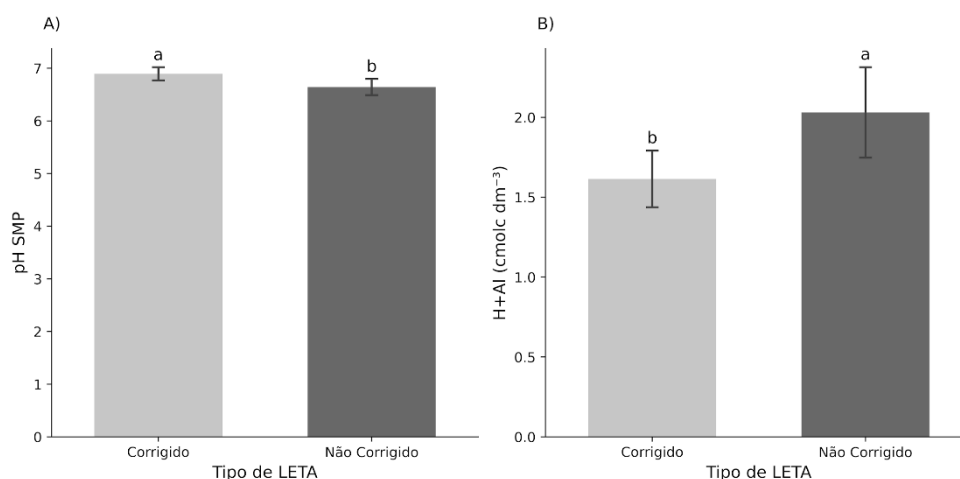
O aumento gradual dos teores de Fe pode estar relacionado a própria composição dos LETAs, que apresentam partículas provenientes da água bruta durante o processo de tratamento da água. Esse comportamento é coerente com a literatura, que descreve os LETAs como materiais de composição mineral heterogênea, capazes de influenciar os teores de micronutrientes no solo após sua aplicação (Ippolito *et al.*, 2011; Bittencourt *et al.*, 2012).

O aumento dos teores de ferro (Fe) com o aumento das doses de LETA está associado à própria composição do resíduo, rico em óxidos e hidróxidos de ferro. Nessas formas, o Fe apresenta baixa solubilidade e biodisponibilidade, não sendo prontamente absorvido pelas plantas. Dessa forma, os teores observados neste estudo não indicam, nas condições avaliadas, risco potencial ao solo ou ao desenvolvimento vegetal, comportamento consistente com o relatado para resíduos de ETA aplicados ao solo (Ippolito *et al.*, 2011; Kabata-Pendias, 2011).

A ausência de efeito significativo do tipo de LETA indica ainda que a correção do pH do resíduo não foi suficiente para alterar a dinâmica do ferro no solo no curto prazo, sugerindo que o comportamento do Fe extraível foi controlado principalmente pela dose aplicada, e não por modificações na reação do solo nas condições experimentais adotadas.

As Figuras 22A e 22B, indicam diferença significativa entre os tipos de LETA avaliados. Na figura 22A, o pH SMP foi maior no tratamento com LETA corrigido, enquanto o LETA não corrigido apresentou valor inferior, com diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos. Na Figura 22B, a acidez potencial (H+Al) foi menor no LETA corrigido e maior no LETA não corrigido, com diferença estatisticamente significativa, conforme indicado pelas letras distintas nas barras.

Figura 22 - pH SMP e acidez potencial (H+Al) em plantas de azevém (*Lolium multiflorum* Lam.) submetidas a diferentes tipos de LETA (corrigido e não corrigido)



Fonte: elaborado pela autora (2026).

As Figuras 22A e 22B evidenciam o efeito da correção dos LETAs sobre atributos relacionados à acidez do solo. Observa-se que o LETA corrigido apresentou valores de pH SMP significativamente maiores (Figura 22A) e de acidez potencial (H+Al) significativamente menores (Figura 22B) em comparação ao LETA não corrigido, indicando redução da acidez potencial no solo.

O pH SMP é utilizado como método tampão para estimar a necessidade de correção da acidez do solo, uma vez que reflete a acidez potencial (H+Al) e a capacidade tampão associada aos colóides do solo, especialmente às argilas e à matéria orgânica, conforme os princípios da fertilidade do solo descritos por Van Raij (2011). Assim, os valores mais elevados de pH SMP observados no tratamento com

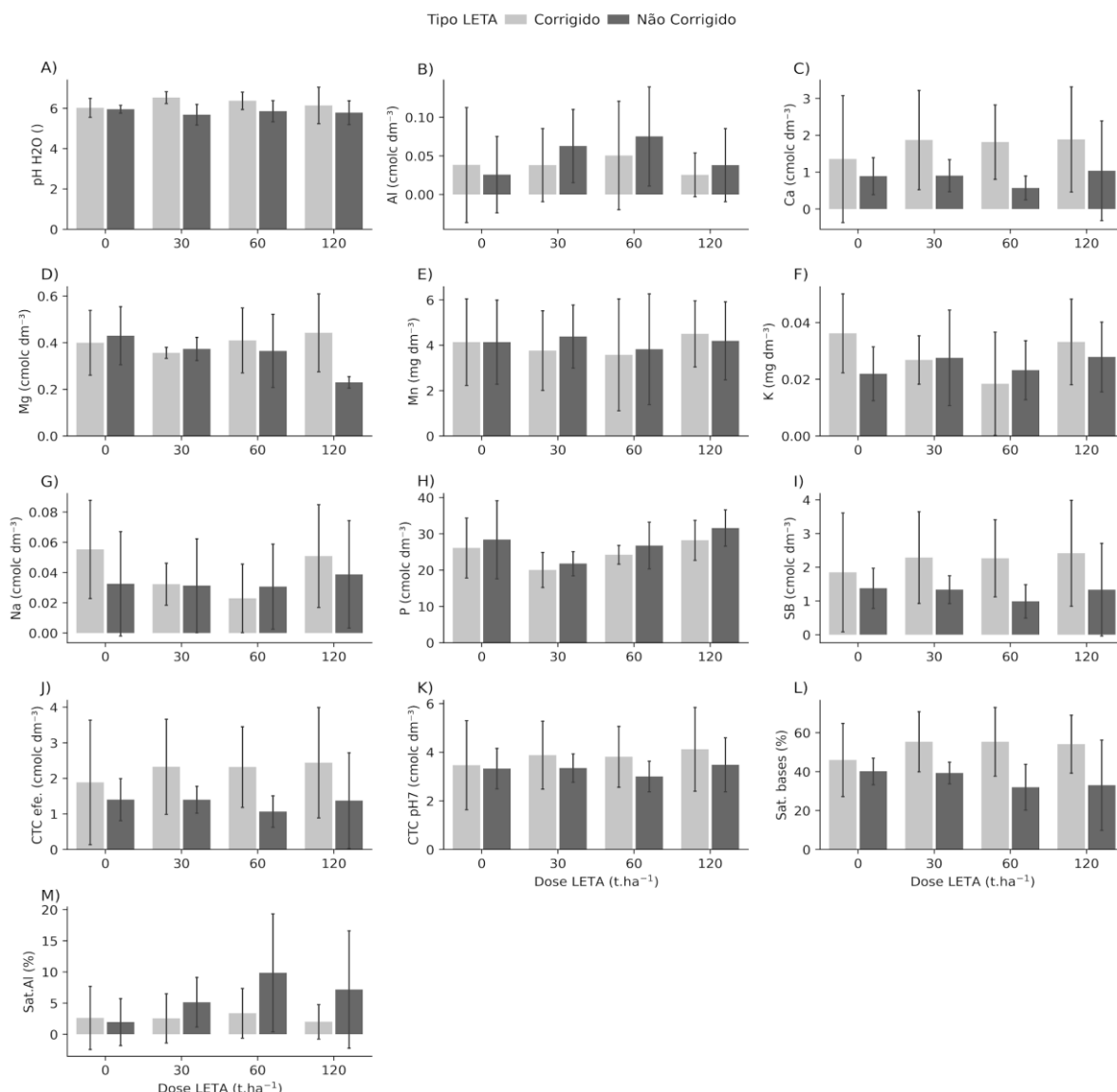
LETA corrigido refletem a diminuição da acidez potencial do solo, mesmo na ausência de alterações expressivas no pH em água.

Esse comportamento é corroborado pelos menores valores de $H+Al$ observados no LETA corrigido, que indicam a redução da quantidade de íons H^+ e Al^{3+} adsorvidos aos sítios de troca do solo. Por outro lado, o LETA não corrigido apresentou valores mais elevados de acidez potencial, evidenciando que a aplicação do resíduo sem correção tende a manter níveis mais altos de acidez potencial no solo.

Resíduos de estações de tratamento de água apresentam composição química variável e podem influenciar atributos relacionados à acidez do solo quando aplicados sem correção prévia, o que justifica a adoção de práticas de correção alcalina dos resíduos antes de sua utilização agrícola (Botero, 2009). Nesse sentido, os resultados indicam que a correção prévia do LETA é determinante para mitigar seus efeitos sobre a acidez potencial do solo, promovendo condições químicas mais adequadas ao uso agrícola.

