

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

RAFAEL DOS SANTOS SILVA

**USO DO COMPOSTO DE LODO DE ESGOTO EM VIVEIRO DE MUDAS DE
CANA-DE-AÇÚCAR: ALTERAÇÕES QUÍMICAS DO SOLO, NUTRIÇÃO E
PRODUTIVIDADE DA CULTURA**

Ilha Solteira
2021

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

RAFAEL DOS SANTOS SILVA

**USO DO COMPOSTO DE LODO DE ESGOTO EM VIVEIRO DE
MUDAS DE CANA-DE-AÇÚCAR: ALTERAÇÕES QUÍMICAS DO
SOLO, NUTRIÇÃO E PRODUTIVIDADE DA CULTURA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Unesp como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agronomia. Especialidade Sistemas de Produção.

Dr. Thiago Assis Rodrigues Nogueira
Orientador

Dra. Raffaella Rossetto
Coorientadora

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S586u Silva, Rafael dos Santos.
 Uso do composto de lodo de esgoto em viveiro de mudas de cana-de-açúcar: alterações químicas do solo, nutrição e produtividade da cultura / Rafael dos Santos Silva. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2021
 72 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Especialidade: Sistemas de Produção, 2021

Orientador: Thiago Assis Rodrigues Nogueira
Coorientadora: Raffaella Rossetto
Inclui bibliografia

1. Fertilizante orgânico. 2. Qualidade do solo. 3. Resíduos urbanos. 4. Saccharum spp. 5. Sustentabilidade ambiental.


Raiane da Silva Santos

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

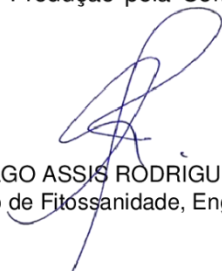
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: USO DO COMPOSTO DE LODO DE ESGOTO EM VIVEIRO DE MUDAS DE CANA-DE-AÇÚCAR: ALTERAÇÕES QUÍMICAS DO SOLO, NUTRIÇÃO E PRODUTIVIDADE DA CULTURA

AUTOR: RAFAEL DOS SANTOS SILVA

ORIENTADOR: THIAGO ASSIS RODRIGUES NOGUEIRA

COORIENTADORA: RAFFAELLA ROSSETTO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA, área: Sistemas de Produção pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. THIAGO ASSIS RODRIGUES NOGUEIRA (Participação Virtual)
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP



Prof. Dr. MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA FILHO (Participação Virtual)
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP



Dr. ADÔNIS MOREIRA (Participação Virtual)
Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Soja

Ilha Solteira, 31 de agosto de 2021

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe, Maria dos Santos Sousa (*in memoriam*), que sempre me apoiou e foi meu grande exemplo de determinação, perseverança e não media esforços para me proporcionar a melhor educação. Sua lembrança me inspira e me faz persistir.

À minha querida família, minha esposa Estela e meu filho Mateus, presentes de Deus para minha vida, fonte de inspiração e força, dedico o resultado do esforço aplicado ao longo deste percurso.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me agraciar com a vida, entendimento, sabedoria e por sempre me acompanhar.

À usina Vale do Paraná S/A - Álcool e Açúcar, pela confiança e permissão de realizar os estudos.

À Universidade Estadual Paulista, Campus de Ilha Solteira, pela oportunidade concedida por meio do curso de Pós-graduação, contribuindo para minha formação científica e profissional.

Ao meu estimado orientador Prof. Dr. Thiago Assis Rodrigues Nogueira, pela confiança, paciência e conselhos que foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho. Um profissional de excelência.

A minha coorientadora, Raffaella Rossetto, por sua dedicação e sabedoria em suas orientações.

Ao Dr. Fernando Carvalho Oliveira, da Biossolo Agricultura e ambiente Ltda e Tera Ambiental, pela parceria no desenvolvimento da pesquisa.

Aos meus líderes na usina Vale do Paraná, Alberto José Otoya Dussan (Diretor Geral), Vicente Estuardo Esquit Donis (Gerente Agrícola) e Casimiro Daniel Flores Duarte (Chefe de produção), a quem eu tenho grande estima e respeito.

Aos professores Dr. Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira Filho, Dr. Cássio Hamilton Abreu-Junior e Dr. Adônis Moreira, por todo apoio científico, técnico e correções para o desenvolvimento dessa pesquisa.

Aos departamentos: Agronômico, Preparo e Plantio, Colheita e Agricultura de Precisão, que não mediram esforços para dar apoio necessário na instalação e condução do experimento de campo.

Aos colegas do Grupo de Estudo em Nutrição, Adubação e Fertilidade do Solo (GENAFERT), pela disposição em colaborar, pelo trabalho em equipe e por unir força em prol do grupo.

Externo também minha gratidão a todos os meus familiares pelo apoio e força durante essa conquista.

“Mas os que esperam no SENHOR renovarão as suas forças e subirão com asas como águias; correrão e não se cansarão; caminharão, e não se fatigarão.”

Isaías 40:31

RESUMO

O composto de lodo de esgoto (CLE) possui elevadas quantidades de matéria orgânica e nutrientes de plantas podendo ser utilizado para melhorar a fertilidade do solo e aumentar a produtividade da cana-de-açúcar. Todavia, ainda são inexistentes estudos evidenciando os benefícios da aplicação desse fertilizante orgânico em áreas de viveiro de cana. Objetivou-se, com esse estudo, avaliar a fertilidade do solo, o desenvolvimento das plantas, o estado nutricional, a produtividade e a qualidade tecnológica das mudas de cana-de-açúcar cultivadas em viveiro após a aplicação do CLE associado ou não com fertilizante mineral. Os tratamentos testados foram: T1: sem aplicação de CLE e adubação mineral convencional (AMC); T2: 100% da AMC recomendada para a cultura, formulação 06–30–24; doses ($t\ ha^{-1}$, base úmida) de CLE = T3: 2,5; T4: 5,0; T5: 7,5; doses ($t\ ha^{-1}$, base úmida) de CLE + AMC com NPK ($kg\ ha^{-1}$) = T6: 2,5 + 50%; T7: 5,0 + 50%; T8: 7,5 + 50%; T9: 2,5 + 100%; T10: 5,0 + 100%; T11: 7,5 + 100%. Foram avaliadas as variáveis morfológicas (altura de colmos, diâmetro de colmos, número de colmos e área foliar), as análises tecnológicas (ATR, Pol% cana, %Brix caldo e TAH), o estado nutricional e a produtividade da cana. Nas amostras de solo coletadas nas camadas 0–25 e 25–50 cm de profundidade ao final do cultivo da cana, foram avaliados os atributos químicos do solo e os teores de nutrientes. As doses de CLE não alteraram as quantidades de MOS nas duas profundidades, mas incrementaram a CTC na camada superficial. As doses de CLE de 5,0 e 7,5 $t\ ha^{-1}$ (base úmida), associado ou não com aplicação de 50% da AMC, proporcionaram os maiores valores de pH, SB, P, K, Ca, Mg, Cu e Zn na camada superficial. Exceto para os teores de Zn, não foi observada alteração nos atributos químicos do solo na camada subsuperficial com incremento das doses de CLE. Apesar não haver diferença nas variáveis morfológicas e nas análises tecnológicas, com exceção do TAH, notou-se que as plantas apresentaram adequado estado nutricional e ganhos de produtividade. Podemos concluir que o uso do CLE (especialmente nas doses 5,0 e 7,5 $t\ ha^{-1}$, base úmida), contribui para a melhoria da fertilidade do solo, do estado nutricional e da produtividade da cana-de-açúcar, ao mesmo tempo em que reduz a necessidade da aplicação de fertilizantes minerais e permite a disposição sustentável do lodo de esgoto.

