

A REUTILIZAÇÃO AGRÍCOLA DO LODO DE MALTERIA NO CULTIVO DO MILHO (*Zea mays*)

ORGANIZADORES

Prof. Dr. Paulo Fortes Neto, Profa. Dra. Nara Lucia Perondi Fortes,
Ms. Lucilene Carvalho Silva, João Victor Guedes,
Vinicius da Silva Naldi, Walther Nabor Peloggia de Macedo



SÉRIE CIDADES SUSTENTÁVEIS



Prof. Dr. Paulo Fortes Neto
Profa. Dra. Nara Lucia Perondi Fortes
Ms. Lucilene Carvalho Silva
João Victor Guedes
Vinicius da Silva Naldi
Walther Nabor Peloggia de Macedo

Organizadores

A REUTILIZAÇÃO AGRÍCOLA DO LODO DE MALTERIA NO CULTIVO DE MILHO (Zea mays)

Série: Cidades Sustentáveis



Taubaté-SP
2024

EXPEDIENTE EDITORA

Diretora-Presidente

| Reitora: Profa. Dra. Nara Lucia Perondi Fortes

Conselho Editorial

| **Pró-reitora de Extensão:** Profa. Dra. Leticia Maria Pinto da Costa
| **Assessor de Difusão Cultural:** Prof. Me Luzimar Goulart Gouvêa
| **Coordenadora do Sistema Integrado de Bibliotecas:** Shirlei de Moura Righeti
| **Representante da Pró-reitoria de Graduação:** Profa. Dra. Emari Andrade
| **Representante da Pró-reitoria de Pesquisa e Pós-graduação:** Prof. Dr. Lourival da Cruz Galvão
| **Área de Biociências:** Profa. Dra. Milene Sanches Galhardo
| **Área de Exatas:** Prof. Dra. Érica Josiane Coelho Gouvêa
| **Área de Humanas:** Prof. Dr. Mauro Castilho Gonçalves
| **Consultora Ad hoc:** Profa. Dra. Adriana Leonidas de Oliveira

Equipe Técnica

| **Coordenador de Produção Editorial:** Alessandro Squarcini

Projeto Gráfico

| **NDG** – Núcleo de Design Gráfico da Universidade de Taubaté
| **Capa:** Alessandro Squarcini
| **Diagramação:** Rafael Campos de Jesus, Rayan O. Gardim Monteiro
| **Revisão:** Prof. Me Luzimar Goulart Gouvêa
| **Impressão:** Eletrônica (e-book)

Ficha Catalográfica

| **Bibliotecária:** Angelita S. Magalhães – CRB-8/6318

F738r	Fortes Neto, Paulo A reutilização agrícola do lodo de materalha no cultivo de milho (Zea mays) [recurso eletrônico] / Paulo Fortes Neto... [et al.]. – Dados eletrônicos. – Taubaté : EdUnitau, 2024.
	Formato: PDF Requisitos do sistema: Adobe Modo de acesso: world wide web
	ISBN: 978-65-86914-95-5 (on-line)
	1. Reciclagem do lodo. 2. Produtividade do milho. 3. Fertilidade do solo. I. Fortes, Nara Lucia Perondi. II. Silva, Lucilene Carvalho. III. Guedes, João Victor. IV. Naldi, Vinicius da Silva. V. Macedo, Walther Nabor Peloggia de. VI. Título.
	CDD – 628.4458

Índice para Catálogo sistemático

Reciclagem do lodo – 628.4458
Produtividade do milho – 633.15
Fertilidade do solo – 631.42

Copyright © by Editora da UNITAU, 2024

Nenhuma parte desta publicação pode ser gravada, armazenada em sistema eletrônico, fotocopiada, reproduzida por meios mecânicos ou outros quaisquer sem autorização prévia do editor.

EQUIPE TÉCNICA

Lucilene Carvalho Silva

Engenheira Bioquímica (Universidade de São Paulo-USP)
Mestre Desenvolvimento Interdisciplinar em Inovação Tecnológica (PIT)
Gerente de Qualidade, Segurança e Meio Ambiente da Malteria Soufflet Brasil Ltda

João Victor Guedes

Aluno de graduação do curso de Agronomia (Universidade de Taubaté-Unitau)
Bolsista de Iniciação Científica do Conselho Nacional de Ciência e Desenvolvimento Tecnológico (CNPq)

Nara Lucia Perondi Fortes

Bióloga (Universidade de Passo Fundo-UPF)
Doutor em Agronomia (Universidade do Estado de São Paulo-UNESP)
Professora do Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais (Universidade de Taubaté-Unitau)

Paulo Fortes Neto

Engenheiro Agrônomo (Universidade de Taubaté – Unitau)
Doutor em Agronomia (Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – (ESALQ/USP)
Coordenador adjunto do Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais (Universidade de Taubaté – Unitau)

Vinicius da Silva Naldi

Aluno de graduação do curso de Agronomia (Universidade de Taubaté-Unitau)
Bolsista de Iniciação Científica do Conselho Nacional de Ciência e Desenvolvimento Tecnológico (CNPq)

Walther Nabor Peloggia de Macedo

Engenheiro Agrônomo (Universidade de Taubaté – Unitau)
Aluno do Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais (Universidade de Taubaté – Unitau)

COMITE EDITORIAL

EDUARDO SONNEWEND BRONDÍZIO

Indiana University Bloomington

ELIZABETH DA COSTA NEVES FERNANDEZ DE ALMEIDA

Universidade de Lisboa

NELSON WELLAUSEN DIAS

Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

RITA DO AMARAL FRAGOSO

Universidade de Lisboa

SILVIO JORGE COELHO SIMÕES

Universidade Estadual Paulista

SUMÁRIO

A REUTILIZAÇÃO AGRÍCOLA DO LODO DE MALTERIA NO CULTIVO DE MILHO (Zea mays)

APRESENTAÇÃO.....	07
1. INTRODUÇÃO.....	09
2. DESENVOLVIMENTO.....	13
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	28
4. CONCLUSÃO.....	48
5. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	50

A REUTILIZAÇÃO AGRÍCOLA DO LODO DE MALTERIA NO CULTIVO DE MILHO (*Zea mays*)

APRESENTAÇÃO

O lodo proveniente do processo de malteação é um material orgânico composto de nutrientes essenciais para as plantas e, devido a essas características, a reutilização agrícola do lodo poderá ser uma alternativa a deposição no aterro sanitário. Para avaliar a reutilização agrícola do lodo, a Malteria Soufflet Brasil Ltda estabeleceu uma parceria com a FAPETI (Fundação de Apoio à Pesquisa, Tecnologia e Inovação da UNITAU) com o objetivo de estudar a viabilidade para a utilização do lodo no sistema de produção do milho (*Zea mays*).

O presente livro apresenta a composição química e patogênica do lodo de malteria e os resultados obtidos com a taxa de biodegradação do lodo no solo, a taxa de germinação das sementes no campo, os teores de macronutrientes e micronutrientes nas folhas de milho, a fertilidade do solo, a produtividade de grãos obtida nas culturas do milho em função da aplicação de doses de lodo (0, 24, 48 e 72 Mg ha⁻¹).

A composição do lodo apresentou os teores de metais pesados, Coliformes termotolerantes e *Salmonella* sp. abaixo dos limites considerados como inadequados para a reciclagem agrícola.

As doses de lodo aplicadas no solo apresentaram uma taxa adequada de biodegradação, favoreceram a germinação das sementes de milho, proporcionaram uma melhora na fertilidade do solo com o incremento na disponibilidade de fósforo. A produtividade de grãos obtidas com as doses de lodo ficou acima do valor verificado com a adubação mineral recomendada para a cultura do milho e dentro da média de produtividade observada no Brasil. Os teores de macronutrientes e micronutrientes absorvidos pelas plantas ficaram dentro da faixa nutricional adequada para a cultura do milho.

1. INTRODUÇÃO

No processo de malteação, os grãos de cevada (*Hordeum vulgare*) são macerados e submetidos alternadamente a períodos seco e úmido, em que acontece a lixiviação e a hidratação dos grãos. Posteriormente, os grãos são encaminhados para a germinação, em que ocorre a ativação de enzimas e a solubilização de carboidratos e proteínas, resultando na produção do malte verde, que segue para a secagem e torrefação, e o efluente é submetido ao sistema de tratamento de lodo ativado e, após passar pelo filtro prensa da origem, ao lodo de malteria (MUZZOLON et al., 2021).