As Figuras 23 (A–M) mostram que os atributos químicos do solo pH em água, Al, Ca, Mg, Mn, K, Na, P, soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions efetiva (CTCe), capacidade de troca de cátions a pH 7,0 (CTC pH 7,0), saturação por bases (V%) e saturação por alumínio (m%) não apresentaram diferenças estatisticamente significativas em função dos tipos de LETA (corrigido e não corrigido), das doses aplicadas ou da interação entre esses fatores.

Figura 23 - Variáveis que não apresentaram diferenças significativas: pH água, Al, Ca, Mg, Mn, K, Na, P, SB, CTC efetiva, CTC pH 7, Sat. Bases e Sat. Al



Fonte: elaborado pela autora (2026).

A ausência de resposta do pH em água indica que, no período avaliado, a aplicação dos LETAs não promoveu alterações na acidez ativa do solo, atributo que expressa a concentração imediata de íons H⁺ na solução do solo. Esse resultado evidencia que, embora tenham sido observadas diferenças em atributos relacionados à acidez potencial, como o pH SMP e o H⁺Al, tais alterações não se refletiram em alterações do pH em água durante o período experimental.

Os teores de Al e a saturação por alumínio (m%) não apresentaram variação significativa entre os tratamentos, estudos com LETAs indicam que modificações nesses atributos dependem das características do solo, das doses aplicadas e do

tempo de avaliação, sendo comum, a ausência de resposta em avaliações de curto prazo (Babatunde; Zhao, 2007; Ippolito *et al.*, 2011).

Para os cátions básicos Ca, Mg e K, a soma de bases (SB) e a saturação por bases (V%), não apresentam efeito significativo, sugerindo que os LETAs, nas condições avaliadas, não atuaram como fontes relevantes de bases trocáveis. Esse comportamento é coerente com as características dos LETAs.

Os teores de P também não apresentaram resposta significativa à aplicação dos LETAs. Trabalhos que avaliam o uso agrícola desses resíduos relatam que o fósforo presente no LETA tende a apresentar baixa disponibilidade, devido à sua associação a fases minerais pouco solúveis, o que limita alterações detectáveis nas análises químicas de solo, especialmente no curto prazo (Ippolito *et al.*, 2011).

Em relação aos elementos Mn e Na, a ausência de diferenças significativas indica que a aplicação dos LETAs não promoveu acúmulo desses elementos no solo, mesmo nas maiores doses avaliadas. Resultados semelhantes são descritos na literatura, indicando que, quando aplicados em doses agronomicamente viáveis, os resíduos de ETA não elevam de forma expressiva os teores de sódio ou micronutrientes metálicos, reduzindo riscos associados à salinização ou toxicidade (Bittencourt *et al.*, 2012).

Por fim, a inexistência de diferenças significativas entre a CTCe e a CTC a pH 7,0 é consistente com estudos que indicam que os LETAs, por apresentarem natureza predominantemente mineral e baixo teor de matéria orgânica, não promovem incrementos imediatos na CTC do solo, sendo tais efeitos dependentes de processos de médio e longo prazo (Ippolito *et al.*, 2011).

4.3.3 Combinação de LETA e LETÉ e seus efeitos nos atributos físicos e químicos do solo

A Tabela 19 apresenta um resumo da significância estatística dos fatores Insumo, Correção e da interação Insumo × Correção sobre os atributos químicos e físicos do solo, obtida por meio do teste F. Os tratamentos avaliados correspondem ao LETA e à mistura LETA:LETÉ (fator tipo de insumo), bem como ao LETA corrigido e não corrigido (fator tipo de correção), todos aplicados na dose de 60 t ha⁻¹.

Tabela 19 - Significância estatística dos fatores Insumo, Correção e da interação Insumo × Correção sobre os atributos químicos e físicos do solo, avaliada pelo teste F ($p \leq 0,05$)

Fonte de Variação	Significância													
	Atributos químicos do solo										Atributos físicos do solo			
	pH	pH SMP	P	K	Ca	Mg	Na	Al	Fe	Mn	Dp	Argila	Silte	Areia
Insumo	NS	NS	*	NS	*	*	*	*	NS	NS	*	NS	NS	NS
Correção	NS	*	NS	NS	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Interação														
Insumo*	NS	*	NS	NS	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Correção														

Fonte: elaborado pela autora (2026).

Nota: NS = não significativo pelo teste F ($p > 0,05$); * = significativo pelo teste F ($p \leq 0,05$).

As médias dos atributos químicos e físicos do solo que apresentaram efeito significativo em função do fator insumo estão apresentadas na Tabela 20.

Tabela 20 - Valores médios dos atributos químicos do solo e da densidade de partículas em função do fator insumo

Fator de tratamento	Tratamentos	Comparações de médias					
		Atributos químicos do solo					Atributos físicos do solo
		P	Ca	Mg	Na	Al	Dp
Insumo	LETA	27,72 b	1,20 b	0,46 b	6,17 b	0,03 b	2,50 a
	Mistura						
	LETA_LETE	58,14 a	2,10 a	0,61 a	11,80 a	0,06 a	2,17 b

Fonte: elaborado pela autora (2026).

Nota: Médias seguidas por letras distintas na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Conforme apresentado na Tabela 21, a mistura LETA:LETE apresentou maiores valores médios de P, Ca, Mg, Na e Al, enquanto o tratamento com LETA isolado apresentou maior densidade de partículas do solo.

Os valores médios do pH SMP e do teor de Ca do solo em função da correção da acidez são apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 - Valores médios do pH SMP e do teor de cálcio que apresentaram efeito significativo em função da correção da acidez

Fator de tratamento	Tratamentos	Comparações de médias	
		Atributos químicos do solo	
		pH SMP	Ca
Correção	Corrigido	6,95 a	1,95 a
	Não Corrigido	6,66 b	1,34 b

Fonte: elaborado pela autora (2026).

Nota: Médias seguidas por letras distintas na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

A condição de pH corrigido apresentou valores médios superiores de pH SMP e Ca em relação ao solo que recebeu o insumo com pH não corrigido, todos a partir da dose aplicada de 60 t ha⁻¹ (Tabela 22). A interação entre o tipo de insumo e a correção da acidez influenciou significativamente os valores de pH SMP e Ca no solo, conforme apresentado na Tabela 22.

Tabela 22 - Valores médios do pH SMP e do teor de cálcio que apresentaram interação significativa entre insumo e correção da acidez

Fator de tratamento	Tratamentos	Comparações de médias	
		Atributos químicos do solo	
		pH SMP	Ca
Insumo*Correção	LETA Corrigido	6,95 a	1,82 a
	LETA não corrigido	6,66 b	0,57 b
	LETA_LETE Corrigido	6,85 a	2,09 a
	LETA_LETE não corrigido	6,84 b	2,11 a

Fonte: elaborado pela autora (2026).

Nota: Médias seguidas por letras distintas na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$), considerando a interação entre insumo e correção.

A interação entre o tipo de insumo e a correção da acidez influenciou significativamente os valores de pH SMP e de Ca no solo (Tabela 22). Para o pH SMP, observou-se aumento dos valores médios na condição corrigida, independentemente

do insumo utilizado, evidenciando o papel predominante da correção da acidez na neutralização da acidez potencial do solo.

Os resultados indicam que os atributos químicos do solo responderam de forma mais evidente à aplicação de LETA e LETE quando comparados aos atributos físicos. Esse comportamento é consistente com o fato de que a aplicação de resíduos atua, inicialmente, sobre a composição química do solo, enquanto alterações em propriedades físicas tendem a ocorrer de forma mais lenta e gradual, especialmente em avaliações de curto a médio prazo (Hillel, 2003).

O efeito do fator Insumo (LETA:LETE) observado para P, Ca, Mg, Na e Al evidencia que os resíduos apresentam comportamentos distintos no solo, refletindo diferenças na sua composição e nos processos de tratamento aos quais são submetidos. Enquanto os LETAs apresentam maior associação com componentes minerais, os LETEs se caracterizam pelo maior aporte de nutrientes ao solo, o que pode resultar em respostas distintas nos atributos químicos, conforme descrito por Ippolito *et al.* (2011).

A correção da acidez influenciou significativamente apenas o pH SMP e os teores de Ca, resultado diretamente relacionado ao efeito da correção alcalina dos insumos aplicados sobre a acidez potencial do solo e ao fornecimento de cálcio. A ausência de resposta significativa para os demais nutrientes indica que, nas condições avaliadas, a variação observada esteve mais associada ao tipo de resíduo aplicado do que à elevação do pH em si.

A interação significativa entre Insumo e Correção para pH SMP e Ca indica que a resposta à correção da acidez variou em função do resíduo utilizado, reforçando que LETA e LETE não apresentam comportamento uniforme quando associados à calagem, o que deve ser considerado no manejo químico do solo.