Palavras-chave: Fertilizante orgânico. Qualidade do solo. Resíduos urbanos. *Saccharum spp.* Sustentabilidade ambiental.

ABSTRACT

Composted sewage sludge (CSS) has large amounts of organic matter and nutrients that can be used to improve soil chemical attributes and yield of sugarcane. However, there are still no studies showing the benefits of applying this organic fertilizer in sugarcane nursery areas. A field study was conducted to evaluate soil fertility, plant development, nutritional status, productivity, and technological quality of sugarcane seedlings after CSS application with or without mineral fertilizer. The randomized complete block experimental design with four replicates was used. We tested a combination of eleven treatments: T1) without CSS application and conventional mineral fertilization (CMF); T2) 100% of recommended CMF for sugarcane, formulation 06–30–24; rates (Mg ha^{-1} , wet basis) of CSS = T3) 2.5; T4) 5.0; T5) 7.5; rates (Mg ha^{-1} , wet basis) of CSS + CMF with NPK (kg ha^{-1}) = T6) 2.5 + 50%; T7) 5.0 + 50%; T8) 7.5 + 50%; T9) 2.5 + 100%; T10) 5.0 + 100%; T11) 7.5 + 100%. The CSS rates did not change the organic matter content at both depths (0–0.25 and 0.25–0.50 m), but it increased the CEC in the surface layer. The CSS applied at 5.0 and 7.5 Mg ha^{-1} (wet basis) with or without 50% of CMF, provided the highest values for pH, SB, CEC, P, K, Ca, Mg, Cu, and Zn in the surface layer. With the exception of soil Zn concentration, we did not observe a CSS effect on soil chemical attributes in the subsurface layer. Although morphological variables and technological quality were not affected by treatments, we found that sugarcane plants showed adequate nutritional status and productivity gains. Overall, our results demonstrated that CSS application (especially at 5.0 and 7.5 Mg ha^{-1} , wet basis) improves soil fertility, plant nutrition, and sugarcane productivity, while also reducing mineral fertilizer needs and allowing for the sustainable disposal of sewage sludge.

Keywords: Organic fertilizer. Soil quality. Urban waste. *Saccharum* spp. Environmental Sustainability.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	REVISÃO DE LITERATURA	12
2.1	CANA-DE-AÇÚCAR E VIVEIROS DE MUDAS	12
2.2	LODO DE ESGOTO: ASPECTOS GERAIS, COMPOSTAGEM E USO NA CANA-DE-AÇÚCAR	14
3	HIPÓTESE	18
4	OBJETIVOS	19
4.1	OBJETIVO GERAL	19
4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
5	MATERIAL E MÉTODOS	20
5.1	DESCRIÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL	20
5.2	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS.....	21
5.3	OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO COMPOSTO DE LODO DE ESGOTO	22
5.4	INSTALAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO EXPERIMENTO	24
5.4.1	Aplicação dos tratamentos e plantio da cana-de-açúcar	27
5.4.2	Desenvolvimento da cultura	28
5.5	PARÂMETROS AVALIADOS.....	29
5.5.1	Solo	29
5.5.2	Planta	31
5.6	ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	33
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
6.1	ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO	34
6.2	MACRONUTRIENTES NO SOLO	39
6.3	MICRONUTRIENTES NO SOLO.....	43
6.4	AVALIAÇÃO DA CULTURA.....	47
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
	REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é uma cultura de grande importância econômica no setor agroindustrial brasileiro, sendo que o Brasil é o maior produtor e exportador de açúcar (MARIN *et al.*, 2019). Ademais, possuiu uma área cultivada de 8,4 milhões de hectares, com produção de aproximadamente 642 milhões de toneladas e uma produtividade média de 76,34 t ha⁻¹ na safra 2020/21. O Estado de São Paulo possui a maior produção, apresentando uma área cultivada de área 4,2 milhões de hectares e com participação de aproximadamente 50% da produção brasileira (CONAB, 2020). O avanço do plantio de cana-de-açúcar induz inúmeros ganhos, como a mitigação de áreas degradadas, ciclagem de nutrientes, manutenção do carbono no solo, produção de fontes de bioenergia e influência no âmbito econômico-social das regiões em expansão (CHERUBIN *et al.*, 2021). Em 2020, a área de viveiros destinada à produção de mudas de cana-de-açúcar para o plantio no Brasil foi de 188,2 mil hectares (CONAB, 2020). Estas mudas são mantidas até as plantas atingirem idade variando de 9 a 12 meses, sempre com materiais com características genéticas adequadas para cada região, com alta qualidade sanitária (SANTOS; BORÉM, 2016).

Diversos estudos já evidenciaram que o fornecimento de nutrientes via adubação é uma etapa crucial para manter altos níveis de produtividade em um canavial, incluindo os viveiros (GAZOLA *et al.*, 2017; OLIVEIRA *et al.*, 2020). No Estado de São Paulo, a recomendação da adubação mineral de plantio da cana-de-açúcar está relacionada a duas variáveis: produtividade esperada e os teores de P e K do solo. Se a produtividade esperada for acima de 100 t ha⁻¹, deve-se aplicar 30 kg ha⁻¹ de N, 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 150 kg ha⁻¹ de K₂O. Se for constatado baixo teor de B, Cu e Zn no solo é recomendado a aplicação de 2, 4 e 5 kg ha⁻¹ de nutriente, respectivamente (RAIJ 1997; VITTI *et al.*, 2011). Todavia, sabe-se que a maior parte dos fertilizantes minerais comercializados no Brasil são importados e possuem preços elevados (VASCONCELLOS *et al.*, 2019), aumentando os custos de produção do setor canavieiro (ROSA *et al.*, 2020). Dessa forma, é fundamental a busca por fontes alternativas de fertilizantes garantindo a redução de custos e ao mesmo tempo a segurança na cadeia produtiva da cana-de-açúcar.

O composto de lodo de esgoto (CLE) é um fertilizante orgânico derivado do tratamento de esgotos urbanos oriundo das Estações de Tratamento de Esgoto

(ETEs), que pode conter em sua composição, grande quantidade de matéria orgânica e nutrientes de plantas, incluindo N, P e micronutrientes (PRATES *et al.*, 2020).

Nesse sentido, vários estudos já relataram utilização do lodo compostado e seus benefícios nos atributos físicos, químicos, físico-químicos e biológicos do solo (DUONG *et al.*, 2013; BEDADA *et al.*, 2016; CASTÁN *et al.*, 2016; HERNANDEZ *et al.*, 2016; RIGBY *et al.*, 2016; JAKUBUS; BAKINOWSKA, 2018; FLORENTINO *et al.*, 2019; PRATES *et al.*, 2020). Desta forma, a compostagem acabou se tornando uma solução para as empresas que gerenciam o lodo de algumas ETEs, pensando sempre na continuidade da reciclagem do lodo na agricultura (HARGREAVES *et al.*, 2008).