O lodo caracteriza-se por ser um material orgânico, contendo, em sua composição química, nutrientes essenciais para as plantas agrícolas, assim a utilização como fertilizante orgânico apresenta-se como uma alternativa à deposição em aterros sanitários, pois a sua geração resulta de um processo sem contato com organismos patogênicos e metais pesados (BARBAZÁN, et al., 2011; MIRANDA, 2013). Apesar dessas qualidades, são escassos ou até inexistentes os estudos para avaliar a eficiência do lodo de malteria como fertilizante orgânico para as culturas agrícolas; por outro lado, a maioria dos trabalhos são realizados com o lodo de esgoto gerado pelo sistema urbano de tratamento de efluente sanitário (BAIOU et al., 2017; CERÓN, GONZÁLEZ, GUZMÁN, 2017; GONÇALVES

et al., 2019). Esses estudos têm demonstrado resultados promissores da aplicação de doses de lodo de esgoto no aumento da produtividade dos grãos de várias culturas, incrementos na absorção de macronutrientes e micronutrientes e melhorias na fertilidade do solo (BAIOU et al., 2017; GONÇALVES et al., 2019; ABREU-JÚNIOR, et al., 2019; IPPOLITO, et al., 2021). Em relação à aplicação de lodo de esgoto e produção de grãos, alguns pesquisadores observaram que a produtividade aumentou com as doses de lodo de esgoto aplicadas no solo, e os maiores valores foram obtidos com as doses variando entre 15 Mg.ha⁻¹ e 30 Mg.ha⁻¹ de lodo (base seca) (GOMES et al., 2007; QUINTANA et al., 2009; BREMM et al., 2012; GONÇALVES et al., 2019). Dentre os efeitos do lodo de esgoto sobre a composição química do solo, Trannin et al (2008) constataram que a fertilidade do solo melhorou com a aplicação de lodo de esgoto em doses superiores a 12 Mg.ha⁻¹ (base seca). Resultados similares também foram observados por outros autores, que relatam a elevação dos teores de nitrogênio (MACEDO et al., 2012), de fósforo (BONINI, et al., 2015), de matéria orgânica (IPPOLITO, et al., 2021) e da capacidade de troca de cátions (PIGOZZO et al. 2008), quando comparado com solo de áreas sem aplicação de lodo e com adubação mineral. Segundo Stehower (2000), esses resultados estão associados ao fato de que uma tonelada de lodo poderá, dependendo de sua composição, acrescentar ao solo cerca de 37 a 50 kg de nitrogênio e de

13 a 24 kg, de fósforo. O lodo de esgoto também apresenta em sua composição quantidades expressivas de magnésio, enxofre e micronutrientes, como ferro, cobre, zinco e manganês, que são suficientes para suprir as necessidades da maioria das culturas agrícolas, mesmo quando aplicado em doses abaixo de 10 Mg.ha⁻¹ de (base seca) no solo (GOMES, 2007; PIGOZZO et al. 2008; BREMM et al. 2012; BITTENCOURT et al, 2017).

Já o potássio, devido a sua baixa concentração na composição do lodo, advinda de sua alta solubilidade em água, tem sido o elemento que não apresenta aumento com a elevação das doses de lodo aplicadas no solo (ANDREOLI et al., 2014; NOBILE, et al., 2014; GONÇALVES et al., 2019). Alguns autores têm ainda observado que a utilização de lodo de esgoto como fertilizante orgânico poderá substituir, ou até reduzir o uso de fertilizantes nitrogenados e fosfatados aplicados nas culturas agrícolas (BITTENCOURT et al, 2017; GONÇALVES et al., 2019). Knopik et al (2018), realizando uma pesquisa nas áreas onde o lodo de esgoto foi aplicado na dose de 7 Mg.ha⁻¹ (base seca), entre 2012 a 2016, e se constatou que os agricultores reduziram a compra de fertilizantes e calcário, pois foi verificado um aporte médio ao solo de 912 kg.ha⁻¹ de carbono orgânico, 582 kg.ha⁻¹ de cálcio total, 160 kg.ha⁻¹ nitrogênio total, 143 kg.ha⁻¹ de magnésio, 24 kg.ha⁻¹ de fósforo, 22 kg.ha⁻¹ de enxofre, 6 kg.ha⁻¹ de sódio, 4 kg.ha⁻¹ de potássio e de 2,15 kg.ha⁻¹ e 0,76

kg.ha⁻¹, respectivamente para os micronutrientes zinco e cobre. Esses resultados demonstram que, quando o lodo de esgoto atende aos limites de contaminantes estabelecidos pela legislação, ele poderá ser utilizado como fertilizante orgânico na agricultura, pois apresenta, em sua composição, um elevado conteúdo de matéria orgânica e de nutrientes para as plantas (CERÓN, GONZÁLEZ, GUZMÁN, 2017; KNOPIK, et al., 2018; GONÇALVES et al., 2019; YADA, et al., 2020).

Com base no exposto, apresentaremos, nesta obra, os resultados verificados com a produtividade do milho (*Zea mays*) e os atributos químicos do solo fertilizados com doses de lodo de malteria em comparação com a adubação mineral.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Local do experimento

O experimento foi realizado durante 120 dias em uma área experimental da Fazenda Piloto do Departamento de Ciências Agrárias da Universidade de Taubaté (UNITAU) em Taubaté-SP, localizada a uma altitude de 577 m e com as coordenadas Geográficas 23°02'34" S e 45°31'02" W. O clima é do tipo Cwa (Sub-tropical), com chuvas de verão e com uma precipitação média anual de 1.300mm (FISCH, 1995).

2.2. Origem e composição do lodo de malteria

No processo de malteação, a cevada é macerada com períodos seco e úmido, em que acontece a lixiviação e a hidratação dos grãos. Posteriormente, os grãos são encaminhados para a germinação, em que ocorre a formação e a ativação de enzimas e a solubilização de carboidratos e proteínas. Por último, o malte verde passa por uma etapa de secagem e de torrefação. O efluente proveniente da maceração e germinação é enviado para a Estação de Tratamento de Efluentes e submetido ao processo de lodo ativado, dando origem ao lodo de malte (**Figura 1**), e sua composição química e patogênica encontra-se apresentado na **Tabela 1**. Analisando os resultados da composição do lodo apresentados na **Tabela 1**, verifica-se que os teores de metais pesados,

coliformes termotolerantes e *Salmonella* sp estão abaixo dos limites estipulados como inadequados pela Norma Técnica CETESB P 4.230/2021. Com esses valores de contaminantes dentro dos limites adequados, o lodo de malteria poderá ser aplicado com segurança em solos das áreas utilizadas para os cultivos agrícolas de espécies vegetais produtoras de grãos.

Tabela 1. Característica da composição química e patogênica do lodo de malteria

Variável	Resultados	⁽¹⁾ Limites
Arsênio total (mg kg ⁻¹)	< 0,05	75
Cadmio total (mg kg ⁻¹)	< 2	0,5
Chumbo total (mg kg ⁻¹)	< 3	840
Cobre total (mg kg ⁻¹)	< 2	4.300
Crômio total (mg kg ⁻¹)	< 2	500
Mercúrio total (mg kg ⁻¹)	< 0,001	57
Níquel total (mg kg ⁻¹)	< 6	75
Selênio total (mg kg ⁻¹)	< 0,01	100
Zinco total (mg kg ⁻¹)	< 1	7.500
pH	7,0	5,5 – 7,0
Nitrogênio total – Kjeldahl (g kg ⁻¹)	16,5	-
Nitrogênio amoniacal-NH ₃ (mg kg ⁻¹)	41,5	-
Nitrogênio nitrato e nitrito (mg kg ⁻¹)	< 10,0	-
Fósforo total (g kg ⁻¹)	28,7	-
Potássio total (g kg ⁻¹)	8,2	-
Sódio total (mg kg ⁻¹)	43,3	-
Sólidos totais voláteis (%)	< 10	-
Carbono orgânico total (g kg ⁻¹)	462	-
Umidade (%)	78	-
Coliformes termotolerantes	83,05	1.000
Salmonella sp (NMP/4g ST)	Ausente	3

⁽¹⁾ Norma Técnica CETESB P 4.230/2021.



Figura 1. Recepção do lodo de malteria na Fazenda Piloto do Departamento de Ciências Agrárias da Universidade

Em relação à composição da carga orgânica, o valor de carbono orgânico (465 g kg^{-1}) ficou acima dos valores observados por outros autores na composição de amostras de lodo de esgoto (COSTA, et al. 2018; ABREU-JÚNIOR et al. 2019).

Os teores de fósforo ($28,7 \text{ g kg}^{-1}$), potássio ($8,2 \text{ g kg}^{-1}$), cálcio ($16,8 \text{ g kg}^{-1}$) e magnésio ($9,6 \text{ g kg}^{-1}$) apresen-

tam valores superiores ao da compilação elaborada por Krahebuhl (2021), em amostras de lodo utilizadas nos trabalhos de reciclagem agrícola realizados no Brasil entre 1982 e 2019. Já o nitrogênio ($16,5 \text{ g kg}^{-1}$) determinado na amostra do lodo de malteria ficou cerca de 50% abaixo do valor observado no levantamento realizado por Krahebuhl (2021).

Os teores de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio verificados na composição do lodo (**Tabela 1**) estão de acordo com os valores apresentados por Raji et al (1996) na composição do lodo de esgoto utilizados para melhorar a fertilidade do solo.

2.3. Caracterização química do solo

Para a caracterização química inicial do solo foram coletadas, de forma aleatória na camada de 0-20 cm de profundidade, quatro amostras simples de solo. Após a coleta, as amostras foram misturadas e homogeneizadas para compor uma amostra composta e depois enviada para o Laboratório de Análise de Solo e Nutrição de Plantas do Departamento de Ciências Agrárias da Universidade de Taubaté. O solo da área foi classificado como Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (EMBRAPA, 2006) e apresentou a seguinte composição química: pH (CaCl_2) = 5,5; fósforo (mg dm^{-3}) = 24; matéria orgânica (mg dm^{-3}) = 18; potássio (mmolc.dm^{-3}) = 4,0; cálcio (mmolc dm^{-3}) = 25; magnésio (mmolc dm^{-3}) = 14; hidrogênio + alumínio (mmolc dm^{-3}) =

25; soma de bases (mmolc dm^{-3}) = 43,0; capacidade de troca de cátions (mmolc dm^{-3}) = 68,0 e saturação de bases (%) = 63. Os mesmos procedimentos foram utilizados para coletar nas 20 parcelas as amostras de solo, após os 120 dias de aplicação e de incorporação do lodo no solo.