Em relação aos atributos físicos, a ausência de efeito significativo para argila, silte e areia confirma que a textura do solo não foi modificada pela aplicação desses resíduos quando comparados entre si a partir de uma mesma dose de 60 t ha⁻¹ e no período avaliado. O efeito observado para a densidade de partículas (Dp) sugere influência da natureza dos materiais adicionados ao solo, onde materiais com maior teor de matéria orgânica, proporcionada pelo LETE na Mistura LETA:LETE em relação ao LETA de forma isolado, adiciona partículas de menor massa específica ao solo, reduzindo sua Dp.

De forma integrada, os resultados mostram que a aplicação de LETA e LETE promoveu alterações predominantemente químicas no solo, enquanto os atributos físicos permaneceram, em grande parte, inalterados no período avaliado.

4.4 Conclusões

A resposta do solo foi condicionada principalmente ao tipo de LETA e à correção prévia da acidez, enquanto as doses aplicadas exerceram influência limitada.

A aplicação de LETAs promoveu alterações nos atributos físicos e químicos do Neossolo Quartzarênico, com efeito significativo da correção da acidez. Observou-se modificação na composição granulométrica do solo, com aumento do teor de argila de aproximadamente 3% para valores superiores a 5% na dose de 120 t ha⁻¹, representando incremento em torno de 3% na fração fina, acompanhado da redução da fração areia de cerca de 95–96% para aproximadamente 92%.

Do ponto de vista químico, a aplicação de LETAs promoveu redução da acidez potencial, evidenciada pelo aumento do pH SMP e pela diminuição dos valores de H+Al, sem alterações expressivas nos demais atributos químicos ao longo do período avaliado, demonstrando que a correção da acidez do LETA é determinante para os efeitos observados.

Dessa forma, o uso de LETAs, especialmente quando corrigidos, demonstra potencial como condicionador de solo em ambientes arenosos, promovendo melhorias nos atributos físicos e químicos sem comprometer a qualidade do solo.

5 Considerações finais

Os resultados indicam que o uso agrícola de lodos de estação de tratamento de água em solos arenosos é quimicamente seguro, desde que o resíduo seja previamente corrigido quanto à acidez. A correção do pH mostrou-se condição essencial para modular a disponibilidade de elementos potencialmente tóxicos e assegurar maior estabilidade química do sistema solo-planta.

A ausência de respostas expressivas às doses reforça que o LETA atua predominantemente como condicionador do solo, e não como fonte direta de nutrientes. A combinação com lodo de estação de tratamento de esgoto ampliou os efeitos agronômicos sem comprometer a segurança química do sistema.

Dessa forma, o uso de LETAs, isolados ou combinados com LETEs, apresenta potencial para aplicação agrícola em solos arenosos, desde que adotados critérios técnicos de correção, manejo e monitoramento, em conformidade com a legislação vigente.

6 Referências

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. **An Assessment of Cropland Application of Water Treatment Residuals**. USA: AWWA Research Foundation, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004:2004**: resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

BARBOSA, R. M. *et al.* A toxicidade de despejos (lodos) de estações de tratamento de água à *Daphnia Similis* (Cladocera, Crustacea). *In*: Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000. **Anais [...]** 2000.

BARROW, N. J.; HARTEMINK, A. E. The effects of pH on nutrient availability depend on both soils and plants. **Plant and Soil**, v. 487, n. 1, p. 21-37, 2023.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica do solo. *In*: **Fundamentos da matéria orgânica do solo**. Porto Alegre: Genesis, 2006.

BITTENCOURT, S.; SERRAT, B. M.; AISSE, M. M.; MARIN, L. M. K. D. S.; SIMÃO, C. C. Application of sludges from water treatment plant and from sewage treatment plant in degraded soil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 17, n. 3, p. 315-324, 2012.

BOTERO, W. G.; SANTOS, A. dos; OLIVEIRA, L. C. de, ROCHA, J. C. Caracterização de lodo gerado em estações de tratamento de água: perspectivas de aplicação agrícola. **Química Nova**, v. 32, n. 8, p. 2018-2022, 2009.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020. Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de bio sólido em solos, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 21 ago. 2020.

BRONICK, Carol Jean; LAL, Rattan. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, v. 124, n. 1-2, p. 3-22, 2005.

CQFS-RS/SC. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10.ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul, 2004. 400 p.

CQFS-RS/SC. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 11.ed. Santa Maria: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul, 2016. 401 p.

DASSANAYAKE, K. B.; JAYASINGHE, G. Y.; SURAPANENI, A.; HETHERINGTON, C. A review on alum sludge reuse with special reference to agricultural applications and future challenges. **Waste Management**, v.38, p.321-335, 2015.

DAYTON, E. A.; BASTA, N. T. A method for determining the phosphorus sorption capacity and amorphous aluminum content of drinking water treatment residuals. **Journal of Environmental Quality**, v. 34, p. 1112–1118, 2005.

DEXTER, A. R. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter. **Geoderma**, 2004.

EMBRAPA CLIMA TEMPERADO; EMBRAPA GADO DE LEITE. **Azevém BRS Integração**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2017. 1 folder (2 p.). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1073557>. Acesso em: 21 jan. 2026.

EMBRAPA. Manual de laboratórios: solo, água, nutrição vegetal, nutrição animal e alimentos. São Carlos, SP: Embrapa Pecuária Sudeste, 2005. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/47646>. Acesso em: 21 jan. 2026.

HERNÁNDEZ, J.; MEURER, E. J. Adsorção de fósforo e sua relação com formas de ferro em dez solos do Uruguai. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 22, p. 223-230, 1998.

HILLEL, Daniel. **Introduction to environmental soil physics**. Elsevier, 2003.

IBRAHIM, M. M.; MAHMOUD, E. K.; IBRAHIM, D. A. Effects of vermicompost and water treatment residuals on soil physical properties and wheat yield. **International Agrophysics**, v.29, n.2, p. 157-164, 2015.

IPPOLITO, J. A.; BARBARICK, K. A.; ELLIOTT, H. A. Drinking water treatment residuals: a review of recent uses. **Journal of environmental quality**, v. 40, n. 1, p. 1-12, 2011.

KLEEMANN, N.; TORRES, D. P.; RIBEIRO, A. S.; BAMBERG, A. L. Cold finger with semi closed reflux system for sample preparation aiming at Al, Ca, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Ni, V and Zn determination in Drinking Water Treatment Sludge by MIP OES. **Analytica Chimica Acta**, v. 1096, p.9-17, 2020.

LIKUS, Magdalena *et al.* Iron-based water treatment residuals: Phase, physicochemical characterization, and textural properties. **Materials**, v. 14, n. 14, p. 3938, 2021.

LOMBI, E.; STEVENS, D.P.; MCLAUGHLIN, M.J. Effect of water treatment residuals on soil phosphorus, copper and aluminium availability and toxicity. **Environmental Pollution**, v.158, p. 2110–2116, 2010.

LUSTOSA CARVALHO, M. *et al.* Biochar amendment enhances water retention in a tropical sandy soil. **Agriculture**, v. 10, n. 3, p. 62, 2020.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. Agronômica Ceres, 2006.

MARSCHNER, H. (Ed.). **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants**. Academic Press, 2011.

MARSCHNER, Petra. **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. 3. ed. London: Academic Press, 2012.

MARTINAZZO, R.; SILVEIRA, C. A. P.; BAMBERG, A. L.; STUMPF, L.; STOCKER, C. M.; MONTEIRO, A. B.; dos SANTOS PEREIRA, I.; RIBEIRO, P. L.; GIACOMINI, S. J. Incorporation of retorted oil shale in Brazilian agricultural soil: An assessment of impacts after successive applications. **Journal of Cleaner Production**, p.118652, 2019.

MELO, R. E. de *et al.* Sewage Sludge Biochar Improves Water Use Efficiency and Bean Yield in a Small-Scale Field Experiment with Different Doses on Sandy Soil Under Semiarid Conditions. **Agriengineering**, [s.l.], v. 7, n. 7, p. 227, 9 jul. 2025.

MINTO, A.; GILMOUR, D.; JORAT, M. E.; TIERNEY, I. Potential benefits and disbenefits of the application of water treatment residuals from drinking water treatment processes to land in Scotland: development of a decision support tool. **Sustainability**, v. 15, n. 12, p. 9268, 2023.

OJEDA, Gerardo *et al.* Are soil–water functions affected by biochar application? **Geoderma**, v. 249, p. 1-11, 2015.

PEREIRA, I. dos S.; BAMBERG, A. L.; de SOUSA, R. O.; MONTEIRO, A. B.; MARTINAZZO, R.; SILVEIRA, C. A. P.; SILVEIRA, A. de O. Agricultural use and pH correction of anaerobic sewage sludge with acid pH. **Journal of Environmental Management**, v. 275, p. 111203, 2020.