Recentemente, foi publicada uma resolução que estabelece normas e regulamenta a utilização do lodo de esgoto na agricultura brasileira. Assim, toda aplicação desse resíduo no solo deve seguir critérios agrônômicos que são estabelecidos por meio da Resolução no 498/2020 (BRASIL, 2020a). Todavia, para que o lodo de esgoto compostado seja considerado um fertilizante orgânico, esse produto deverá atender às normas do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) por meio da Instrução Normativa nº 61/2020 (Brasil 2020b), que estabelece critérios de quantidades toleradas, como organismos patogênicos e metais pesados.

Apesar de já existir muitas evidências de que o CLE pode ser utilizado em solos agrícolas e florestais, nota-se que ainda são escassos estudos que visam avaliar o desempenho desse fertilizante orgânico como fornecedor de nutrientes, possibilitando a redução da utilização de fertilizantes minerais, especialmente, para a formação de mudas em viveiros de cana-de-açúcar.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CANA-DE-AÇÚCAR E VIVEIROS DE MUDAS

A cana-de-açúcar é pertence ao gênero *Saccharum L.*, da tribo Andropogoneae dentro da família das Poaceae (gramíneas, na antiga classificação botânica) (DANIELS; ROACH, 1987). O centro de origem dessa cultura é a ilha de Nova Guiné, no oceano pacífico. A exploração da cana-de-açúcar é feita desde 6000 anos a.C. e sua distribuição no mundo está intimamente relacionada à atividade humana. No Brasil, a cana-de-açúcar chegou em 1520 relacionada à chegada dos portugueses. O cultivo dessa cultura se apresenta como uma excelente opção (mais sustentável) à produção de combustíveis renováveis que visam substituir o petróleo e não sejam agressivos ao ambiente, além da possibilidade da produção de açúcar e obtenção de energia, biogás, biofertilizante, plástico e outros produtos utilizados na indústria automobilística, alimentícia, farmacêutica e de cosméticos, lhe conferindo maior variabilidade econômica e sustentabilidade social (RODRIGUES *et al.*, 2018).

A cana-de-açúcar apresenta desenvolvimento simultâneo nas raízes, colmos e folhas, sendo em alguns aspectos uma cultura sequencial. No início do período de desenvolvimento, o número final de perfilhos (importante fator de produtividade) é estabelecido e a área foliar é definida com pequena deposição de sacarose nos colmos. No entanto, logo iniciado o alongamento dos colmos, há um acúmulo simultâneo de açúcar nos mesmos com a manutenção e desenvolvimento da capacidade fotossintética da planta (COCK; ALVAREZ; ESTRADA, 2010).

Na área de energias limpas, a cultura de cana-de-açúcar é considerada uma das grandes alternativas para o setor de biocombustíveis devido ao grande potencial na produção de etanol e seus respectivos subprodutos. A agroindústria sucroalcooleira nacional, diferentemente do que ocorre nos demais países, opera numa conjuntura positiva e sustentável. O segmento industrial brasileiro produz o etanol ecologicamente correto, que não afeta a camada de ozônio e é obtido a partir de fonte renovável. A produção de cana-de-açúcar está estimada em 665, 1 milhões de toneladas, apontando aumento de 3,5% em relação à safra passada. Em São Paulo, o indicativo é de aumento de 2,9% em comparação à temporada anterior, estimando-se 342,6 milhões de toneladas de cana-de-açúcar (CONAB, 2020).

A variedade RB867515 foi lançada oficialmente como variedade comercial em março de 1997, pela Universidade Federal de Viçosa, tornando assim a aliança que possibilitou a RIDESA, firmar no setor sucroalcooleiro, pois, ela atendeu e ainda está atendendo a uma demanda que facilitou o avanço dos canaviais para solos de baixa fertilidade, arenosos e com restrições hídricas. A variedade RB867515 resultou de um policruzamento, tendo variedade progenitora RB72454, fecundadas com pólen de diversas outras variedades, ao acaso, de modo que não se pode especificar qual foi a variedade “pai” (RIDESA, 2010).

A variedade apresenta hábito de crescimento ereto e despalha fácil, com perfilhamento médio sendo os colmos de diâmetro médio e alta uniformidade. Os colmos possuem entrenós cilíndricos, de cor verde-arroxeadado sob a palha e roxo intenso quando expostos ao sol. Apresenta também pouca rachadura e suave zigzague. O aspecto é liso e com pouca cerra. O anel de crescimento tem largura média, de cor verde-amarelada sob a palha e verde-arroxeadado quando exposto ao sol. A zona radicular é de largura média, sem enraizamento aéreo (RIDESA, 2010).

As gemas são de tamanho médio do tipo pentagonal, pouco proeminente ultrapassando o anel de crescimento e com poro germinativo apical. A almofada é de largura estreita e deprimida. Esta variedade tem apresentado boa capacidade de brotação mesmo em plantio tardio sob baixas temperaturas. Em cana planta, no plantio de ano e meio, pode ocorrer tombamento ao final do ciclo devido à crescimento vigoroso (RIDESA, 2010).

A área estimada de produção de mudas na região sudeste do Brasil é de 97,9 mil hectares para atender uma área de plantio de 725,2 mil hectares. Por esta razão, há uma grande atenção referente a produção de mudas, principalmente em fornecer as melhores condições para o desenvolvimento da cultura. O fornecimento de nutrientes é um dos fatores de maior impacto podendo apresentar cerca de 80% do estabelecimento da cultura pois influencia diretamente o crescimento das plantas (DE MARCO *et al.*, 2017; CONAB, 2020).

A formação de mudas de cana-de-açúcar com qualidade é essencial para a promoção de melhores índices de germinação e o aumento do número de perfilhos por metro linear que garantirá uma população ideal para a produção final, assim, o alto desenvolvimento vegetativo poderá favorecer um controle das plantas invasoras podendo reduzir custos nos tratamentos culturais (PILAN *et al.*, 2017; GAZOLA *et al.*, 2017; BRAGA *et al.*, 2019).

O acondicionamento para o estabelecimento da cultura está atrelado a realização de uma adequada adubação mineral e/ou orgânica, com o fim de suprir as necessidades da cultura da cana-de-açúcar no decorrer do ciclo produtivo. A adubação para viveiros é realizada com base no ciclo inicial, ou seja, recebe adubação para cana-planta. Por essa razão, faz-se necessária a aplicação de doses de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) de maneira balanceada (VITTI *et al.*, 2006; OLIVEIRA, 2019).

Sánchez Parra (2020) faz menção da grande relevância da aplicação de nutrientes na cultura, sendo a utilização do P na cana-planta um fator primordial para a garantia da longevidade do canavial. Sabe-se que este nutriente é fundamental para a formação das plantas durante seu desenvolvimento vegetativo, principalmente, em solos que apresentam deficiência de P. Fica evidente a importância da adubação na formação dos viveiros que irão fornecer material vegetativo para o replantio e expansão de canaviais comerciais (PINTO *et al.*, 2016; NICCHIO *et al.*, 2020; CARDOSO *et al.*, 2021).