2.4. Cálculo da taxa de aplicação do lodo

Para determinar a dose adequada do lodo a ser incorporada no solo, foram levados em consideração o teor do nitrogênio amoniacal ($16.562,5 \text{ mg kg}^{-1}$), o nitrogênio disponível no lodo (5 kg Mg^{-1}) e a quantidade de nitrogênio (120 kg ha^{-1}) para atender a necessidade da cultura do milho, conforme a metodologia preconizada por PIRES e ANDRADE (2014). Com base nessas premissas, foi determinado que a dose adequada do lodo para o cultivo do milho deverá ser igual a 24 Mg ha^{-1} de lodo (base seca). Seguem, abaixo, os procedimentos utilizados no cálculo.

Considerando:

- Nitrogênio Kjeldahl (N_{kj}) = $16.562,50 \text{ mg kg}^{-1}$
- Nitrogênio Amoniacal (N_{NH_3}) = $41,50 \text{ mg kg}^{-1}$
- Nitrogênio Nitrato e Nitrito ($N_{NO_3} + N_{NO_2}$) = $< 10,0 \text{ mg kg}^{-1}$
- Fração de Mineralização do Nitrogênio (FMN) = 30%
- Quantidade de Nitrogênio recomendado para a cultura do milho = 120 kg de N

Fórmula para o cálculo do Nitrogênio Disponível (NDisp)

$$\text{NDisp} = (\text{FM} / 100) \times (\text{Nkj} - \text{N}_{\text{NH}_3}) + (\text{N}_{\text{NH}_3}) + (\text{N}_{\text{NO}_3} + \text{N}_{\text{NO}_2})$$

$$\text{NDisp} = (30 / 100) \times (16.562,50 - 41,50) + (41,50) + (0 + 0)$$

$$\text{NDisp} = (0,30) \times (16.521) + 41,50$$

$$\text{NDisp} = 4.956,30 + 41,50$$

NDisp = 4.997,80 mg kg⁻¹ transformado 4,9 kg Mg⁻¹ e aproximando para 5 kg Mg⁻¹

Fórmula para o cálculo da Taxa Adequada de Nitrogênio (TAN)

TAN = Quantidade de Nitrogênio recomendada para a cultura / NDisp de Nitrogênio

$$\text{TAN} = 120 \text{ kg ha}^{-1} / 5,0 \text{ kg Mg}^{-1}$$

$$\text{TAN} = \underline{\underline{24 \text{ Mg de lodo (base seca)}}}$$

2.5. Delineamento experimental

Com a definição da dose adequada do lodo que será aplicada no solo, foram definidos os seguintes tratamentos: T1- sem aplicação de lodo (0 Mg ha⁻¹); T2 - sem aplicação de lodo e com adubação mineral convencional; T3 - aplicação de 1 vez a dose adequada de lodo (24 Mg ha⁻¹); T4 - aplicação de 2 vezes a dose adequada do lodo (48 Mg ha⁻¹) e T5 - aplicação de 3 vezes a dose adequado do lodo (72 Mg ha⁻¹).

O delineamento experimental foi o de blocos casualizados, com quatro blocos e cinco tratamentos distribuí-

dos aleatoriamente em 20 parcelas na área experimental (**Figura 2**).

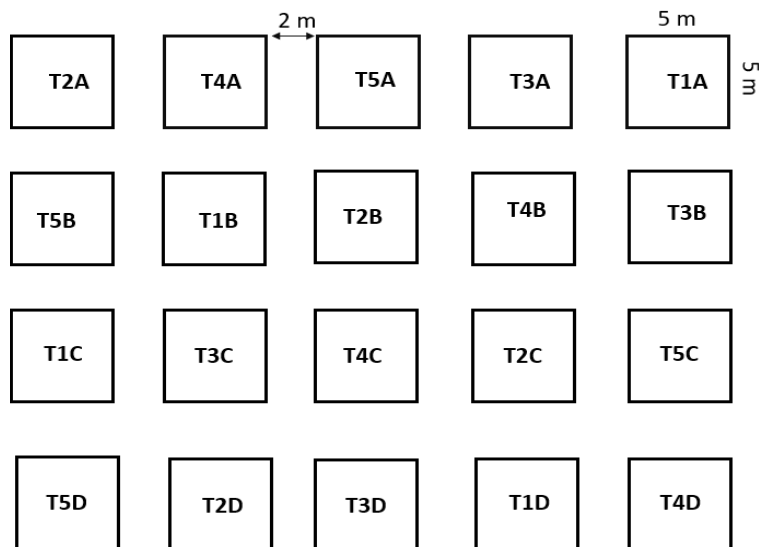


Figura 2. Distribuição das parcelas com os tratamentos na área experimental

As parcelas experimentais com dimensões de 5,0 x 5,0 m e com 2 m de distâncias entre si, foram demarcadas em uma área total de 1.170 m². As quantidades de lodo que foram aplicadas nas parcelas em bases seca e úmida e as quantidades total de lodo necessárias utilizadas para implantar o experimento estão apresentadas na **Tabela 2**.

Tabela 2. Os valores das doses de lodo em base seca e úmida, a quantidade de lodo por parcelas e a quantidade total de lodo para montar o experimento

Dose lodo	Dose lodo	Quantidade	Quantidade
Mg ha ⁻¹ (b.s)	Mg ha ⁻¹ (b.u)	kg parcela ⁻¹	kg
24	109	272	1.088
48	218	544	2.176
72	327	816	3.264
Total	-	-	6.528

b.s = base seca e b.u = base úmida

2.6. Preparo da área experimental para a aplicação do lodo

As vinte parcelas experimentais com dimensões de 5,0 x 5,0 m e com 2 m de distância entre si foram demarcadas em uma área total de 1.170 m². Após a demarcação das parcelas, foi realizada a aplicação do calcário dolomítico, foi feita a aração e o gradeamento na profundidade de 20 cm do solo. Depois de 50 dias, foi aplicado e distribuído o lodo superficialmente em cada parcela nas quantidades de 0, 24, 48 e 72 Mg.ha⁻¹ (base seca) e, posteriormente, com o auxílio de uma enxada rotativa, o lodo foi incorporado até 20 cm de profundidade do solo (**Figuras 3 e 4**).



Figura 3. Aplicação das doses de lodo na superfície do solo das parcelas experimentais



Figura 4. Distribuição superficial das doses de lodo biológico nas parcelas experimentais

2.7. Semeadura do milho

A semeadura foi realizada no dia 3 de outubro de 2021, respeitando o zoneamento agrícola para a cultura do milho. Foram utilizadas sementes de milho cultivar Agroceres 1015, e a semeadura foi realizada mecanicamente com a distribuição de 6 a 7 sementes por metro linear e com espaçamento de 0,80 cm entre linhas (**Figura 5**).



Figura 5. Semeadura do milho após a incorporação do lodo no solo

Foram deixadas duas fileiras centrais de cada parcela para serem utilizadas na coleta das plantas para determinar o rendimento da cultura do milho.

2.8. Determinação da biodegradação do lodo no solo

O ensaio para avaliar a taxa de biodegradação das doses de lodo no solo baseou-se no método de Bartha modificado, que consiste na captura de CO_2 liberado pela atividade microbiana do solo, por meio de uma solução alcalina de NaOH na concentração de $0,5 \text{ mol L}^{-1}$. O ensaio foi conduzido por 35 dias com 4 tratamentos e 5 repetições, totalizando cerca de 20 respirômetros (**Figura 6**).



Figura 6. Respirômetro (2L) utilizado com as misturas das doses de lodo com o solo e o recipiente plástico contendo a solução de NaOH ($0,5 \text{ mol L}^{-1}$)

Com base no teor de nitrogênio total determinado na composição do lodo, foram definidas as doses de 0, 24, 48 e 72 Mg ha^{-1} de lodo para serem misturadas ao solo. Assim, o ensaio foi montado com os seguintes tratamentos: T1 - 0 Mg ha^{-1} de lodo; T2 – 24 Mg ha^{-1} de lodo; T3 – 48 Mg ha^{-1} de lodo e T4 – 72 Mg ha^{-1} de lodo. Essas misturas foram colocadas dentro dos respirômetros e, depois de ajustada a umidade para 70% da capacidade de campo, os respirômetros foram incubados por 35 dias numa sala climatizada a $\pm 28^\circ\text{C}$. A determinação do CO_2 liberado foi avaliada semanalmente por meio das leituras de condutividade elétrica da solução de NaOH ($0,5 \text{ mol L}^{-1}$), medida de acordo com Rodela & Saboya (1999), até a estabilização das leituras por 3 dias consecutivos.

2.9. Análise foliar do milho

Para realizar a análise de macronutrientes e micronutrientes, foram amostradas 10 folhas coletadas em 10 plantas situadas nas três linhas centrais das parcelas, conforme a metodologia preconizada por Malavolta et al. (1997). Para cada amostra individual, padronizou-se retirar a folha índice, que consistiu na 1ª folha fisiologicamente madura, oposta e abaixo da espiga (**Figura 7**) e a folha após ser coletada para realizar a análise de tecido foliar (**Figura 8**).



Figura 7. Coleta da folha oposta e abaixo da espiga de milho

Depois de retirada a nervura central das folhas do milho, elas foram lavadas em água corrente e enxaguadas

com água destilada, acondicionadas em sacos de papel e colocadas para secar em estufas de ventilação forçada ajustada à temperatura de $\pm 65^{\circ}\text{C}$, até massa constante, e depois foram trituradas e enviadas para o Laboratório de Análises de Solos e Plantas da Universidade de Taubaté (UNITAU). Os teores de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S) e micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn e Zn) foram determinados nas folhas de milho, conforme os métodos descritos por Malavolta et al. (1997). Os teores de macronutrientes serão expressos em g.kg^{-1} e os de micronutrientes, em mg.kg^{-1} .