RAHMAN, M. A. *et al.* Importance of mineral nutrition for mitigating aluminum toxicity in plants on acidic soils: current status and opportunities. **International journal of molecular sciences**, v. 19, n. 10, p. 3073, 2018.

RAHMATI, Roxana *et al.* Correlation of phosphorus adsorption with chemical properties of aluminum-based drinking water treatment residuals collected from various parts of the United States. **Molecules**, v. 27, n. 21, p. 7194, 2022.

REALI, M. A. P. Principais características quantitativas e qualitativas do lodo de ETA *In: Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água*. Coord. REALI, M. A. P. Rio de Janeiro, ABES, PROSAB, 240p., 1999.

REICHERT, J. M. *et al.* Água no solo. *In: Física do solo*. Viçosa: SBCS, 2016.

REINERT, D.J.; SATTler, A.; DENARDIN, J.E. Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. **Soil and Tillage Research**, v. 158, p. 123-136, 2016.

REYNOLDS, W. D.; DRURY, C. F.; TAN, C. S.; Fox, C. A.; YANG, X. M. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. **Geoderma**, v. 152, n. 3-4, p. 252–263, 2009.

RIBEIRO, P. L. *et al.* Liming and co-application of water treatment residuals with biosolids for conditioning sandy soils. **Land Degradation & Development**, v. 33, n. 7, p. 989-1001, 2022.

RIBEIRO, P. L. *et al.* Water treatment residuals for ameliorating sandy soils: Implications in environmental, soil and plant growth parameters. **Geoderma**, v. 407, p. 115537, 2022.

RIBEIRO, P. L. **Incorporação de lodos de estações de tratamento de água: efeitos sobre atributos do solo e desempenho agrônomo de cultivos anuais**. 2020. Dissertação (Mestrado em Manejo e Conservação do Solo e da Água) – Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2020.

RICHTER, C. A. **Tratamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água**, Edgard Blücher Ltda. São Paulo, 2016.

RIO GRANDE DO SUL. Conselho Estadual do Meio Ambiente (CONSEMA). **Resolução nº 461, de 19 de maio de 2022**. Define critérios e procedimentos para o uso de lodos gerados em estações de tratamento de água (LETAs) e seus produtos derivados em solos, e dá outras providências. Diário Oficial do Estado do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 15 jun. 2022.

ROCHA, Mateus do Carmo; DIAS, *et al.* Preliminary analysis of steelworks residues and their application in a sandy soil. **Research, Society and Development**, [s.l.], v. 10, n. 5, p. 1-12, 3 maio 2021.

SANTOS, H. G. *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018.

SANTOS, J. E. dos. Aproveitamento do lodo de ETA: biodegradabilidade e implicações ecotoxicológicas. 2023. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro, SP, 2023.

SILVA, L. S. Composição da fase sólida orgânica do solo. *In*: **Fundamentos de química do solo**. ed. MEURER, E.J. Porto Alegre, 2020. p. 59-83.

SILVA, M. R. *et al.* Acumulação de nutrientes e produção forrageira de aveia e azevém em função da aplicação de calcário e gesso em superfície. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 38, n. 3, p. 346-356, 2015.

SILVEIRA, M. L.; DRISCOLL, J. L.; SILVEIRA, C. P.; GRAETZ, D. A.; SOLLENBERGER, L. E.; VENDRAMINI, J. Land application of aluminum water treatment residual to Bahiagrass pastures: soil and forage responses. **Agronomy Journal**, v.105, n.3, p.796-802, 2013.

SIX, Johan *et al.* A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil and tillage research**, v. 79, n. 1, p. 7-31, 2004.

STÖCKER, C. M.; BAMBERG, A. L.; STUMPF, L.; MONTEIRO, A. B.; CARDOSO, J. H.; LIMA, A. C. R. Short-term soil physical quality improvements promoted by an agroforestry system. **Agroforestry Systems**, p.1-12, 2020.

STRECK, E. V. *et al.* **Solos do Rio Grande do Sul**. 3. ed. Porto Alegre: EMATER/RS, 2018.

TAY, D. Y. Y.; FUJINUMA, R.; WENDLING, L. A. Drinking water treatment residual use in urban soils: Balancing metal immobilization and phosphorus availability. **Geoderma**, v. 305, p. 113-121, 2017.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análises de solos, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da UFRGS, p. 174, 1995.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, Embrapa, 2017. 573p.

TEIXEIRA, S. T.; MELO, W. J. de; SILVA, É. T. da. Aplicação de lodo da estação de tratamento de água em solo degradado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, p. 91-94, 2005.

TURNER, T.; WHEELER, R.; STONE, A.; OLIVER, I. Potential Alternative Reuse Pathways for Water Treatment Residuals: Remaining Barriers and Questions: a Review. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 230, n. 9, p. 227, 2019.

VAN RAIJ, B. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. International Plant Nutrition Institute, 2011.

VILAR, C. C. *et al.* Capacidade máxima de adsorção de fósforo relacionada a formas de ferro e alumínio em solos subtropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1059–1068, 2010.

VILLANUEVA, Felipe Carlos Alvarez *et al.* Chemical changes and zinc phytoavailability in sewage sludge-amended soil estimated by the isotopic method. **Química Nova**, v. 35, p. 1348-1354, 2012.

WANG, F.; COUILLARD, D.; AUCLAIR, J. C.; CAMPBELL, P. G. C. Effects of alum treated waste water sludge on barley growth. **Water, Air Soil Pollut**, v. 108, p. 33–49, 1998.

WASSERMAN, J. C. *et al.* Mercury contamination in the sludge of drinking water treatment plants dumping into a reservoir in Rio de Janeiro, Brazil. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 28, p. 28713-28724, 2018.

YANG, G. H.; ZHU, G. Y.; LI, H. L.; HAN, X. M.; LI, J. M. Accumulation and bioavailability of heavy metals in a soil-wheat/maize system with long-term sewage sludge amendments. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 17, n. 8, p. 1861-1870, 2018.

ZHAO, Y.; LIU, R.; AWE, O. W.; YANG, Y.; SHEN, C. Acceptability of land application of alum-based water treatment residuals—an explicit and comprehensive review. **Chemical Engineering Journal**. v.353, p.717-726, 2018.

Apêndices

Apêndice A – Incorporação das doses de lodos de tratamento de água, calcário dolomítico, cloreto de potássio e superfosfato triplo, nas unidades experimentais