2.2 LODO DE ESGOTO: ASPECTOS GERAIS, COMPOSTAGEM E USO NA CANA-DE-AÇÚCAR

O lodo de esgoto (LE) é um resíduo oriundo do tratamento de esgotos ou das águas servidas. Sua composição é predominantemente orgânica, variando de acordo com a origem e a tecnologia empregada no sistema de tratamento do esgoto (BERTON; NOGUEIRA, 2010; VON SPERLING, 2017). Estima-se que o Brasil produz anualmente cerca de 150 a 220 mil toneladas de matéria seca de LE (BORGES; RODRIGUES; MARTINS, 2021). Assim, por ser gerado em larga escala, é considerado uma fonte de preocupação quanto à sua disposição final (BELHAJ *et al.*, 2016; LIANG *et al.*, 2021; ONDREIČKOVÁ *et al.*, 2021).

O LE possui um grande potencial para uso agrônômico e florestal, podendo ser utilizado “in natura” no campo ou sendo um dos componentes para obtenção de novos fertilizantes orgânicos. O lodo de esgoto compostado por ser empregado com adubo orgânico. Para tal, esse fertilizante é produzido a partir da compostagem termofílica, um processo no qual os resíduos orgânicos passam pela decomposição e estabilização biológica de seus compostos, recebendo a classificação de fertilizante

orgânico classe B e podendo ser utilizado de maneira segura sem riscos de poluição ao ambiente (BRASIL, 2020b; CATOLICO *et al.*, 2015; TERA AMBIENTAL, 2015).

A utilização do LE na agricultura, particularmente, nas regiões tropicais, pode elevar os teores de matéria orgânica (MO) e de nutrientes de plantas em decorrência das atividades de intemperismo. A fertilidade dos solos agrícolas pode ser incrementada mediante a utilização do LE, principalmente, devido a presença da MO que é representada pela proporção de 50–70% da composição desse resíduo. Por outro lado, os componentes minerais são encontrados na proporção de 30–50% (incluindo 1 a 4% de carbono inorgânico), 3,4 a 4% de N, 0,5–2,5% de P e quantidades significativas de outros nutrientes, incluindo micronutrientes (SPERLING; ANDREOLI, 2001; FYTILI; ZABANIOTOU, 2008; OCIEPA *et al.*, 2017; PRATES *et al.*, 2020).

A utilização do LE como fertilizante pode fornecer os elementos essenciais, fundamentais para o desenvolvimento dos vegetais, sendo até uma alternativa de complementação, redução da fertilização convencional, mediante a promoção da manutenção da fertilidade do solo podendo até contribuir para a redução e/ou prevenção da contaminação dos recursos hídricos. Contudo, a utilização desse resíduo poderá até aumentar a reserva de carbono solo, pela razão da estrutura dos compostos com alta estabilidade oriunda da MO (BETTIOL *et al.*, 2006; DIAS *et al.*, 2007; NOGUEIRA *et al.*, 2008; BITTENCOURT *et al.*, 2014; ALBUQUERQUE *et al.*, 2015).

Pesquisadores já evidenciaram que a aplicação do LE apresenta grande potencial de uso na agricultura, por meio das culturas agrícolas: milho e feijão (GOMES *et al.*, 2007; LOBO *et al.*, 2015); espécies florestais, como eucalipto e pinus (BERTON; NOGUEIRA, 2010; BOURIOUG *et al.*, 2014; MARRON, 2015; XUE *et al.*, 2015; NIROLA *et al.*, 2016), além de outras espécies vegetais com capacidade de melhorar a conservação de solos (OCIEPA *et al.*, 2017).

Uma alternativa aplicada pelas empresas gestoras de LE e das estações de tratamento de esgoto é a realização da compostagem, com o objetivo de promover a reciclagem e enriquecimento do LE dando um valor agregado e utilização na agricultura. A compostagem é uma técnica que pode contribuir para alterar a mobilidade de contaminantes inorgânicos (p.e. Cd, Cr, Pb, etc.), limitando a sua solubilidade e o potencial biodisponível no solo, além de reduzir a carga patogênica presente no lodo (NOGUEIRA *et al.*, 2007; WARMAN, 2008; TIAN; LIANG, 2009; KHALIL *et al.*, 2011; PRATES *et al.*, 2020).

Dependendo da origem e procedência, alguns metais pesados podem estar presentes na composição do CLE. Apesar disso, alguns desses elementos (Cu, Fe, Mn, Ni e Zn) são considerados micronutrientes da planta. Ainda que a absorção seja realizada em pequenas proporções, esses elementos apresentam funções vitais para a sobrevivência das plantas, sendo elas: formação de auxinas, ativação de enzimas, transporte de sintetizados, formação de parede celular, fotossíntese e multiplicação celular (MALAVOLTA, 2006; BÖRJESSON; KÄTTERER; DECHEN *et al.*, 2018).

O incremento dos atributos químicos do solo, como o aumento do pH no solo, melhoria nos teores de carbono (C) orgânico, na saturação por bases (V), soma de bases (SB) e na capacidade de troca de cátions (CTC) são benefícios da utilização do CLE para fins agrícolas. Além disso, também é notória a melhoria nos atributos físicos (aumento na porosidade, diminuição da resistência à penetração e da densidade do solo) e químicos (aumento nos teores de matéria orgânica, de nutrientes e da saturação por bases). Outro efeito positivo é a adequação da matéria prima sendo transformada e aplicada para fins agrícolas, aumento de produtividade das culturas, sem acometer efeitos nocivos para o ambiente e para os humanos (BERTON; NOGUEIRA, 2010; CAMPOS *et al.*, 2011; NASCIMENTO *et al.*, 2014; BONINI, 2015; PEDROSA *et al.*, 2018; SPIERING *et al.*, 2020).

Os canaviais brasileiros, em sua maioria, são cultivados em ambientes de produção com restrições de nutrientes disponíveis para uma adequada nutrição, sendo necessário a suplementação via fertilizantes para a obtenção de ganhos produtividade (FERREIRA, 2015; NAVARRETE *et al.*, 2021). Nesse sentido, o setor canavieiro investe anualmente na compra de grandes quantidades de fertilizantes minerais, aumentando os custos de produção das usinas produtoras de cana-de-açúcar (ALVES, 2020; BATISTA, 2021). Com isso, fontes alternativas de nutrientes passaram a ser pesquisadas para uso nos canaviais, como é o caso do CLE (BALAGANESH; FERREIRA *et al.* 2020; SILVA *et al.*, 2020).

Anteriormente ao uso do CLE, já haviam estudo evidenciando que a aplicação do LE na cana-planta, dentro dos critérios técnicos, promove como efeito direto, a melhoria da fertilidade do solo, pelo aumento no teor de C-orgânico e fornecimento de N e P, redução no uso de fertilizantes nitrogenado e fosfatado, respectivamente, em 100% e 30%, aumento da produtividade de colmo e de açúcar, sem alterar a qualidade tecnológica, como efeito residual, na cana-soca o aumento da produtividade de colmos em 12% e da produtividade de açúcar em torno 11% (FRANCO, 2009).