Figura 8. Folha de milho após a coleta para ser analisada.

2.10. Avaliação do rendimento do milho

Para avaliar o rendimento do milho, foram coletadas aleatoriamente aos 90 dias após a semeadura, as espigas em dez plantas situadas dentro da parcela útil (**Figura 9**).



Figura 9. O porte da espiga de milho colhida para determinar o rendimento de grãos.

Depois, as espigas foram colocadas em uma estufa de ventilação forçada a ± 65 °C, até atingir peso constante e pesados para a obtenção da massa seca. A produtividade foi estimada extrapolando-se os dados de massa seca dos grãos da área ocupada pelas dez plantas (2 m²) para um hectare.

2.11. Procedimentos estatístico

Os resultados foram avaliados estatisticamente por meio de análises da variância, e os efeitos dos tratamentos foram testados pelo teste F e, quando atingida a significância estatística, foi realizada a comparação entre médias pelo teste de Tukey em nível de porcentagem de probabilidade de erro igual a 5%.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Taxa de biodegradação do lodo no solo

Os resultados da liberação de CO_2 do solo que receberam a aplicação de 24, 48, 72 Mg ha^{-1} de lodo estão apresentados na **Figura 10** e observa-se uma crescente liberação de CO_2 para os solos com aplicação de 24, 48, 72 Mg ha^{-1} de lodo, quando comparado com o solo sem aplicação de lodo (0 Mg ha^{-1}). A atividade microbiana foi mais intensa com a elevação das doses de lodo aplicadas no solo entre os dias 14 e 28, para dose de 72 Mg ha^{-1} , e 21 e 28 dias para a dose com 48 Mg ha^{-1} , com posterior decréscimo (**Figura 10**). Esse comportamento pode ser atribuído à mineralização inicial do carbono orgânico prontamente oxidável, cuja exaustão conduz à redução do fluxo de CO_2 (MARTINES et al., 2006).

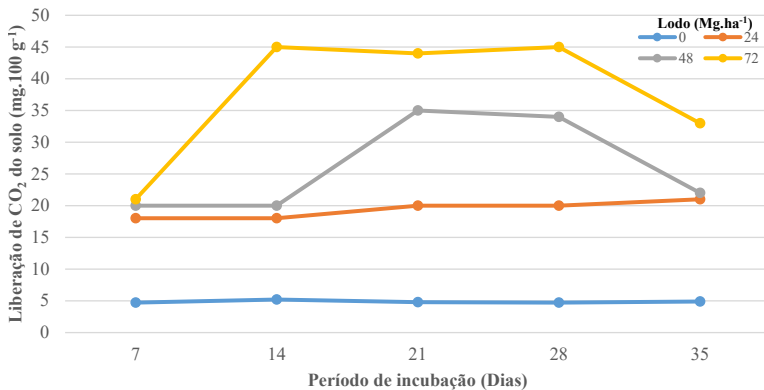


Figura 10. Liberação de CO_2 emitido pela biodegradação do lodo no solo durante 35 dias de incubação o respirômetro

A maior liberação de CO_2 observada nos solos com adição de lodo não se deve apenas à incorporação de matéria orgânica e nutrientes, mas também ao efeito da ação inoculante do lodo, que tem microrganismos adaptados ao meio e atuantes na mineralização da carga orgânica e compostos nitrogenados existentes no lodo (CASTILHOS et al., 2000).

Esses resultados indicam que a adição das doses de lodo estimulou a comunidade dos microrganismos do solo para decompor o carbono orgânico presente na composição do lodo. Por outro lado, a dose com 0 Mg ha^{-1} de lodo biológico apresentou uma emissão de CO_2 estável e abaixo dos valores observados nos solos com adição de doses crescentes de lodo. De acordo com Martines et al. (2006), essas diferenças entre as quantidades de CO_2 liberadas nos tratamentos que receberam doses de lodo e nos que não receberam (0 Mg ha^{-1}) indicam a contribuição positiva do lodo na atividade microbiana do solo.

As taxas de biodegradação do carbono orgânico proporcionadas pelas doses de lodo estão apresentadas na **Figura 11**. Verifica-se que a maior taxa foi observada no tratamento com a adição de 24 Mg ha^{-1} e, depois, as menores taxas foram determinadas nos tratamentos com 48 e 72 Mg ha^{-1} de lodo. Esses resultados demonstram que a eficiência na biodegradação do carbono orgânico reduz com a elevação das doses de lodo aplicadas no solo e, neste estudo, foi possível verificar que a maior eficiência de

biodegradação de carbono foi determinada no solo que recebeu a dose de 24 Mg ha⁻¹ (61,70%) e a menor, com a aplicação de 72 Mg ha⁻¹ (39,26%).

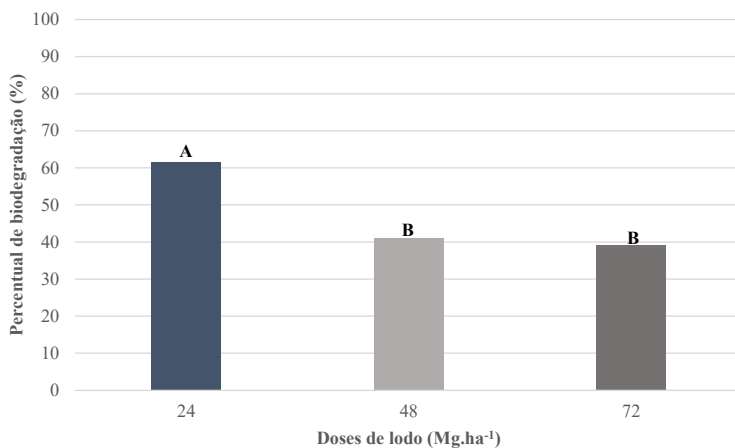


Figura 10. Taxa de biodegradação das doses de lodo incorporado no solo obtida após 35 dias de incubação (médias seguidas de letras maiúsculas diferentes diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%)

Ainda na **Figura 11**, constata-se que os valores das taxas de biodegradação de carbono nas doses de 24, 48, 72 Mg ha⁻¹ de lodo ficaram acima do limite de 30%, considerado como adequado para ser aplicado no solo, pois taxas acima de 30% indicam que o lodo contém quantidades adequadas de substâncias orgânicas de fácil degradação para os microrganismos do solo e, quando a taxa se apresenta abaixo de 30%, indica que o resíduo orgânico

contém carbono orgânico recalcitrante de difícil decomposição e, por isso, não será recomendado para ser utilizado como fertilizante orgânico (NBR 14.283, 1999).

3.2. Taxa de germinação do milho no campo

A determinação da taxa de germinação das sementes de milho e a umidade do solo foi realizada aos 20 dias após a semeadura do milho, e os resultados estão apresentados na **Tabela 3**. Observa-se que houve diferença significativa entre as parcelas com as doses de lodo (24 Mg ha⁻¹, 48 Mg ha⁻¹ e 72 Mg ha⁻¹), quando comparado com as parcelas com adubação mineral e sem lodo (0 Mg ha⁻¹).

As maiores taxas de germinação foram verificadas nas doses com 72, 48 e 24 Mg ha⁻¹ de lodo, e as menores foram determinadas nas parcelas com adubação mineral e 0 Mg ha⁻¹ de lodo. As maiores taxas de germinação das sementes de milho nas parcelas com doses de lodo ocorreram devido ao teor de umidade existente no lodo, pois, após a sua aplicação e incorporação no solo, a água presente no lodo foi transferida para o solo e isto favoreceu a germinação e o desenvolvimento inicial das plântulas de milho, ao passo que, nas parcelas com adubação mineral e 0 Mg ha⁻¹ de lodo, não houve este aporte adicional de água e, por isso, foram determinados os menores teores de umidade no solo e nas taxas de germinação das sementes de milho (**Tabela 3**). Além de manter adequada a umidade do solo para germinar as sementes, o lodo também proporcionou o aporte

de matéria orgânica, que, ao interagir com as frações minerais do solo, favoreceu a melhoria na agregação das partículas, o que leva à diminuição da densidade e ao aumento na macroporosidade. Isso possibilitou uma maior capacidade de retenção de água no solo das parcelas com aplicação de 72, 48 e 24 Mg.ha⁻¹ de lodo (BONINI et al., 2015).

Tabela 3. Valores médios da taxa de germinação das sementes de milho e da umidade do solo, 20 dias após a semeadura do milho

Tratamentos	Taxa de germinação	Umidade do solo
	----- (%) -----	
0 Mg ha ⁻¹ de lodo	68,10b*	12,42b
Adubação mineral	69,02b	12,37b
24 Mg ha ⁻¹ de lodo	90,40a	19,89a
48 Mg ha ⁻¹ de lodo	90,65a	20,32a
72 Mg.ha ⁻¹ de lodo	91,46a	20,56a

*Médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo Teste de Tukey.

3.3. Análise de macronutrientes e micronutrientes nas folhas de milho

Os resultados dos teores de macronutrientes e micronutrientes determinados nas folhas de milho coletadas nas parcelas com adubação mineral, sem aplicação do lodo e com a adição de 24, 48 e 72 Mg ha⁻¹ de lodo, estão apresentados na **Tabela 4**.