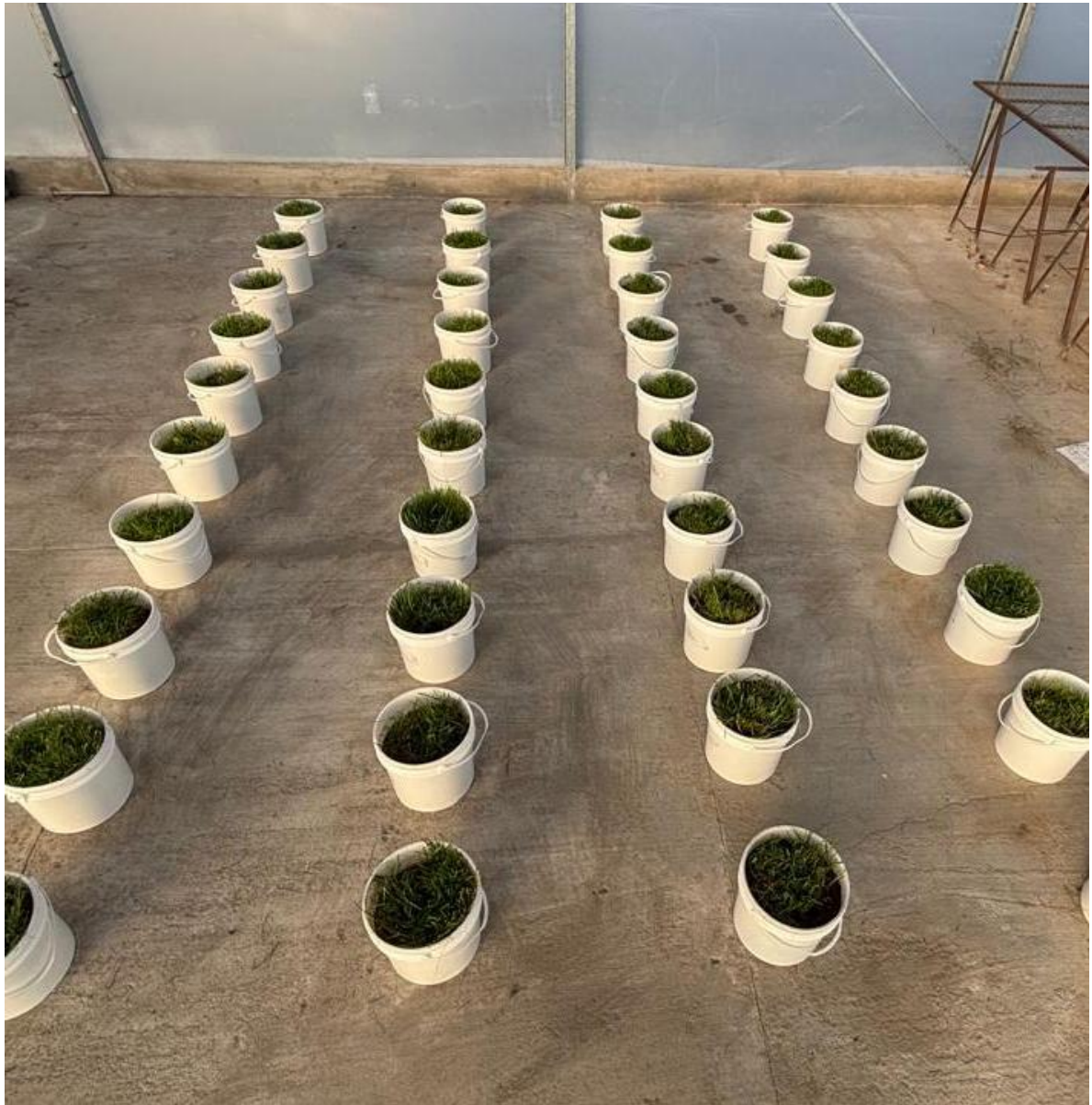
Apêndice B – Semeadura do azevém



Apêndice C – Cultivo de plantas de azevém antes da realização do primeiro corte, para determinação de massa seca



Apêndice D – Plantas de azevém após o corte, posteriormente, foi realizada a aplicação de ureia



Apêndice E – Análise da variância (ANOVA) para as variáveis: densidade de partículas, argila, silte e areia em solo cultivado com plantas de azevém (*Lolium multiflorum* Lam.) submetidas a diferentes doses e tipos de LETA

Variável	FV	gl	SQ	QM	F	p-valor	CV%
Densidade de partículas	Tipo de LETA (P)	1	0.019503	0.019503	3.07	0.1303	-
	Dose (S)	3	0.003084	0.001028	0.23	0.8746	-
	Interação P x S	3	0.060084	0.020028	4.47	0.0163	-
	Erro (a)	1	0.000331	0.000331			0.73
	Erro (b)	26	0.147468	0.005672			3.01
Argila	Tipo de LETA (P)	1	4.77E-05	4.77E-05	0.06	0.8212	-
	Dose (S)	3	0.025404	0.008468	9.36	0.0006	-
	Interação P x S	3	0.002123	0.000708	0.78	0.5191	-
	Erro (a)	1	0.000543	0.000543			11.42
	Erro (b)	26	0.024438	0.00094			15.02
Silte	Tipo de LETA (P)	1	0.000123	0.000123	0.05	0.8255	-
	Dose (S)	3	0.011936	0.003979	0.89	0.4662	-
	Interação P x S	3	0.004962	0.001654	0.37	0.7762	-
	Erro (a)	1	0.003666	0.003666			58.31
	Erro (b)	26	0.102733	0.003951			60.53
Areia	Tipo de LETA (P)	1	0.000163	0.000163	0.08	0.7911	-
	Dose (S)	3	0.025763	0.008588	8.16	0.0012	-
	Interação P x S	3	0.00275	0.000917	0.87	0.4740	-
	Erro (a)	1	0.00285	0.00285			4
	Erro (b)	26	0.029174	0.001122			2.51

Fonte: elaborada pela autora.

Nota: FV: Fonte de Variação; gl: graus de liberdade; SQ: soma de quadrados; QM: quadrado médio; F: valor de F calculado; p-valor: probabilidade de significância; CV%: coeficiente de variação.

Apêndice F – Análise da variância (ANOVA) para as variáveis químicas em solo cultivado com plantas de azevém (*Lolium multiflorum* Lam.) submetidos a diferentes doses e tipos de LETA

Nutriente	FV	gl	SQ	QM	F	p-valor	CV%
TEOR_pH_água	Tipo de LETA (P)	1	1.606.528	1.606.528	5.32	0.0605	-
	Dose (S)	3	0.150484	0.050161	0.18	0.9062	-
	Interação P x S	3	0.641734	0.213911	0.78	0.5191	-
	Erro (a)	1	1.670.766	1.670.766			21.38
	Erro (b)	26	5.811.688	0.223526			7.82
TEOR_pH_SMP	Tipo de LETA (P)	1	0.505013	0.505013	14.87	0.0084	-
	Dose (S)	3	0.044863	0.014954	0.79	0.5152	-
	Interação P x S	3	0.006612	0.002204	0.12	0.9493	-
	Erro (a)	1	0.05929	0.05929			3.6
	Erro (b)	26	0.485683	0.01868			2.02
TEOR_AI	Tipo de LETA (P)	1	0.001225	0.001225	0.15	0.7121	-
	Dose (S)	3	0.005526	0.001842	1.34	0.2916	-
	Interação P x S	3	0.00185	0.000617	0.45	0.7205	-
	Erro (a)	1	0.001538	0.001538			88.62
	Erro (b)	26	0.040977	0.001576			89.72
TEOR_Ca	Tipo de LETA (P)	1	6.221.628	6.221.628	2.96	0.1362	-
	Dose (S)	3	0.612634	0.204211	0.20	0.8921	-
	Interação P x S	3	0.627984	0.209328	0.21	0.8886	-
	Erro (a)	1	0.641356	0.641356			61.92
	Erro (b)	26	271.122	1.042.777			78.95
TEOR_Mg	Tipo de LETA (P)	1	0.022225	0.022225	1.39	0.2834	-
	Dose (S)	3	0.026834	0.008945	0.69	0.5721	-
	Interação P x S	3	0.074493	0.024831	1.90	0.1650	-
	Erro (a)	1	0.004877	0.004877			18.58
	Erro (b)	26	0.315416	0.012131			29.3
TEOR_Fe	Tipo de LETA (P)	1	1.39E-06	1.39E-06	0.00	0.9633	-
	Dose (S)	3	0.019742	0.006581	14.45	0.0000	-
	Interação P x S	3	0.000529	0.000176	0.39	0.7634	-
	Erro (a)	1	0.00084	0.00084			45.77
	Erro (b)	26	0.011114	0.000427			32.65
TEOR_Mn	Tipo de LETA (P)	1	0.155403	0.155403	0.01	0.9153	-
	Dose (S)	3	1.749.534	0.583178	0.89	0.4663	-
	Interação P x S	3	0.922559	0.30752	0.47	0.7082	-
	Erro (a)	1	0.018276	0.018276			3.32
	Erro (b)	26	1.493.483	0.574416			18.64

Nutriente	FV	gl	SQ	QM	F	p-valor	CV%
TEOR_K	Tipo de LETA (P)	1	9.83E-05	9.83E-05	0.32	0.5944	-
	Dose (S)	3	0.00044	0.000147	1.05	0.3952	-
	Interação P x S	3	0.000411	0.000137	0.98	0.4239	-
	Erro (a)	1	6,00E-07	6,00E-07			2.88
	Erro (b)	26	0.004479	0.000172			48.76
TEOR_Na	Tipo de LETA (P)	1	0.000395	0.000395	0.18	0.6886	-
	Dose (S)	3	0.00192	0.00064	1.45	0.2625	-
	Interação P x S	3	0.001055	0.000352	0.79	0.5130	-
	Erro (a)	1	0.001144	0.001144			91.8
	Erro (b)	26	0.016404	0.000631			68.16
TEOR_P	Tipo de LETA (P)	1	4.927.533	4.927.533	1.48	0.2690	-
	Dose (S)	3	3.436.978	1.145.659	2.69	0.0771	-
	Interação P x S	3	2.887.073	0.962358	0.02	0.9952	-
	Erro (a)	1	7.449.757	7.449.757			33.32
	Erro (b)	26	1.107.537	4.259.756			25.19
H_AI	Tipo de LETA (P)	1	1.387.392	1.387.392	13.82	0.0099	-
	Dose (S)	3	0.116586	0.038862	0.75	0.5364	-
	Interação P x S	3	0.021021	0.007007	0.14	0.9377	-
	Erro (a)	1	0.198342	0.198342			24.44
	Erro (b)	26	1.290.837	0.049648			12.23
SB	Tipo de LETA (P)	1	7.145.953	7.145.953	3.02	0.1331	-
	Dose (S)	3	0.415782	0.138594	0.12	0.9442	-
	Interação P x S	3	0.705022	0.235007	0.21	0.8870	-
	Erro (a)	1	0.701616	0.701616			48.33
	Erro (b)	26	2.958.914	1.138.044			61.55
CTCe	Tipo de LETA (P)	1	6.960.045	6.960.045	3.22	0.1229	-
	Dose (S)	3	0.393267	0.131089	0.12	0.9490	-
	Interação P x S	3	0.642983	0.214328	0.19	0.9010	-
	Erro (a)	1	0.637463	0.637463			44.92
	Erro (b)	26	2.932.647	1.127.941			59.75
CTC_pH7	Tipo de LETA (P)	1	2.235.968	2.235.968	0.81	0.4020	-
	Dose (S)	3	0.891001	0.297	0.25	0.8570	-
	Interação P x S	3	0.483653	0.161218	0.14	0.9358	-
	Erro (a)	1	1.646.042	1.646.042			36.08
	Erro (b)	26	3.314.881	1.274.954			31.76
SB_sat_arc	Tipo de LETA (P)	1	0.241766	0.241766	5.75	0.0534	-
	Dose (S)	3	0.011404	0.003801	0.19	0.9027	-
	Interação P x S	3	0.041379	0.013793	0.68	0.5729	-
	Erro (a)	1	7.62E-05	7.62E-05			1.2
	Erro (b)	26	0.526817	0.020262			19.6

Nutriente	FV	gl	SQ	QM	F	p-valor	CV%
m_sat_arc	Tipo de LETA (P)	1	0.045216	0.045216	0.72	0.4287	-
	Dose (S)	3	0.047946	0.015982	1.49	0.2518	-
	Interação P x S	3	0.022879	0.007626	0.71	0.5589	-
	Erro (a)	1	6.56E-05	6.56E-05			5.25
	Erro (b)	26	0.313556	0.01206			71.15

Fonte: elaborada pela autora.