Outros pesquisadores também relataram efeitos benéficos do uso do LE em solos cultivados com cana-de-açúcar, no qual a utilização do LE promoveu melhorias em parâmetros físico-químicos, como valores de pH, condutividade elétrica e valor CTC/C. A adição de material orgânico aos solos brasileiros onde é cultivada a cana-de-açúcar é uma das alternativas de manejo que visam aumentar a produtividade e a qualidade do produto colhido, em função das muitas melhorias que a adição de matéria orgânica aos solos pode proporcionar, como maior retenção de água, retenção de poluentes, fornecimento de nutrientes de forma mais lenta, entre outras melhorias (AMIR *et al.*, 2005; CORRÊA *et al.*, 2006; MARQUES *et al.*, 2007; BERTONCINI *et al.*, 2008; MARQUES *et al.*, 2008; NOGUEIRA *et al.*, 2013).

Berton (2000) demonstrou que a dose de $5,5 \text{ t ha}^{-1}$ de LE (base seca), na cultura da cana-de-açúcar equivale a 120 kg ha^{-1} de N inorgânico ou mineralizável nos três primeiros meses após a aplicação. Também há relatos do fornecimento de micronutrientes, como: Cu, Mn, Mo e Zn (DIAS, 2012; MAGALHÃES, 2012) e Ni (ROBLEDO-MAHÓN *et al.*, 2019). Portanto, a utilização do LE ou do CLE na em área cultivadas com cana-de-açúcar poder ser uma grande alternativa e oportunidade viável de redução de custo, devido à redução do uso de fertilizantes minerais (RIGO *et al.*, 2014).

Apesar de já existir muitas evidências de que o CLE pode ser utilizado em solos agrícolas e florestais, nota-se que ainda são escassos estudos que visam avaliar o desempenho desse fertilizante orgânico como fornecedor de nutrientes, possibilitando a redução da utilização de fertilizantes minerais, especialmente, para a formação de mudas em viveiros de cana-de-açúcar.

3 HIPÓTESE

O composto de lodo de esgoto utilizado como fertilizante orgânico em viveiro de muda de cana-de-açúcar, promove melhorias na fertilidade do solo e adequada nutrição das plantas, melhorando o desenvolvimento e incrementando a qualidade tecnológica e a produtividade da cultura, além de contribuindo para redução do aporte de fertilizantes minerais.

4 OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar as alterações químicas do solo, o desenvolvimento das plantas, o estado nutricional, a produtividade e a qualidade tecnológica das mudas de cana-de-açúcar cultivadas em viveiro e adubadas com composto de lodo de esgoto associado ou não com fertilizantes minerais.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

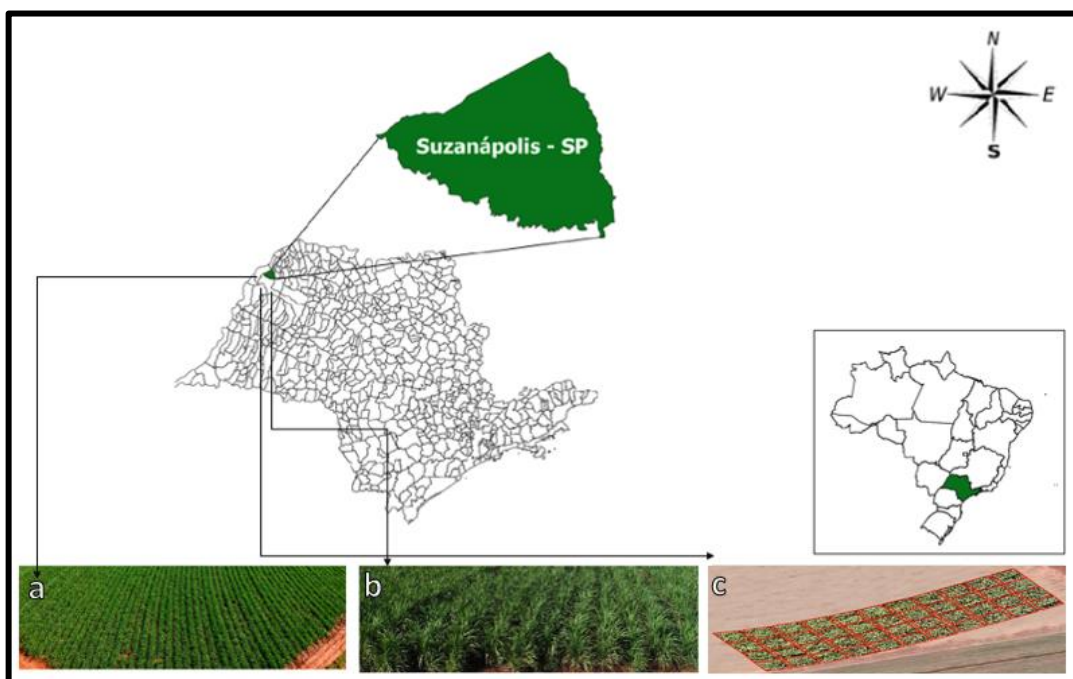
- Determinar os atributos químicos do solo (MO, pH, CTC, H+Al, Al, SB, V, P, K, Ca, Mg e S) nas camadas de 0–25 e 25–50 cm de profundidade logo após a colheita da cultura da cana-de-açúcar.
- Monitorar o desenvolvimento vegetativo por meio de variáveis morfológicas: altura de colmos, diâmetro de colmos, número de colmos e área foliar.
- Verificar o estado nutricional das plantas por meio dos teores foliares (N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn, Ni e Zn) e compará-los com as faixas de suficiência desses nutrientes para a cultura da cana-de-açúcar.
- Avaliar a produtividade da cultura da cana-de-açúcar em função aos tratamentos testados.
- Analisar a qualidade tecnológica da cana-de-açúcar por meio do açúcar total recuperável (ATR), do POL% cana e do %Brix caldo, além da produtividade de açúcar por hectare (TAH).

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

O experimento foi realizado no município de Suzanápolis/SP ($20^{\circ}28'46.95''\text{S}$ e $51^{\circ}4'33.47''\text{O}$), com altitude de 354 m acima do nível do mar (Figura 1).

Figura 1 - Área experimental localizado no município de Suzanápolis, estado de São Paulo, Brasil. Fazenda comercial de cana-de-açúcar (a), área experimental (b) e parcelas experimentais (c).