Observa-se que os teores de nitrogênio, potássio, cálcio, magnésio e cobre quantificados nos tratamentos com adubação mineral e doses de lodo apresentaram variação significativa, quando comparados com os teores determinados nas amostras de folhas coletadas na parcela com 0 Mg ha⁻¹ de lodo.

Tabela 4. Teores de macronutrientes e micronutrientes determinados em amostras de folhas coletadas nas parcelas com adubação mineral, sem lodo e com doses de lodo biológico

Tratamentos	N	P	K	Ca	Mg	S			
----- (g kg ⁻¹) -----						----- (mg kg ⁻¹) -----			
0 Mg ha ⁻¹ lodo	26,7b*	3,4a	19,1c	4,0b	2,1b	2,0a	7,2b	39,2a	22,7a
Ad. mineral	29,0a	3,2a	19,8bc	4,3ab	2,3ab	2,0a	8,0a	44,2a	21,7a
24 Mg ha ⁻¹ lodo	29,7ª	3,2a	19,6bc	4,1b	2,2b	2,1a	7,5b	40,0a	18,2a
48 Mg ha ⁻¹ lodo	30,5ª	3,1a	21,7a	4,1b	2,2b	2,1a	9,5a	47,2a	18,7a
72 Mg ha ⁻¹ lodo	30,7ª	3,3a	20,1b	4,5a	2,4ª	2,1a	9,2a	47,2a	19,7a

*Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5%.

Embora a aplicação da adubação mineral e a adição de 24 Mg ha⁻¹ tenham proporcionados quantidades de nitrogênio adequadas para a cultura do milho, e as doses de 48 e 72 Mg ha⁻¹ tenham duplicado e triplicado as quantidades de nitrogênio fornecida para a planta, observa-se, na **Tabela 4**, que as quantidades absorvidas pelo milho nesses tratamentos apresentaram pouca variação quando comparados com o teor de nitrogênio determinado na folha

de milho do tratamento com 0 Mg ha⁻¹ de lodo. Por outro lado, os valores verificados nas folhas de milho coletadas nos tratamentos com adubação mineral e as doses de lodo ficaram dentro da faixa de 27 a 35 g kg⁻¹, considerada como adequada para a cultura do milho, segundo Cantarella et al. (1996).

Essa tendência de baixa absorção de nitrogênio, quando adubado com doses de lodo de esgoto, também foi verificada nos estudos realizados por vários autores (ANJOS & MATTIAZZO, 2000; SILVA et al. 2002; GOMES et al., 2007; MACEDO et al., 2012). Segundo Gomes et al. (2007), esses resultados indicam a necessidades de avanços no entendimento dos processos envolvidos na mineralização do nitrogênio orgânico em solos adubados com diferentes tipos de lodo.

Em relação ao teor de potássio determinado nas folhas de milho, verifica-se, na **Tabela 4**, que, apesar de apresentar diferenças significativas entre os tratamentos e as quantidades de potássio absorvidos pelas folhas não aumentaram proporcionalmente com as doses de lodo incorporadas ao solo. Entretanto, os teores médios desse elemento nas folhas permaneceram, segundo Cantarella et al (1996), variando dentro da faixa considerada como adequada (17 a 35 g kg⁻¹) para a cultura do milho em todos os tratamentos.

A pequena variação nos teores de potássio obser-

vado nas folhas coletadas nas áreas, com a incorporação de 24, 48 e 72 Mg ha⁻¹, era esperado porque o lodo geralmente apresenta, em sua composição, baixa concentração de potássio (BARBOSA, et al., 2007; DELARICA, et al., 2015; GONÇALVES et al., 2019).

Os teores de cálcio e magnésio nas folhas de milho apresentaram um aumento significativo na área com aplicação de 72 Mg ha⁻¹, porém não foi tão acentuado quanto ao verificado na área sem a adição de lodo. Talvez essa pouca variação nos teores de cálcio e magnésio nas folhas de milho entre os tratamentos possam estar associados ao aporte desses nutrientes proporcionado pela aplicação do calcário dolomítico utilizado para corrigir a acidez do solo na área experimental. Os valores de cálcio e magnésio estão variando dentro da faixa adequada para atender as necessidades da cultura do milho (CANTARELLA et al., 1996).

O teor de cobre apresentou um incremento significativo no tecido das folhas de milho coletadas nas parcelas com doses de 48 a 72 Mg ha⁻¹ e adubação mineral, quando comparado com a dose de 24 Mg ha⁻¹ e o tratamento sem aplicação de lodo. Também se nota que os teores, apesar de apresentarem diferenças significativas, não foram proporcionais às quantidades de lodo aplicadas no solo, e os teores de cobre nas folhas de milho variaram dentro dos limites de 6 mg kg⁻¹ a 20 mg kg⁻¹, considerados como adequados para a cultura do milho (MALAVOLTA et al., 1989).

Quanto aos teores de nitrogênio, potássio, cálcio, magnésio e cobre, foi possível observar, nos tratamentos com lodo, que nos teores desses nutrientes, apesar de apresentarem diferenças significativas, os valores não aumentaram proporcionalmente com as doses de lodo incorporada ao solo. Esses resultados corroboram com os obtidos por Borges et al. (2003); Gomes et al. (2007); Macedo et al. (2012); Delarica, et al. (2015) e Gonçalves et al. (2019), quando avaliaram a eficiência de doses de lodo de esgoto na produção de milho.

A adição de doses de lodo elevou a disponibilidade de fósforo no solo, porém as quantidades desse nutriente na folha de milho não apresentaram variação significativa, quando comparadas com o teor determinado na folha coletada da área sem aplicação de lodo (**Tabela 4**).

Os resultados do fósforo ficaram dentro da faixa considerada (2,0 a 4,0 g kg⁻¹) como adequada para a nutrição do milho (CANTARELLA et al., 1996). Porém, mesmo com o aumento da disponibilidade do nutriente no solo, não foi caracterizado consumo de luxo pelas plantas de milho, provavelmente em função da acidez do solo, pois Prado (2008) relata que o pH ótimo do solo para absorção de fósforo está em torno de 6,5 e, no presente estudo, o pH do solo das áreas com 24, 48 e 72 Mg ha⁻¹ de lodo variaram entre 5,2, 5,0 e 4,3, respectivamente (**Tabela 5**).

3.4. Composição química do solo

Na **Tabela 5**, estão apresentados os resultados da composição química do solo sem adição do lodo (0 Mg ha⁻¹) e com aplicações de adubação mineral e doses de lodo nas quantidades de 24, 48 e 72 Mg ha⁻¹ (base seca). Deve-se ressaltar que foi aplicado e incorporado calcário dolomítico no solo de todos os tratamentos, por isso os valores do pH e saturação por bases (V%) estão mais elevados e a acidez potencial (H⁺ + Al⁺³) está menor no solo com 0 Mg ha⁻¹ de lodo.

Tabela 5 . Características químicas de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico, 120 dias após a fertilização com adubação mineral e doses de lodo de esgoto

Tratamentos	pH	MO	P	K	Ca	Mg	H + Al ⁺³	SB	CTC	V
	(CaCl ₂)	(g.dm ⁻³)	(mg.dm ⁻³)	------(mmol _c .dm ⁻³)-----				(%)		
0 Mg.ha ⁻¹	5,6 ^a	14,2a	25,7c	3,7a	29,7a	14,5a	20,5b	47,8a	68,0a	70,2a
Ad. Mineral	5,4ab	13,5a	26,7b	3,5a	28,2b	13,7a	23,2b	45,7a	68,9a	65,5ab
24 Mg.ha ⁻¹	5,2abc	13,5a	42,0bc	3,3a	20,7bc	10,5a	29,0ab	34,57b	63,5a	54,5a
48 Mg.ha ⁻¹	5,0bc	12,7a	55,0b	3,1a	17,7c	9,2a	29,7ab	31,4b	61,1a	51,2b
72 Mg.ha ⁻¹	4,9c	12,5a	94,0a	2,8a	17,7c	10,7a	34,0a	38,8b	72,a	51,7b
CV	4,35	8,76	15,08	13,66	15,49	20,39	15,79	19,29	12,73	11,08

*Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5%.

Verifica-se que a adição de doses de lodo apresentou diferenças significativas nos valores de pH, fósforo, acidez potencial ($H^+ + Al^{+3}$) e saturação por bases (V), quando comparados com os valores determinados no solo das parcelas sem aplicação de lodo e com adubação mineral.

Comparando os resultados da **Tabela 5** com os limites estipulados pelo Boletim Técnico nº 100 do Instituto Agronômico de Campinas (IAC), é possível constatar que os valores do pH do solo das parcelas que receberam as doses de lodo estão variando dentro da faixa classificada como de média acidez, os teores de fósforo para culturas anuais estão na faixa de alto a muito alto e os valores da saturação por bases estão oscilando dentro da faixa classificada como média (RAIJ et al., 1996).

Já os teores de potássio, cálcio e magnésio determinados nos solos com aplicação das doses de lodo não apresentaram diferenças significativas em relação aos tratamentos sem lodo e com adubação mineral, talvez porque esses nutrientes são encontrados em baixas concentrações na composição química do lodo (ANDREOLI et al., 2014; NOBILE, et al., 2014; GONÇALVES et al., 2019).