Nota: FV: Fonte de Variação; gl: graus de liberdade; SQ: soma de quadrados; QM: quadrado médio; F: valor de F calculado; p-valor: probabilidade de significância; CV%: coeficiente de variação.

Apêndice G – Análise da variância (ANOVA) para os teores de nitrogênio (N), fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg), sódio (Na), alumínio (Al), boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) em função do tipo de LETA e doses aplicadas em plantas de azevém (*Lolium multiflorum* Lam.)

Variável	FV	SQ	gl	QM	F	p-valor	CV%
Nitrogênio (N)	Tipo de LETA (P)	1.397.489	1	1.397.489	4.07	0.0903	-
	Dose (S)	1.405.388	3	468.463	2.39	0.1021	-
	Interação P x S	384.550	3	128.183	0.66	0.5902	-
	Erro (a)	43.880	1	43.880			7.94
	Erro (b)	4.643.991	26	178.615			16.02
Fósforo (P)	Tipo de LETA (P)	0.033778	1	0.033778	0.74	0.4241	-
	Dose (S)	3.822.803	3	1.274.268	42.26	0.0000	-
	Interação P x S	0.04744	3	0.015813	0.52	0.6710	-
	Erro (a)	0.001269	1	0.001269			2.73
	Erro (b)	2.773.474	26	0.106672			25.03
Cálcio (Ca)	Tipo de LETA (P)	34.682	1	34.682	0.98	0.3600	-
	Dose (S)	73.269	3	24.423	2.15	0.1299	-
	Interação P x S	22.374	3	0.7458	0.66	0.5899	-
	Erro (a)	0.5330	1	0.5330			10.95
	Erro (b)	424.200	26	16.315			19.16
Magnésio (Mg)	Tipo de LETA (P)	0.0904	1	0.0904	0.04	0.8515	-
	Dose (S)	0.3101	3	0.1034	1.35	0.2906	-
	Interação P x S	0.3761	3	0.1254	1.63	0.2168	-
	Erro (a)	0.0020	1	0.0020			1.39
	Erro (b)	83.326	26	0.3205			17.58
Sódio (Na)	Tipo de LETA (P)	148.661	1	148.661	47.55	0.0005	-
	Dose (S)	48.175	3	16.058	10.86	0.0003	-
	Interação P x S	72.575	3	24.192	16.35	0.0000	-
	Erro (a)	0.0332	1	0.0332			13.56
	Erro (b)	43.564	26	0.1676			30.49
Alumínio (Al)	Tipo de LETA (P)	26.794.250	1	26.794.250	8.41	0.0273	-
	Dose (S)	15.248.452	3	5.082.817	0.96	0.4329	-
	Interação P x S	19.986.427	3	6.662.142	1.26	0.3183	-
	Erro (a)	0.1313	1	0.1313			0.53
	Erro (b)	137.188.974	26	5.276.499			33.29

Variável	FV	SQ	gl	QM	F	p-valor	CV%
Boro (B)	Tipo de LETA (P)	809.946	1	809.946	0.69	0.4375	-
	Dose (S)	12.791.425	3	4.263.808	1.74	0.1941	-
	Interação P x S	6.316.003	3	2.105.334	0.86	0.4794	-
	Erro (a)	2.098.327	1	2.098.327			27.53
	Erro (b)	57.807.177	26	2.223.353			28.33
Cobre (Cu)	Tipo de LETA (P)	0.0998	1	0.0998	1.05	0.3448	-
	Dose (S)	0.4380	3	0.1460	1.97	0.1543	-
	Interação P x S	0.0689	3	0.0230	0.31	0.8177	-
	Erro (a)	0.0682	1	0.0682			8.33
	Erro (b)	17.111	26	0.0658			8.18
Ferro (Fe)	Tipo de LETA (P)	0.0000	1	0.0000	0.31	0.5985	-
	Dose (S)	0.0000	3	0.0000	1.52	0.2441	-
	Interação P x S	0.0000	3	0.0000	0.41	0.7467	-
	Erro (a)	0.0000	1	0.0000			0
	Erro (b)	0.0000	26	0.0000			0.03
Manganês (Mn)	Tipo de LETA (P)	27.608.023	1	27.608.023	3.28	0.1201	-
	Dose (S)	79.757.226	3	26.585.742	6.57	0.0034	-
	Interação P x S	42.238.261	3	14.079.420	3.48	0.0376	-
	Erro (a)	2.200.314	1	2.200.314			12.24
	Erro (b)	149.191.789	26	5.738.146			19.76
Zinco (Zn)	Tipo de LETA (P)	0.3906	1	0.3906	8.24	0.0284	-
	Dose (S)	0.1198	3	0.0399	1.13	0.3627	-
	Interação P x S	0.2552	3	0.0851	2.41	0.1006	-
	Erro (a)	0.1209	1	0.1209			11.29
	Erro (b)	10.061	26	0.0387			6.38
Níquel (Ni)	Tipo de LETA (P)	1.340703	1	1.340703	8.76	0.0253	-
	Dose (S)	0.339273	3	0.113091	1.77	0.1883	-
	Interação P x S	0.796095	3	0.265365	4.16	0.0210	-
	Erro (a)	0.058906	1	0.058906			24.97
	Erro (b)	2.119774	26	0.08153			29.38
Cobre (Cu)	Tipo de LETA (P)	0.375532	1	0.375532	2.01	0.2059	-
	Dose (S)	6.224557	3	2.074852	20.95	0.0000	-
	Interação P x S	0.332636	3	0.110879	1.12	0.3674	-
	Erro (a)	0.416325	1	0.416325			13.77
	Erro (b)	4.537364	26	0.174514			8.91

Variável	FV	SQ	gl	QM	F	p-valor	CV%
Molibdênio (Mo)	Tipo de LETA (P)	1.12625	1	1.12625	6.59	0.0425	-
	Dose (S)	1.968251	3	0.656084	6.48	0.0036	-
	Interação P x S	0.118034	3	0.039345	0.39	0.7627	-
	Erro (a)	0.143002	1	0.143002			22.54
	Erro (b)	3.869009	26	0.148808			23
Potássio (K)	Tipo de LETA (P)	0.001243	1	0.001243	0.39	0.5576	-
	Dose (S)	0.012333	3	0.004111	5.09	0.0100	-
	Interação P x S	7.73E-05	3	2.58E-05	0.03	0.9921	-
	Erro (a)	6.19E-05	1	6.19E-05			0.77
	Erro (b)	0.045851	26	0.001764			4.11

Fonte: elaborada pela autora.

Nota: FV: Fonte de Variação; gl: graus de liberdade; SQ: soma de quadrados; QM: quadrado médio; F: valor de F calculado; p-valor: probabilidade de significância; CV%: coeficiente de variação.

Apêndice H – Análise da variância (ANOVA) para os acumulados de massa seca (MSS), nitrogênio (N), fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg), sódio (Na), alumínio (Al), boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) em função do tipo de LETA e doses aplicadas em plantas de azevém (*Lolium multiflorum* Lam.)