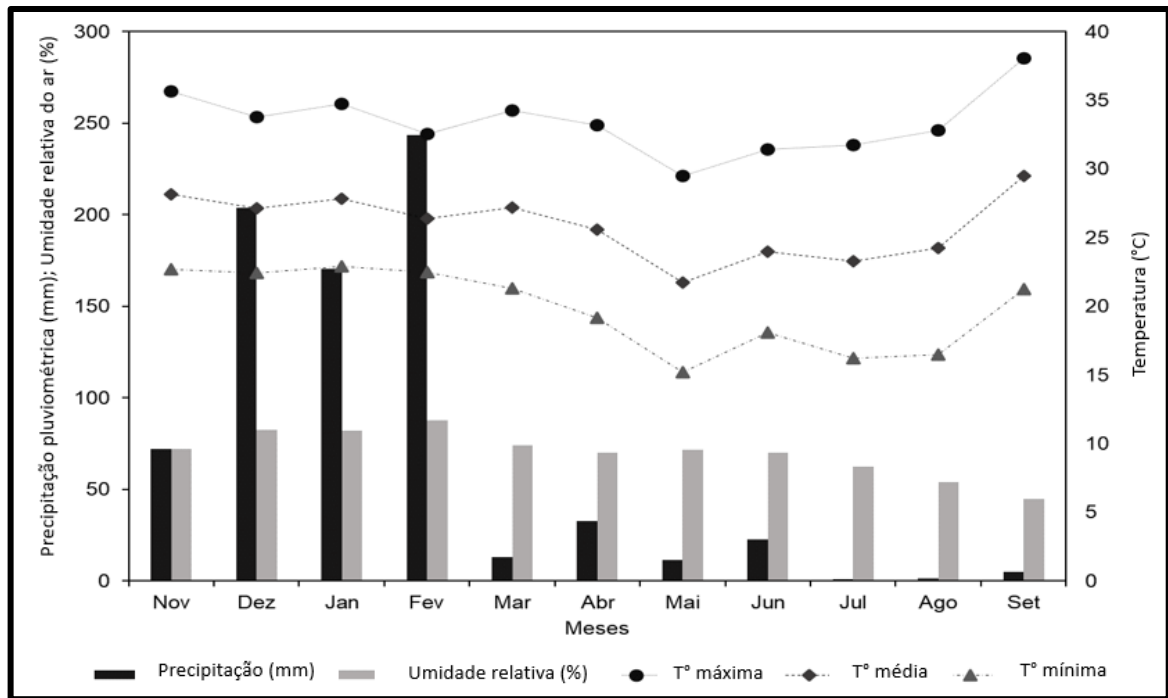


Fonte: Elaboração do próprio autor.

O solo da área experimental foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico Típico, textura arenosa (SANTOS *et al.*, 2018). A área apresentava um histórico de oito anos com o cultivo de cana-de-açúcar.

O tipo climático da região é o Aw (chuva máxima no verão e outono, inverno seco e chuva periódica) conforme a classificação de Köppen e Geiger (1928). Os dados climáticos (temperaturas média, máxima e mínima, precipitação pluvial e umidade relativa do ar) foram registrados durante o desenvolvimento da cultura no ano agrícola referente aos resultados apresentados neste estudo. Os dados coletados da estação climática da Faculdade de Engenharia da Unesp, Ilha Solteira, SP, Brasil (Figura 2).

Figura 2 - Médias mensais da precipitação pluviométrica (mm), da umidade relativa do ar (%) e da temperatura (°C) máxima, média e mínima registradas durante o cultivo da cana-de-açúcar.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

5.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS

Adotou-se o delineamento experimental em blocos casualizados, com 11 tratamentos e quatro repetições, totalizando 44 unidades experimentais. Os tratamentos estudados foram compostos por doses de CLE (base úmida) associadas ou não com a aplicações de adubos minerais, da seguinte forma: controle absoluto (sem aplicação de CLE e de adubos minerais); uma dose com 100% de adubos minerais (NKP na formulação 06-30-24); três doses de CLE (2,5; 5,0 e 7,5 t ha⁻¹, base úmida) e três doses de CLE 2,5; 5,0 e 7,5 kg ha⁻¹, base úmida, com 50% da adubação mineral recomendada (NPK na formulação 06-30-24); e, três doses de CLE 2,5; 5,0 e 7,5 t ha⁻¹, base úmida, com 100% da adubação mineral recomendada (NPK na formulação 06-30-24) (Tabela 1).

Tabela 1 - Composição dos tratamentos testados em área para produção de mudas de cana-de-açúcar

Tratamento	Composição
T1	Sem aplicação de composto de lodo de esgoto e de adubos minerais
T2	100% da adubação mineral de plantio recomendada pela cultura ⁽¹⁾
T3	2,5 t ha ⁻¹ composto de lodo de esgoto ²
T4	5,0 ha ⁻¹ composto de lodo de esgoto
T5	7,5 ha ⁻¹ composto de lodo de esgoto
T6	2,5 t ha ⁻¹ composto de lodo de esgoto + 50% da adubação mineral
T7	5,0 t ha ⁻¹ composto de lodo de esgoto + 50% da adubação mineral
T8	7,5 t ha ⁻¹ composto de lodo de esgoto + 50% da adubação mineral
T9	2,5 t ha ⁻¹ composto de lodo de esgoto + 100% da adubação mineral
T10	5,0 t ha ⁻¹ composto de lodo de esgoto + 100% da adubação mineral
T11	7,5 t ha ⁻¹ composto de lodo de esgoto + 100% da adubação mineral

⁽¹⁾ Seguindo as recomendações utilizadas de uma usina do setor sucroenergético da região do noroeste paulista para plantio convencional, sendo aplicado 550 kg de NPK (06-30-24) equivalente à 33 kg ha⁻¹ de N, 165 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 132 kg ha⁻¹ de K₂O. ⁽²⁾ Doses do composto de lodo de esgoto foram estabelecidas com base em informação disponibilizadas pelo fornecedor do fertilizante.

5.3 OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO COMPOSTO DE LODO DE ESGOTO

O composto de lodo de esgoto (CLE) foi fornecido pela empresa Tera Ambiental Ltda, localizada em Jundiaí, SP, Brasil. Trata-se de um fertilizante orgânico composto Classe B, produzido a partir da compostagem de resíduos orgânicos urbanos. A matéria principal que origina o produto é o lodo de esgoto sanitário, aproximadamente 75% do resíduo é coletado na região metropolitana da cidade de Campinas-SP, vale a pena mencionar que entram no processo os resíduos agroindustriais tais como bagaços, cascas de frutas e legumes provenientes do processamento de alimentos, cama de aviário e cavaco de madeira. Na obtenção do CLE, os compostos orgânicos sofrem decomposição e estabilização biológica por meio da compostagem termofilia, com temperatura acima dos 60 °C, tornando-o completamente higienizado, posteriormente o produto passa pelo processo de peneiramento e empilhamento, fase essencial para a maturação do composto num período de aproximadamente duas semanas. Após essa etapa o fertilizante orgânico já estará pronto para o uso, o produto possui cerca de 40% de umidade.

Antes da aplicação, o CLE foi caracterizado ponto de vista químico (pH, CTC, MO, C-orgânico, umidade, As, Ba, B, Cd, Ca, Cr, Cu, Fe, Hg, Mg, Mn, Mo, N, Na, Ni, P, Pb, S, Se e Zn) e microbiológico (coliformes termotolerantes, salmonela e ovos viáveis de helmintos), seguindo as recomendações preconizadas na Resolução nº 498 do Conama (Brasil, 2020a), sendo considerado apropriado para uso nessa pesquisa (Tabela 2) (Figura 3).