Na **Figura 11**, verifica-se uma tendência de redução do pH à medida que a aplicação ultrapassa a dose 24 Mg ha⁻¹ de lodo. Resultados similares também foram verificados por Logan et al., (1997) após a aplicação de 7,5 e 15 Mg ha⁻¹ de lodo Simonete et al. (2003), com doses de lodo entre 10 e 50 Mg ha⁻¹, Boeira & Souza (2007), com

aplicação acumulada de 17 Mg ha⁻¹ de lodo de esgoto, e por Trannim et al. (2008), com 12 Mg ha⁻¹. Esses autores atribuem que a acidificação do solo pode estar associada ao processo de mineralização do nitrogênio amoniacal existente na composição do lodo e que, após entrar em contato com os microrganismos nitrificadores, eles transformam o NH₄⁺ em NO₃⁻ e liberam o hidrogênio para a solução do solo.

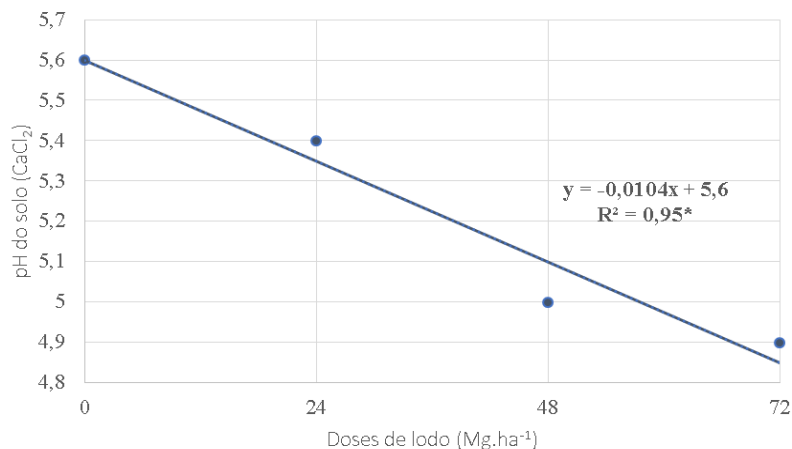


Figura 11. Variação do pH do solo das parcelas com a aplicação de diferentes doses de lodo

Além da mineralização do nitrogênio amoniacal ocorrem também as reações de oxidação da fração orgânica que promovem a dissociação de prótons ligados aos grupos funcionais COOH e OH da matéria orgânica e aos compostos, contendo sulfetos que resultam na liberação de CO₂, ácidos orgânicos

e hidrogênio no solo (BOEIRA & SOUZA, 2007; BOEIRA & MAXIMILIANO, 2009).

O íon hidrogênio liberado pela decomposição do lodo de malteria pode ter solubilizados os óxidos de alumínio e, com isso, elevado os teores de $H^+ + Al^{+3}$ e reduzido os teores de cálcio e magnésio no solo (**Tabela 5**) e, conseqüentemente, reduzido os valores da saturação por bases, pois o $H^+ + Al^{+3}$ promovem a neutralização dos cátions Ca^{+2} , Mg^+ e K^+ , nas cargas negativas dos coloides no solo (BONINI, et al., 2015).

A diminuição do pH do solo corrobora com os dados obtidos com a saturação por bases (V%) que foram menores nos tratamentos com doses de lodo e adubação mineral, explicado pela substituição das bases trocáveis (Ca^{+2} , Mg^+ e K^+) pelos íons H^+ e Al^{+3} nos sítios de troca do solo (RONQUIM, 2010).

Ao analisar na **Figura 12**, os valores de fósforo nos solos com aplicação das doses de lodo, percebe-se que os teores de fósforo disponível para as plantas de milho foram considerados muito alto (94 mg dm^{-3}) para 72 Mg ha^{-1} de lodo, alto (55 mg dm^{-3}) para 48 Mg ha^{-1} de lodo, alto (42 mg dm^{-3}) para 24 Mg ha^{-1} de lodo e médio ($25,7 \text{ mg dm}^{-3}$) para 0 Mg ha^{-1} de lodo (RAIJ et al., 1996).

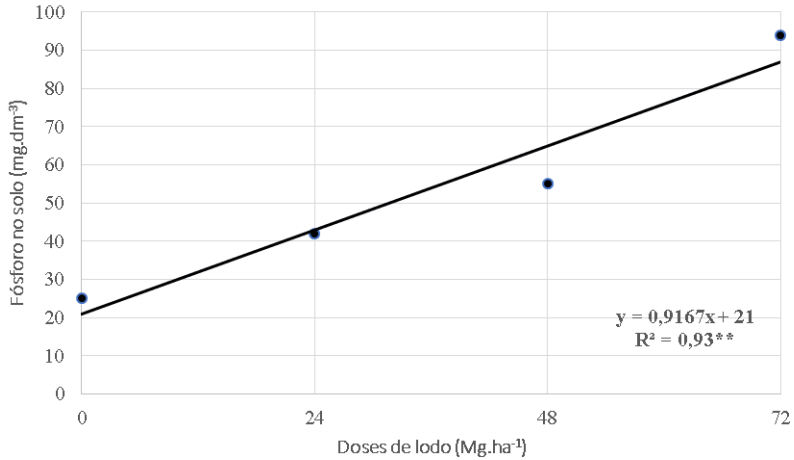


Figura 12. Teores de fósforo nas amostras de solo das áreas com adição de doses de lodo

A este respeito, vários autores têm evidenciado aumentos substanciais nos teores de fósforo no solo. Quando utilizaram doses de lodo de esgoto entre 30 e 60 $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ como fonte de nutrientes para as culturas agrícolas (CARVALHO et al., 2013; BONINI, 2015; KNOPIK, et al., 2018), Alves & Souza (2008) verificaram que esse aumento significativo do fósforo no solo decorrente da aplicação de doses de lodo de esgoto estava relacionando às quantidades de fósforo adicionadas pela massa de lodo aplicada no solo. Entretanto, neste estudo, a quantidade de fósforo adicionada pelas doses de 24, 48 e 72 $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ não foi suficiente para ocasionar um aumento considerável no solo. Provavelmente, os elevados teores de fósforo ocasio-

nados pelas doses de lodo de malteria estão associados à liberação dos ácidos orgânicos que ocorrem durante a decomposição do lodo no solo e aos íons H^+ decorrentes da mineralização do nitrogênio amoniacal. Esses ácidos orgânicos e o H^+ promovem a dissolução de fosfatos insolúveis em água pela ação de ácidos carbônicos e pela redução da energia de ligação do fósforo fixado pelo adsorvido no solo, resultando na formação de complexos fósforo-húmico e fosfatos orgânicos que elevam a disponibilidade de fósforo no solo (COSTA et al., 2014; LOBO et al., 2013).

3.5. Rendimento da produção do milho

Os resultados da produção de grãos de milho estimados em $kg\ ha^{-1}$ estão apresentados na **Figura 13**, em que se observa que a produção de grãos variou significativamente com a adubação mineral (ADM) e as doses de lodo de malteria (24, 48 e $72\ Mg\ ha^{-1}$) aplicadas no solo, quando comparadas com as parcelas sem fertilização com o lodo de ($0\ Mg\ ha^{-1}$). Os menores valores de produção de grãos foram verificados no solo com $0\ Mg\ ha^{-1}$ de lodo de malteria e os valores mais elevados nos tratamentos com adubação mineral e nas doses de lodo. As produções de grãos obtidas com as doses de 24, 48 e $72\ Mg\ ha^{-1}$ de lodo foram superiores ao valor observado na parcela com a adubação mineral recomendada para a cultura do milho.

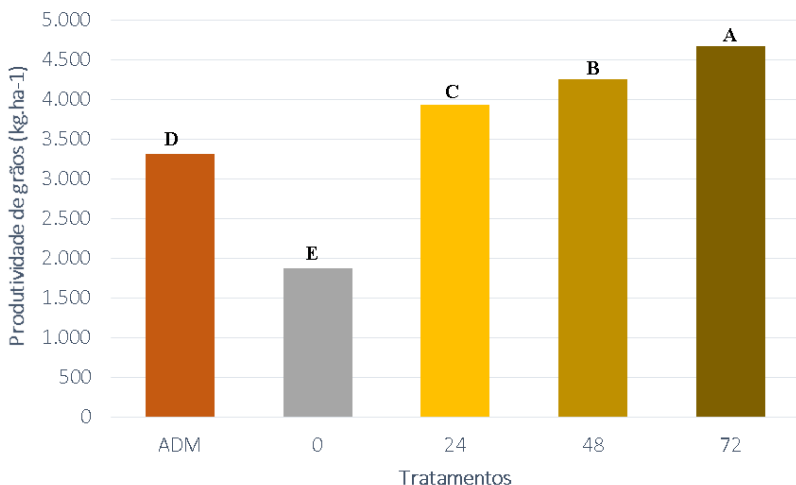


Figura 13. Produção de grãos de milho determinada nas parcelas com adubação mineral (ADM), sem lodo (0 Mg ha⁻¹) e com lodo nas doses com 24, 48 e 72 Mg ha⁻¹ (Médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5%)

Os menores valores de produção foram verificados no solo com 0 Mg ha⁻¹ de lodo e os valores mais elevados nos tratamentos com adubação mineral e nas doses de lodo biológico.

As produções de grãos obtidas com as doses de 24, 48 e 72 Mg ha⁻¹ de lodo foram superiores ao valor observado na parcela com a adubação mineral recomendada para a cultura do milho.

Comparando-se o valor da produtividade de grãos

obtido pela adubação mineral com os tratamentos de 24, 48 e 72 Mg ha⁻¹ de lodo de malteria, verifica-se um aumento de 18,67%, 28,00% e 40,66%, respectivamente, na produção de grãos de milho.

Os resultados referentes à produção sugerem que a aplicação de doses acima de 24 Mg ha⁻¹ de lodo foram eficientes para substituir a adubação mineral recomendada para atender a necessidade da cultura do milho.