Variável	FV	gl	SQ	QM	F	p-valor	CV%
MSS	Tipo de LETA (P)	1	6.075.227	6.075.227	9.73	0.0206	-
	Dose (S)	3	1.017.159	339.053	24.21	0.0000	-
	Interação P x S	3	2.833.964	9.446.547	6.74	0.0030	-
	Erro (a)	1	2.261.795	2.261.795			5.74
	Erro (b)	26	8.301.362	3.192.832			21.56
Nitrogênio (N)	Tipo de LETA (P)	1	3.927.965	3.927.965	0.78	0.4122	-
	Dose (S)	3	1.904.803	6.349.344	9.29	0.0006	-
	Interação P x S	3	7.173.036	2.391.012	3.50	0.0370	-
	Erro (a)	1	0.021316	0.021316			0.46
	Erro (b)	26	3.879.309	1.492.042			12.2
Fósforo (P)	Tipo de LETA (P)	1	7.080.015	7.080.015	7.02	0.0380	-
	Dose (S)	3	8.769.177	2.923.059	0.57	0.6393	-
	Interação P x S	3	1.981.968	6.606.559	1.30	0.3057	-
	Erro (a)	1	5.631.219	5.631.219			7.7
	Erro (b)	26	1647.67	6.337.193			25.82
Cálcio (Ca)	Tipo de LETA (P)	1	44677.61	44677.61	6.18	0.0474	-
	Dose (S)	3	44597.09	14865.7	6.85	0.0028	-
	Interação P x S	3	6.121.076	2.040.359	0.94	0.4418	-
	Erro (a)	1	9.725.916	9.725.916			17.28
	Erro (b)	26	93452.37	3.594.322			33.22
Magnésio (Mg)	Tipo de LETA (P)	1	4.147.057	4.147.057	1.39	0.2824	-
	Dose (S)	3	4.451.254	1.483.751	5.34	0.0083	-
	Interação P x S	3	9.504.724	3.168.241	1.14	0.3597	-
	Erro (a)	1	0.010446	0.010446			0.12
	Erro (b)	26	17595.8	6.767.614			30.47
Sódio (Na)	Tipo de LETA (P)	1	1.910.597	1.910.597	15.06	0.0082	-
	Dose (S)	3	1.029.322	3.431.074	6.58	0.0034	-
	Interação P x S	3	3.092.786	1.030.929	1.98	0.1534	-
	Erro (a)	1	2.442.309	2.442.309			5.55
	Erro (b)	26	2.269.616	8.729.293			33.2

Variável	FV	gl	SQ	QM	F	p-valor	CV%
Alumínio (Al)	Tipo de LETA (P)	1	0.225669	0.225669	2.54	0.1623	-
	Dose (S)	3	5.050.382	1.683.461	8.34	0.0011	-
	Interação P x S	3	590.348	1.967.827	9.75	0.0005	-
	Erro (a)	1	0.056337	0.056337			14.54
	Erro (b)	26	1.249.801	0.480693			42.48
Boro (B)	Tipo de LETA (P)	1	0.726859	0.726859	2.05	0.2022	-
	Dose (S)	3	1.817.802	0.605934	4.10	0.0222	-
	Interação P x S	3	1.378.659	0.459553	3.11	0.0525	-
	Erro (a)	1	0.001961	0.001961			3.45
	Erro (b)	26	5.670.028	0.218078			36.34
Cobre (Cu)	Tipo de LETA (P)	1	0.136601	0.136601	13.58	0.0103	-
	Dose (S)	3	0.437192	0.145731	42.00	0.0000	-
	Interação P x S	3	0.23463	0.07821	22.54	0.0000	-
	Erro (a)	1	0.009504	0.009504			20.18
	Erro (b)	26	0.349331	0.013436			23.99
Ferro (Fe)	Tipo de LETA (P)	1	0.672925	0.672925	33.63	0.0012	-
	Dose (S)	3	4.112.935	1.370.978	31.89	0.0000	-
	Interação P x S	3	2.352.425	0.784142	18.24	0.0000	-
	Erro (a)	1	0.062923	0.062923			19.7
	Erro (b)	26	675.154	0.259675			40.02
Manganês (Mn)	Tipo de LETA (P)	1	1.770.105	1.770.105	12.50	0.0123	-
	Dose (S)	3	3.332.131	111.071	18.14	0.0000	-
	Interação P x S	3	2.104.996	7.016.652	11.46	0.0002	-
	Erro (a)	1	0.043296	0.043296			6.36
	Erro (b)	26	2.476.731	0.952589			29.82
Zinco (Zn)	Tipo de LETA (P)	1	0.008975	0.008975	0.07	0.7996	-
	Dose (S)	3	0.102306	0.034102	0.54	0.6601	-
	Interação P x S	3	0.335335	0.111778	1.77	0.1881	-
	Erro (a)	1	0.142066	0.142066			32.43
	Erro (b)	26	1.896.748	0.072952			23.24
Níquel (Ni)	Tipo de LETA (P)	1	0.042286	0.042286	0.13	0.7295	-
	Dose (S)	3	0.686904	0.228968	1.22	0.3298	-
	Interação P x S	3	2.380013	0.793338	4.24	0.0197	-
	Erro (a)	1	0.503397	0.503397			21.64
	Erro (b)	26	7.143373	0.274745			15.99
Cobre (Cu)	Tipo de LETA (P)	1	136942	136942	13.60	0.0102	-
	Dose (S)	3	437868.8	145956.3	42.00	0.0000	-
	Interação P x S	3	234977.3	78325.77	22.54	0.0000	-
	Erro (a)	1	9505.09	9505.09			20.16
	Erro (b)	26	349834	13455.15			23.98

Variável	FV	gl	SQ	QM	F	p-valor	CV%
Molibdênio (Mo)	Tipo de LETA (P)	1	5051.688	5051.688	22.03	0.0033	-
	Dose (S)	3	10395.48	3465.159	37.34	0.0000	-
	Interação P x S	3	3344.287	1114.762	12.01	0.0001	-
	Erro (a)	1	54.6421	54.6421			16.08
	Erro (b)	26	3254.71	125.1812			24.33
Potássio (K)	Tipo de LETA (P)	1	56891.8	56891.8	13.98	0.0096	-
	Dose (S)	3	96117.98	32039.33	10.66	0.0003	-
	Interação P x S	3	36735.98	12245.33	4.07	0.0226	-
	Erro (a)	1	62.00225	62.00225			3.26
	Erro (b)	26	74841.53	2878.52			22.23

Fonte: elaborado pela autora.

Nota: FV: Fonte de Variação; gl: graus de liberdade; SQ: soma de quadrados; QM: quadrado médio; F: valor de F calculado; p-valor: probabilidade de significância; CV%: coeficiente de variação.

Apêndice I – Análise da variância (ANOVA) para a mistura LETA_LETE (75:25) para os acumulados de nutrientes

Variável	FV	GL	SQ	QM	F	p
MSS	BLOCO	3	11.509.827	3.836.609	21.056	0.1697
	INSUMO	1	20.171.101	201.711	11.07	0.008838
	CORREÇÃO	1	11.615.451	1.161.545	63.748	0.03251
	INSUMO.CORREÇÃO	1	60.411.756	6.041.176	33.155	0.102
	RESÍDUO	9	16.398.731	1.822.081	.	.
Boro (B)	BLOCO	3	0.54909093	0.1830303	37.543	0.05346
	INSUMO	1	0.0049491225	0.004949122	0.10152	0.7573
	CORRECAO	1	0.4309266	0.4309266	88.391	0.01562
	INSUMO.CORRECAO	1	0.67798756	0.6779876	13.907	0.004703
	RESIDUO	9	0.43876873	0.04875208	.	.
Cálcio (Ca)	BLOCO	3	38.970.035	12990.01	16.471	0.2467
	INSUMO	1	48.765.447	48765.45	61.832	0.03461
	CORRECAO	1	50.116.488	5.011.649	0.63545	0.4459
	INSUMO.CORRECAO	1	11.609.384	11609.38	1.472	0.2559
	RESIDUO	9	70.981.444	7.886.827	.	.
Ferro (Fe)	BLOCO	3	51.423.194	1.714.106	0.81664	0.5165
	INSUMO	1	14.411.704	144.117	68.661	0.0278
	CORRECAO	1	51.187.931	5.118.793	24.387	0.1528
	INSUMO.CORRECAO	1	12.379.314	1.237.931	58.978	0.03807
	RESIDUO	9	18.890.809	2.098.979	.	.
Potássio (K)	BLOCO	3	54.421.632	1.814.054	0.54961	0.6609
	INSUMO	1	6.396.448	6.396.448	0.19379	0.6702
	CORRECAO	1	33.100.576	3.310.058	10.029	0.3428
	INSUMO.CORRECAO	1	26.711.637	26711.64	80.929	0.01925
	RESIDUO	9	29.705.702	3.300.634	.	.
Magnésio (Mg)	BLOCO	3	10.708.933	3.569.644	86.087	0.005207
	INSUMO	1	83.588.232	8.358.823	20.158	0.001511
	CORRECAO	1	99.389.498	993.895	23.969	0.156
	INSUMO.CORRECAO	1	93.761.457	9.376.146	0.22612	0.6457
	RESIDUO	9	37.319.112	4.146.568	.	.
Nitrogênio (N)	BLOCO	3	14.478.253	4.826.084	1.439	0.2949
	INSUMO	1	34.317.629	3.431.763	10.232	0.3382
	CORRECAO	1	11.728.741	1.172.874	0.34972	0.5688
	INSUMO.CORRECAO	1	25.472.461	2.547.246	0.75951	0.4061
	RESIDUO	9	30.184.172	3.353.797	.	.
Sódio (Na)	BLOCO	3	27.162.131	9.054.044	32.468	3,72E-02
	INSUMO	1	38.433.087	3.843.309	13.782	0.004827
	CORRECAO	1	21.131.492	2.113.149	0.75777	0.4066
	INSUMO.CORRECAO	1	41.987.801	419.878	15.057	0.2509
	RESIDUO	9	2.509.774	2.788.638	.	.