Tabela 2 - Composição química e microbiológica da amostra do composto de lodo de esgoto

Característica	Unidade	Teor (base úmida)	Limite ⁽¹⁾
<i>Característica química</i>			
pH (CaCl ₂)	-	7,8	-- ⁽²⁾
Umidade (60–65°C)	%	33,9	--
Umidade total	%	34,7	--
Matéria orgânica total	g kg ⁻¹	230,4	--
Capacidade de troca catiônica	mmol _c dm ⁻³	250,0	--
C/N	-	11,0	--
Nitrogênio total	g kg ⁻¹	10,5	--
Fósforo total	g kg ⁻¹	17,0	--
Potássio total	g kg ⁻¹	6,9	--
Cálcio total	g kg ⁻¹	36,4	--
Magnésio total	g kg ⁻¹	9,5	--
Enxofre total	g kg ⁻¹	6,3	--
Sódio total	mg kg ⁻¹	0,0	--
Arsênio	mg kg ⁻¹	6,4	20,0
Boro	mg kg ⁻¹	17,0	--
Cádmio	mg kg ⁻¹	1,3	3,0
Cobre	mg kg ⁻¹	178,0	--
Chumbo	mg kg ⁻¹	33,8	150,0
Cromo	mg kg ⁻¹	89,7	--
Ferro	mg kg ⁻¹	18207,0	--
Manganês	mg kg ⁻¹	224,0	--
Mercúrio	mg kg ⁻¹	0,3	1,0
Molibdênio	mg kg ⁻¹	10,9	--
Níquel	mg kg ⁻¹	33,6	70,0
Zinco	mg kg ⁻¹	611,0	--
<i>Análises biológicas</i>			
<i>Salmonella</i> sp.	NMP/10g	Ausente	
<i>Coliforme Termotolerantes</i>	NMP/g	0	
Ovos viáveis de helmintos	Ovos/g de ST	0,12	

⁽¹⁾ Instrução normativa nº 7 MAPA (2016). ⁽²⁾ Não determinado. NMP = Número mais provável.

Figura 3 - Armazenamento do composto de lodo de esgoto (CLE) obtido junto à empresa Tera Ambiental Ltda, localizada em Jundiaí, SP



Fonte: Elaboração do próprio autor

5.4 INSTALAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO EXPERIMENTO

O experimento foi instalado em condições de campo em novembro de 2019 em uma fazenda de produção comercial (Figura 1). Foi utilizada como planta-teste a variedade de cana-de-açúcar RB867515, sendo a variedade mais plantada no território brasileiro. Esta variedade foi utilizada devido a elevada produtividade e rusticidade (ASSOCANA, 2020), além de apresentar boa capacidade de brotação mesmo em plantio tardio sob baixas temperaturas, hábito de crescimento ereto, despalha fácil, boa brotação de soqueira, mesmo quando colhida crua, possui alto teor de sacarose e crescimento rápido (RIDESA, 2010).

No preparo inicial da área experimental foram utilizadas as operações agrícolas para o manejo das plantas invasoras mediante a realização de uma dessecação utilizando o glifosato na dose de $3,1 \text{ kg ha}^{-1}$ do ingrediente ativo (i.a.). Posteriormente, foram realizadas amostragens do solo nas camadas de 0–25 e 25–50 cm de profundidade para caracterização física (TEIXEIRA *et al.*, 1997) e química (RAIJ *et al.*, 2001) (Tabela 3).

Tabela 3 - Atributos físicos ⁽¹⁾ e químicos ⁽²⁾ das amostras de solo coletadas na área experimental nas camadas de 0–25 e 25–50 cm de profundidade (média ± DP, n = 3)

Atributos	Unidade	Profundidade (cm)			
		0–25		25–50	
pH (CaCl ₂)	-	5,2	± 0,08	5,1	± 0,12
MO	g dm ⁻³	12,7	± 0,47	12,0	± 0,82
P _{resina}	mg dm ⁻³	1,3	± 0,47	2,7	± 1,70
K ⁺	mmol _c dm ⁻³	1,8	± 0,19	1,5	± 0,22
Ca ²⁺	mmol _c dm ⁻³	15,7	± 5,25	17,3	± 5,44
Mg ²⁺	mmol _c dm ⁻³	8,7	± 0,47	10,7	± 0,47
Al ³⁺	mmol _c dm ⁻³	0,7	± 0,94	1,7	± 1,25
H+Al	mmol _c dm ⁻³	16,7	± 2,36	16,0	± 1,41
SB	mmol _c dm ⁻³	25,5	± 5,51	29,2	± 5,73
S-SO ₄	mg dm ⁻³	2,0	± 0,00	2,3	± 0,47
CTC	mmol _c dm ⁻³	42,2	± 4,27	45,2	± 4,99
V	%	60,0	± 7,79	64,0	± 5,72
B	mg dm ⁻³	0,2	± 0,01	0,1	± 0,01
Cu	mg dm ⁻³	1,1	± 0,08	1,3	± 0,08
Fe	mg dm ⁻³	13,3	± 17,44	16,0	± 21,21
Mn	mg dm ⁻³	12,4	± 3,03	7,9	± 1,84
Zn	mg dm ⁻³	0,6	± 0,00	0,6	± 0,05
Argila	g kg ⁻¹			134,0	± 23,00
Silte	g kg ⁻¹			87,0	± 16,00
Areia	g kg ⁻¹			779,0	± 39,00
Textura	-				Arenosa

⁽¹⁾ Teixeira *et al.*, (2017). ⁽²⁾ Raij *et al.*, (2001). MO: Matéria orgânica. CTC: Capacidade de troca catiônica. SB: Soma de bases. V: Saturação por bases.

Com base nos resultados da avaliação da fertilidade do solo, foi realizada a aplicação incorporada de 0,5 t ha⁻¹ de calcário agrícola, com um Poder Relativo Neutralizante Total (PRNT) de 85%, para elevar a saturação por base para 70%, além da aplicação de 0,7 t ha⁻¹ gesso agrícola seguindo as recomendações de Sousa *et al.* (2015) e Raij *et al.* (1997), respectivamente, ambas aplicações foram realizadas 17 dias antes do plantio. Posteriormente, foi realizada uma gradagem pesada, seguida de uma grade intermediária e subsolagem nas profundidades 30, 25 e 45 cm, respectivamente, com aplicação de inseticida imidacloprido 1,2 kg i.a.ha⁻¹ (Figura 4).

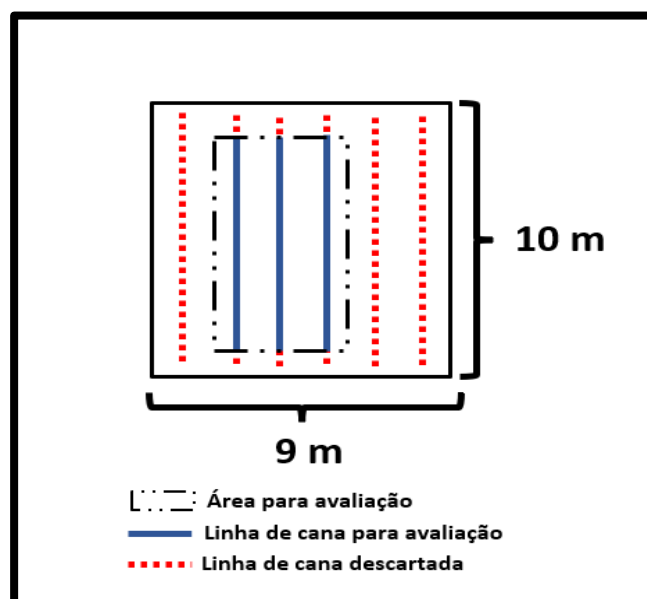
Figura 4 – Vista da área experimental preparada e já com aplicação de calcário e gesso agrícola



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Cada unidade experimental foi formada por seis linhas da cultura de cana-de-açúcar, com espaçamento de 1,50 m entre si e com 10 m de comprimento, totalizando 90 m² por parcela e 3960 m² de área total. Para as avaliações foi utilizado uma área útil de 36 m² (Figura 5).