Essa tendência na produção de grãos de milho, observada com o lodo de malteria, estão de acordo com os resultados de vários autores em trabalhos com lodo de esgoto, na qual verificaram uma maior produtividade de grãos com doses entre 15 e 30 Mg ha⁻¹ de lodo em base seca (GOMES et al., 2007; QUINTANA et al., 2009; BREMM et al., 2012; GONÇALVES et al., 2019).

A curva representativa de rendimento de grãos (**Figura 14**), considerando as doses aplicadas de lodo, pode ser representada pela regressão polinomial de segunda ordem, expressa pela equação $y = -0,7109x^2 + 87,329x + 1974,9$ ($R^2 = 0,96^*$).

Nota-se, pelo delineamento experimental, que todos os tratamentos que utilizaram lodo demonstraram uma maior produção de grãos, quando comparados com a testemunha sem adição de lodo (0 Mg ha⁻¹).

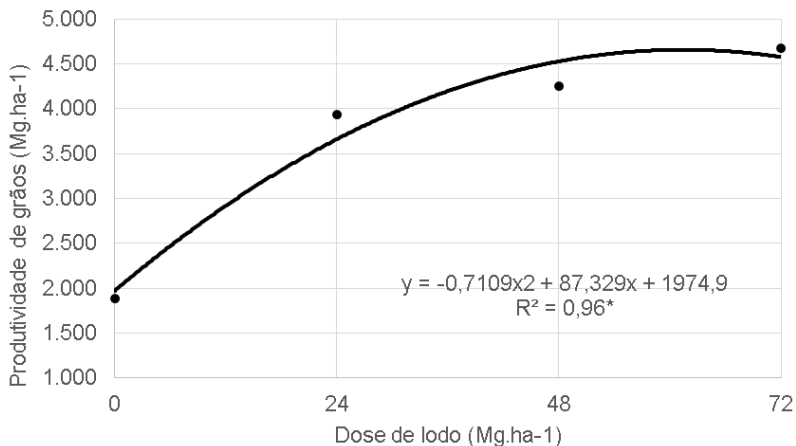


Figura 14. Produtividade de grãos de milho cultivados com doses de lodo aplicadas e incorporadas em um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico

Esses resultados indicam que a dose de lodo biológico entre 24 Mg ha⁻¹ e 48 Mg ha⁻¹ podem manter a produtividade do milho em níveis satisfatórios e acima do rendimento de grãos obtidos com a adubação mineral (**Figura 14**).

Ainda na **Figura 14**, observa-se que a produtividade de grãos proporcionada pela aplicação de 24 Mg ha⁻¹ de lodo biológico foi de 3.940 kg.ha⁻¹ e, com 48 Mg ha⁻¹, foi de 4.250 kg ha⁻¹. Esses valores estão muito próximos da média nacional, que, segundo Souza et al. (2018), é de 4.178 kg ha⁻¹. A boa produtividade do milho obtida neste estudo se deve, provavelmente, ao aporte de nutrientes proporcio-

nados pelas doses de lodo aplicadas no solo, pois a adição de 24, 48 e 72 Mg ha⁻¹ forneceu cerca de 200, 400 e 600 kg ha⁻¹ de nitrogênio, respectivamente.

Percebe-se, na **Figura 14**, que, a partir da dose de 48 Mg ha⁻¹, de lodo, ocorre uma certa estabilização e uma leve tendência de declínio na curva de produtividade de grãos até a dose com 72 Mg ha⁻¹. Geralmente, esta estabilização é seguida por um decréscimo na produtividade, à medida que se elevam as doses de lodo. Isto é ocasionado pelo acúmulo excessivo de nutrientes que passam a causar toxicidade à planta, reduzindo, assim, a sua produtividade (GOMES et al., 2007). Porém, esse fenômeno não ocorreu no presente estudo, porque os teores de nitrogênio, fósforo e potássio determinados nas folhas de milho ficaram dentro ou abaixo das faixas consideradas como adequadas para a nutrição do milho (CANTARELLA et al., 1996).

Os estudos relacionando curvas de respostas da produtividade de milho com doses de lodo de esgoto para obter uma produtividade de grãos de milho acima de 4.000 kg ha⁻¹ tem demonstrado que as doses de lodo variam de 15 a 54 Mg ha⁻¹. Nota-se que as doses de 24 e 48 Mg ha⁻¹ observadas no presente estudo estão dentro da variação das doses de lodo observadas por outros autores (SILVA et al., 2002; BARBOSA et al., 2007; QUITANA et al., 2009).

A diferença entre as doses de lodo e as produtividades esperadas de grãos de milho se deve principalmente em razão da diferença existente entre a composi-

ção química do lodo, o potencial genético da variedade e a fertilidade do solo, pois esses fatores contribuem para acentuar a diferença entre os resultados de ensaios para obtenção das curvas de resposta, uma vez que esses fatores determinam o modelo da curva e, conseqüentemente, a dose agrônômica e a produtividade esperada. Esses fatos ressaltam e indicam a necessidade de ensaios regionais para a definição de critérios para aplicação de lodo de esgoto em solos agrícolas (SILVA et al., 2002; GOMES et al., 2007; BARBOSA et al., 2007; QUITANA et al., 2009; BREMM et al.; 2012).

4. CONCLUSÃO

Tendo como base os resultados e as condições em que os estudos foram realizados, pode-se concluir que:

- Os teores de metais pesados e *Salmonella* sp na composição do lodo biológico estão de acordo com os limites considerados como adequados pela Norma Técnica CETESB P. 4230/2021;
- O lodo biológico apresenta um teor de carbono orgânico adequado para suprir as necessidades da comunidade microbiana do solo;
- A carga orgânica fornecida pelas três doses de lodo apresentou uma taxa de biodegradação adequada para ser utilizada em solos de áreas para o cultivo agrícola;
- As doses de lodo aplicadas no solo favoreceram a germinação das sementes de milho no campo;
- Os teores de macronutrientes e micronutrientes no tecido das folhas de milho não apresentaram aumentos proporcionais as doses de lodo aplicadas no solo;
- A redução do pH do solo proporcionada pela nitrificação do nitrogênio amoniacal presente no lodo não influenciou de forma negativa no desenvolvimento da cultura do milho;
- As doses de lodo elevaram os teores de fósforo no solo;
- As doses de lodo aplicadas ao solo favoreceram significativamente a produtividade de grãos de milho;
- A menor dose de lodo (24 Mg.ha⁻¹) apresentou uma pro-

dução de grãos de milho superior à obtida com a adubação mineral recomendada para a cultura do milho;

- As produtividades de grãos de milho verificadas com a aplicação de doses de lodo ficaram dentro dos valores da média nacional para a produção de milho;

- A produtividade do milho e o teor de fósforo no solo foram influenciados pelas doses de lodo, sendo a dose ótima recomendada de $24 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$;

- O lodo biológico poderá ser utilizado com segurança nos solos de áreas agrícolas, pois apresentou qualidades agrônômicas favoráveis ao solo e ao cultivo do milho, pois poderá substituir ou complementar a adubação mineral recomendada para as culturas agrícolas.

5. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABREU-UÚNIOR, C.H., BROSSI, M.J.L., MONTEIRO, R.T., CARDOSO, P.H.S., MANDU, T.S., NOGUEIRA, T.A.R., GANGA, A., FILZMOSE, P., OLIVEIRA, F.C., FIRME, L.P., He, Z., CAPRA, G.F. Effects of sewage sludge application on unfertile tropical soils evaluated by multiple approaches: A field experiment in a commercial Eucalyptus plantation. **Science of The Total Environment**, v. 655, p.1457-1467, 2019.

ALVES, M.C.; SOUZA, Z.M. Recuperação de área degradada por construção de hidroelétrica com adubação verde e corretivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.2505-2516, 2008

ANDREOLI, C. V; VON SPERLING, M; FERNANDES, F. **Lodo de esgoto: tratamento e disposição final**. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. 444 p.

ANJOS, A.R.M. dos MATTIAZZO, M.E. Elementos-traço em plantas de milho cultivadas em LATOSSOLOS repetidamente tratados com biossólido. **Scientia Agricola**, v. 57, p. 769-776, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1999). ABNT/NBR 14.283. Resíduos em solos – Determinação da biodegradação pelo método respirométrico. Rio de Janeiro, RJ, 08p.

BAIOUI, R., GHNAYA, T., WALI, M., ZAHER, H., GHABRICHE, R., MNASHI, M., LUTTS, S., ZONIG, W., ABDELLELY, C. Agricultural valorization of domestic sewage sludge: Impact on growth, photosynthesis, nutrition and toxic metal accumulation in *Medicago sativa*. **Agrochimica**, v.61, n.1, p.56-74, 2017.

BARBOSA, G.M.C.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O.R.; Inês Cristina Batista FONSECA, I.C.B. Efeito residual do lodo de esgoto na produtividade do milho safrinha. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.601-605, 2007.

BITTENCOURT, S., AISSE, M.M., SERRAT, B.M. Gestão do uso agrícola do lodo de esgoto: estudo de caso do estado do Paraná, Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.22, n.6, p.1129-1139, 2017.

BOERIA, R.C.; SOUZA, M.D. Estoques de carbono orgânico e de nitrogênio, pH e densidade de um latossolo após três aplicações de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 581-590, 2007.

BOEIRA, R.C.; MAXIMILIANO, V.C.B. Mineralização de compostos nitrogenados de lodos de esgoto na quinta aplicação em Latossolo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.711-722, 2009.