Variável	FV	GL	SQ	QM	F	p
Fósforo (P)	BLOCO	3	49.087.193	163.624	12.262	0.3556
	INSUMO	1	20.540.021	2.054.002	15.392	0.003493
	CORRECAO	1	3.642.754	3.642.754	27.298	0.1329
	INSUMO.CORRECAO	1	19.569.212	1.956.921	14.665	0.2567
	RESIDUO	9	12.009.779	133.442	.	.
Zinco (Zn)	BLOCO	3	1.840.907	0.6136357	26.278	0.1142
	INSUMO	1	43.174.606	4.317.461	18.489	0.001991
	CORRECAO	1	0.084768323	0.08476832	0.36301	0.5617
	INSUMO.CORRECAO	1	0.056906103	0.0569061	0.24369	0.6334
	RESIDUO	9	21.016.264	0.233514	.	.

Fonte: elaborada pela autora.

**Apêndice J – Análise da variância (ANOVA) para a mistura LETA_LETE (75:25)
para os teores de nutrientes**

Variável	FV	GL	SQ	QM	F	p
Alumínio (Al)	BLOCO	3	51.968.821	1.732.294	0.96675	0.4498
	INSUMO	1	9.647.236	9.647.236	0.53839	0.4818
	CORRECAO	1	99.480.676	9.948.068	55.518	0.04287
	INSUMO.CORRECAO	1	1.656.897	1.656.897	0.92468	0.3614
	RESIDUO	9	16.126.782	1.791.865	.	.
Ferro (Fe)	BLOCO	3	49.319.738	1.643.991	0.95142	0.4561
	INSUMO	1	38.654.198	3865.42	2.237	0.169
	CORRECAO	1	11.727.266	11727.27	67.869	0.0285
	INSUMO.CORRECAO	1	5.837.342	5.837.342	33.782	0.09923
	RESIDUO	9	15.551.447	1.727.939	.	.
Magnésio (Mg)	BLOCO	3	52.405.985	1.746.866	13.571	0.001091
	INSUMO	1	15.635.002	15.635	12.146	0.006883
	CORRECAO	1	0.04165681	0.04165681	0.32361	0.5834
	INSUMO.CORRECAO	1	0.20871192	0.2087119	16.214	0.2348
	RESIDUO	9	11.585.158	0.128724	.	.
Manganês (Mn)	BLOCO	3	64.072.872	2.135.762	0.95597	0.4542
	INSUMO	1	39.228.301	3922.83	17.559	0.00234
	CORRECAO	1	90.450.563	9.045.056	0.040486	0.845
	INSUMO.CORRECAO	1	70.182.506	7.018.251	0.31414	0.5888
	RESIDUO	9	20.107.141	2.234.127	.	.
Sódio (Na)	BLOCO	3	19.290.556	6.430.185	61.955	2,48E-03
	INSUMO	1	0.306916	0.306916	29.571	0.1196
	CORRECAO	1	17.053.748	1.705.375	16.431	0.00287
	INSUMO.CORRECAO	1	11.223.284	1.122.328	10.814	0.009402
	RESIDUO	9	0.93409451	0.1037883	.	.

Fonte: elaborada pela autora.

Apêndice K – Análise da variância (ANOVA) para a mistura LETA_LETE (75:25) para variáveis químicas e físicas do solo

Variável	FV	GL	SQ	QM	F	p
Densidade de partículas (dP)	BLOCO	3	0.12885	0.04295	1.487	0.2828
	INSUMO	1	0.4356	0.4356	15.081	0.003712
	CORRECAO	1	0.0625	0.0625	2.1639	0.1754
	INSUMO.CORRECAO	1	0.0196	0.0196	0.67859	0.4314
	RESIDUO	9	0.25995	0.02888333	.	.
Teor de Argila	BLOCO	3	10.019825	3.339942	4.0459	0.04473
	INSUMO	1	1.7956	1.7956	2.1751	0.1744
	CORRECAO	1	0.297025	0.297025	0.35981	0.5634
	INSUMO.CORRECAO	1	0.0729	0.0729	0.088309	0.7731
	RESIDUO	9	7.429625	0.8255139	.	.
Teor de Areia	BLOCO	3	1.9353	0.6451	0.16702	0.9159
	INSUMO	1	4.9729	4.9729	1.2875	0.2858
	CORRECAO	1	0.5476	0.5476	0.14177	0.7152
	INSUMO.CORRECAO	1	1.3456	1.3456	0.34838	0.5696
	RESIDUO	9	34.7624	3.862489	.	.
pH em água	BLOCO	3	1.608.525	0.536175	77.892	0.007164
	INSUMO	1	0.3136	0.3136	45.557	0.06158
	CORREÇÃO	1	0.2209	0.2209	32.091	0.1068
	INSUMO*CORREÇÃO	1	0.319225	0.319225	46.375	0.0597
	RESIDUO	9	0.619525	0.06883611	.	.
pH SMP	BLOCO	3	0.50425	0.1680833	30.377	4.87E-02
	INSUMO	1	0.007225	0.007225	13.057	0.2827
	CORRECAO	1	0.087025	0.087025	15.727	0.003275
	INSUMO.CORRECAO	1	0.0729	0.0729	13.175	0.005488
	RESIDUO	9	0.0498	0.005533333	.	.
Fósforo (P)	BLOCO	3	99.874125	33.29138	0.2355	0.8694
	INSUMO	1	370.15056	3701.506	26.184	0.0006305
	CORRECAO	1	19.0969	19.0969	0.13509	0.7217
	INSUMO.CORRECAO	1	0.442225	0.442225	0.0031283	0.9566
	RESIDUO	9	1272.2671	141.363	.	.
Potássio (K)	BLOCO	3	199.26045	66.42015	4.1397	0.0423
	INSUMO	1	32.661225	32.66123	2.0356	0.1874
	CORRECAO	1	6.943225	6.943225	0.43274	0.5271
	INSUMO.CORRECAO	1	1.2321	1.2321	0.076792	0.788
	RESIDUO	9	144.4018	16.04464	.	.

Variável	FV	GL	SQ	QM	F	p
Cálcio (Ca)	BLOCO	3	4.6134	1.5378	5.6066	0.01905
	INSUMO	1	3.2761	3.2761	11.944	0.007206
	CORRECAO	1	1.476225	1.476225	5.3821	0.04549
	INSUMO.CORRECAO	1	1.625625	1.625625	5.9268	0.0377
	RESIDUO	9	2.46855	0.2742833	.	.
Magnésio (Mg)	BLOCO	3	0.63735	0.21245	13.114	0.001234
	INSUMO	1	0.0961	0.0961	59.321	0.03764
	CORRECAO	1	0.013225	0.013225	0.81636	0.3898
	INSUMO.CORRECAO	1	0.060025	0.060025	37.052	0.08638
	RESIDUO	9	0.1458	0.0162	.	.
Alumínio (Al)	BLOCO	3	0.038125	0.01270833	26.143	8.919E-005
	INSUMO	1	0.005625	0.005625	11.571	0.007852
	CORRECAO	1	0.000625	0.000625	1.2857	0.2861
	INSUMO.CORRECAO	1	0.000625	0.000625	1.2857	0.2861
	RESIDUO	9	0.004375	0.0004861111	.	.
Ferro (Fe)	BLOCO	3	0.000475	0.0001583333	1.3256	0.3256
	INSUMO	1	0	0	0	1
	CORRECAO	1	0.000225	0.000225	1.8837	0.2031
	INSUMO.CORRECAO	1	0	0	0	1
	RESIDUO	9	0.001075	0.0001194444	.	.
Manganês (Mn)	BLOCO	3	45.425225	15.14174	10.077	0.003092
	INSUMO	1	1.380625	1.380625	0.91886	0.3628
	CORRECAO	1	1.677025	1.677025	1.1161	0.3183
	INSUMO.CORRECAO	1	0.648025	0.648025	0.43129	0.5278
	RESIDUO	9	13.522875	1.502542	.	.
Sódio (Na)	BLOCO	3	269.55452	89.85151	5.7481	0.01776
	INSUMO	1	126.61876	126.6188	8.1002	0.01921
	CORRECAO	1	14.194056	14.19406	0.90804	0.3655
	INSUMO.CORRECAO	1	0.04515625	0.04515625	0.0028888	0.9583
	RESIDUO	9	140.68371	15.63152	.	.

Fonte: elaborada pela autora.