BONINI, C. S. B.; ALVES, M. C.; MONTANARI, R. Lodo de esgoto e adubação mineral na recuperação de atributos químicos de solo degradado. **Revista Brasileira de Engenharia**

Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 19, n. 4, p. 388-393, 2015.

BORGES, M.R.; COUTINHO, E. L. M. Metais Pesados no solo após aplicação de Biossólido. II Disponibilidade. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**. v.28, p. 557-568, 2004.

BREMM, R.R.R.; DAMASCENO, S.G.; SECCO, D.; VILAS BOAS, M.A.; Douglas TORRES, D.G.B.; MEES, J.B.R.; KUMMER, L. Potencial de uso de lodo de esgoto na cultura do milho em latossolo argiloso no oeste do Paraná. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n. 23, 2012.

CANTARELLA, H.; RAIJ, B. van & CAMARGO, C.E.O. 13 cereais. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.O. & FURLANI, A.M.C., eds. Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo. Campinas: Instituto Agrônomo & Fundação, 1996. p.43-71. (Boletim técnico, 100).

CARVALHO, C.S.; RIBEIRINHO, V.S.; ANDRADE, C.A.; De MARIA, I.C. Disponibilidade de fósforo em solos tratados sucessivamente com lodos de esgoto. In: XXXIV-Congresso Brasileiro de Ciência do Solo: 28 de junho a 2 de agosto de 2013, Costão do Santinho Resort, Florianópolis, SC. 4p. 2013.

CASTILHOS, D.D.; VIDOR, C.; CASTILHOS, R.M.V. Atividade microbiana em solo suprido com lodo de curtume e cromo hexavalente. **Revista Brasileira de Agrociência**, v.6, p.71-76, 2000.

CERÓN, A.R.M., GONZÁLEZ, A.R., GUZMÁN, J.M.G. (2017). Manejo de biosólidos y su posible aplicación al suelo, caso Colombia y Uruguay. **Revista de Investigación Agraria y Ambiental**, v.8, n.1, p.217-226, 2017.

CETESB-COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. Aplicação de lodo de sistemas de tratamento biológico de efluentes líquidos sanitários em solo - diretrizes e critérios para projeto e operação (Manual Técnico) P.4230/2021, 50p.

COSTA, V.L., MARIA, I.C., CAMARGO, O.A., GREGO, C.R., MELO, L.C.A. Distribuição espacial de fósforo em Latossolo tratado com lodo de esgoto e adubação mineral. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.30, p.287–293, 2014.

DELARICA, D.L.D.; DONHA, R.M.A.; LAVEZZO, L.F.; MELO, W.J.; MELO, G.P. Lodo de esgoto como fertilizante para a cultura do milho em dois tipos de solo. In: XXXV-Congresso Brasileiro de Ciência do Solo: 2 a 7 de agosto de 2015, Centro de Convenções, Natal, RN. p. 5 2015.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (2006). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. (2ª ed). Embrapa Solos.

FISCH, G. Caracterização climática e balanço hídrico em Taubaté (SP). **Revista Biociências**, v.1, n.1, p.81-90, 1995.

GOMES, S.B.V.; NASCIMENTO, C.W.A.; BIONDI, C.M. Produtividade e composição mineral de plantas de milho em solo adubado com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v.11, n.5, p.459–465, 2007.

GONÇALVES, A.A.; MOREIRA, C.R.; SOUZA, G.B.P.; PERES, D.M.; CANZI, G.M. Adubação com lodo de esgoto na cultura do milho. **Revista Técnico-Científica do CREA-PR** - Ed. Especial – p. 1-13, 2019.

IPPOLITO, J.A.; DUCEY, T.F.; DIAZ, K.; BARBARICIK, K.A. Long-term biosolids land application influences soil health, **Science of The Total Environment**, v.791, p.148344-148378, 2021.

KNOPIK, M.A., RUFINE, R., BITTENCOURT, S., GASPAROTTO, F. Aporte de nutrientes em solos tratados com lodo de esgoto: estudo de caso da região de Campo Mourão, Noroeste do Paraná. **Revista Brasileira de Planejamento e Desenvolvimento**, 7(3), 379-389, 2018.

KRAHEMBUHL, C.B.B.P. Emissão de gases de efeito estufa na disposição final de lodo de esgoto. 2021. 65 f. Dissertação (Mestrado)–Instituto Agronômico de Campinas, Campinas.

LOBO, T.F. GRASSI FILHO, H.; BÜLL, L.T. MOREIRA, L.L.Q. Manejo do lodo de esgoto e nitrogênio mineral na fertilidade do solo ao longo do tempo. **Semina: Ciências Agrárias**. v. 34, n.6, p.2705-2726, 2013.

LOGAN, T.J.; LINDSAY, B.J.; GOINS, L.E.; RYAN, L.A. Field assessment of sludge metal bioavailability to crops: sludges rate response. **Journal of Environmental Quality**. Madison, v.26, p.534-550, 1997.

MACEDO, F.G.D.; MELO, W.J.D.; MERLINO, L.C.S.; TORRES, L.S.; GUEDES, A.C.T.P.; MELO, G.M.P.D.; CAMACHO, M.A. Lodo de esgoto como fonte de nitrogênio: concentração no perfil do solo e em plantas de milho. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.17, n.3, p.263-268, 2012.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Piracicaba: Potafós, 1989. 201 p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. de. Avaliação do estado nutricional das plantas: Princípios e aplicações. Piracicaba: Potafós, 1997. p.115-230.

MARTINES, A.M.; ANDRADE, C.A.; CARDOSO, E.J.B.N. Mineralização do carbono orgânico em solos tratados com lodo de curtume. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.7, p.1149-1155, 2006.

MIRANADA, R.B. (2013). Proposta de uso benéfico do resíduo do tratamento de efluentes de uma cervejaria de Lages/SC. 89p. [Trabalho de conclusão de curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná-UTFP].

MUZZOLON, E.; MELATI, J.; LUCHETTA, L.; BRAVO, C.E.C.; TONIAL, I.B. (2021). Processamento da cevada para produção de malte: parâmetros de qualidade. In: Verruck, S. Avanços em Ciência e Tecnologia de Alimentos. (p.205-225). Editora Científica.

NOBILE, F.D.; NUNES, H.D.; NEVES, J.C. Doses de lodo de esgoto sobre o desenvolvimento da grama Bermudas (*Cynodon **dactylon***). *Nucleus*, **v.11, n.2, p.271-281, 2014.**

QUINTANA, N.R.G., CARMO, M. S. do, MELO, W.J.de. Viabilidade econômica do uso de lodo de esgoto na agricultura, Estado de São Paulo. **Revista Informações Econômicas**, São Paulo, v.39, n.6, p.31-36, jun. 2009.

PIRES, A.M.M.; ANDRADE, C.A. Recomendação de dose de lodo de esgoto: a questão do nitrogênio. Comunicado técnico nº 52. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA)-Jaguariúna-SP. 8p. 2014.

PRADO, R. M. Nutrição de Plantas. 1.ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008. v.1. 300 p.

RAIJ, B. VAN; QUAGGIO, J.A.; CANATRELLA, H.; FERREIRA, M.E.; LOPES, A.S; BATAGLIA, O.C. Análise Química do Solo para Fins de Fertilidade. Campinas, Fundação Cargill, 170p. 1987.

RAIJ, B. Van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. (Ed.). Recomendações de adubação e calagem para o

estado de São Paulo. 2.ed. Campinas: Instituto Agronômico, 1996. (IAC. Boletim Técnico, 100).

RODELLA, A. A.; SABOYA, L. V. Calibration for conductometric determination of carbon dioxide. **Soil Biology and Biochemistry**, v.31, p.2059-2060, 1999.

RONQUIM, C.C. Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento por Satélite. EMBRAPA-Campinas, SP. 26p. 2010.

SILVA, J.E.; RESCK, D.V.S.; SHARMA, R.D. Alternativa agronômica para o biossólido produzido no Distrito Federal: I. Efeito na produção de milho e na adição de metais pesados em latossolo no Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.487-495, 2002.

SIMONETE, M.A.; KIEHL, J.C.; ANDRADE, C.A.; TEIXEIRA, C.F.A. Efeito do LE em um argissolo e no crescimento e nutrição de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n.10, p.1187-1195, 2003.

SOUZA, A.; REIS, J.; RAYMUNDO, J.; PINTO, R. Estudo da produção do milho no Brasil. **South American Development Society Journal**, v.4, n.11, p.182-194, 2018.

STEHOUWER, R. C.; WOLF, A.M.; DOTTY, W. Chemical monitoring of sewage sludge in Pennsylvania, variability and

application uncertainly. **Journal Environmental Quality**. v.29, p.1686-1695, 2000.

TRANNIN, I.C.B., SIQUEIRA, J.O., MOREIRA, F.M.S. (2008). Atributos químicos e físicos de um solo tratado com biossólido industrial e cultivado com milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, p.223-230, 2008. ____

YADA, M.M., MELO, W.J.; MELO, V.P. Elementos-traço no solo, na planta e no grão de plantas de milho cultivadas em latossolos tratados com lodo de esgoto por 16 anos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.25, n.2, p.371-379, 2020.



1974 - 2024



UNITAU

Universidade de Taubaté

2 FOME ZERO
E AGRICULTURA
SUSTENTÁVEL



12 CONSUMO E
PRODUÇÃO
RESPONSÁVEIS



13 AÇÃO CONTRA A
MUDANÇA GLOBAL
DO CLIMA



ISBN: 978-65-86914-95-5

CBL



9 786586 914955