Figura 5 – Croqui da área útil na parcela experimental

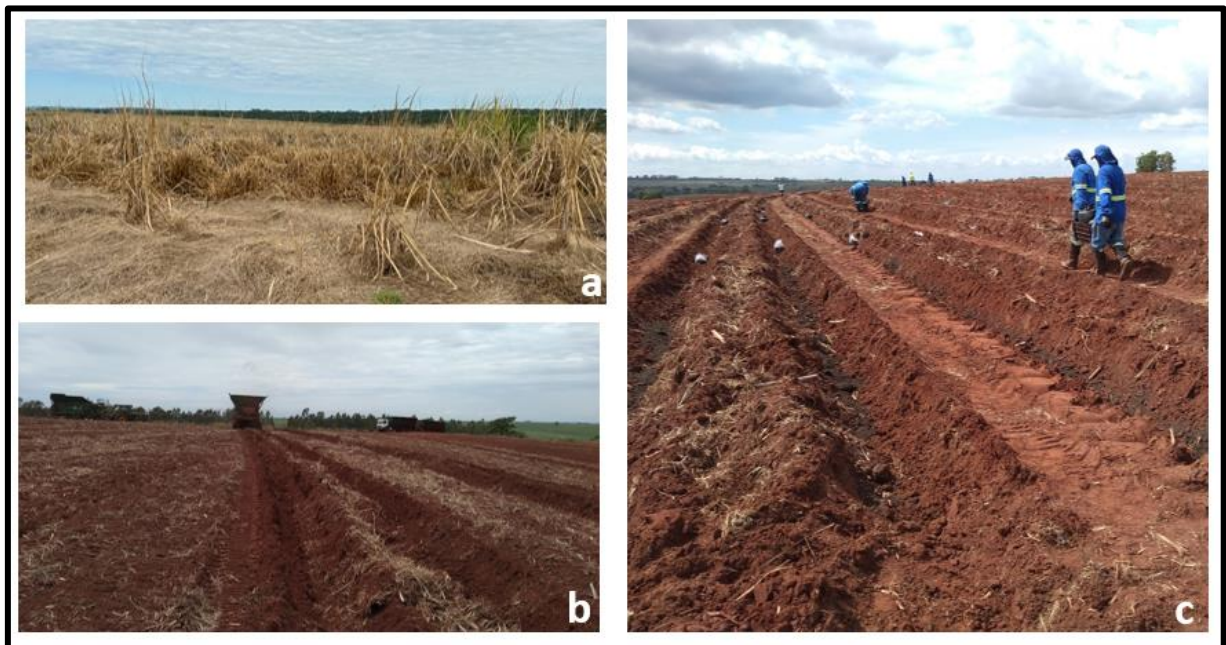


Fonte: Elaboração do próprio autor.

5.4.1 Aplicação dos tratamentos e plantio da cana-de-açúcar

O CLE e os fertilizantes minerais foram aplicados manualmente diretamente no sulco de plantio (Figura 6) conforme as doses estabelecidas em cada tratamentos (Tabela 1). O plantio da cana-de-açúcar foi realizado em novembro de 2019, de maneira semi-mecanizada, utilizando um total de 14,26 t ha⁻¹ de muda de cana-de-açúcar da variedade RB867515. A profundidade do sulco para a realização do plantio foi de aproximadamente 35 cm, as mudas foram posicionadas no fundo do sulco com uma proporção de 22 gemas viáveis por metro linear. No sulco de plantio também foi realizado controle preventivo da doença podridão-abacaxi (*Ceratocystis paradoxa*), de cupim (*Heterotermes tenuis*) e nematoides (*Pratylenchus spp* e *Meloidogyne spp*) por meio da aplicação de piraclostrobina 0,125 kg i.a. ha⁻¹, fipronil 0,36 kg i.a. ha⁻¹ e nematicida biológico (*Bacillus subtilis* e *B. licheniformis*) na dose 0,08 kg ha⁻¹.

Figura 6 - Dessecação da área experimental (a), sulcação e deposição de mudas de cana-de-açúcar (b) e aplicação de CLE e dos fertilizantes minerais (c)



Fonte: Elaboração do próprio autor.

5.4.2 Desenvolvimento da cultura

Aos cinco dias após o plantio (DAP), foi realizada a aplicação em pré-emergência com uma mistura de herbicidas: clomazone, diuron e hexazinona (1,0; 0,84 e 0,24 kg de i.a.) objetivando controlar o banco de sementes por meio da alta taxa de resisualidade dos produtos, alcançando um controle efetivo de plantas daninhas de até 70 dias. Para a aplicação do herbicida, utilizou-se um trator autopropelido com capacidade de 2000 L, com barras de 24 m equipados com bicos tipo leque plano padrão com um ângulo de aplicação de 110°, espaçados de 0,5 m e calibrado para aplicação de volume de 150 L ha⁻¹ de calda. Aos 45 DAP foram realizadas avaliações de germinação, mediante a verificação do número total de gemas germinadas, as amostragens foram realizadas de maneira aleatória. Posteriormente aos 60 DAP, realizou-se uma contagem total dos perfilhos, com o objetivo de verificar a população parcial dos colmos de cana-de-açúcar, a contagem foi realizada a cada 10 m na linha de plantio onde se contabilizou o número total de colmos. Foi realizada a operação de quebra-lombo, aos 90 dias após o plantio, essa atividade faz-se necessário para promover o nivelamento do solo nas entrelinhas da cultura e reduzir a quantidade de impurezas minerais (Figura 7).

Figura 7 - Cultura da cana-de-açúcar em diferentes fases de desenvolvimento



Fonte: Elaboração do próprio autor

A área experimental não foi irrigada, contando apenas com a precipitação pluviométrica ocorrida na região na época do estudo (Figura 2).

5.5 PARÂMETROS AVALIADOS

5.5.1 Solo

A amostragem do solo foi realizada nas camadas de 0–25 e 25–50 cm de profundidade, dentro da área útil de cada parcela. A coleta foi realizada com o auxílio de um amostrador mecânico, logo após a colheita da cana-de-açúcar (Figura 8). Foram coletadas seis subamostras por parcela, aleatoriamente, no sentido da linha de cultivo da cultura, para a formação de uma amostra composta. Na sequência, as amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira com 2,0 mm de abertura de malha, acondicionadas em sacos de polietileno, identificadas e armazenadas em câmara seca até o momento das análises.

Figura 8 - Amostragem do solo realizada ao final da colheita da cana



Fonte: Elaboração do próprio autor.

a) Avaliação dos atributos químicos

Os atributos químicos do solo foram avaliados conforme os protocolos analíticos descritos por Raij *et al.*, (2001). Os valores de pH foram determinados potenciométricamente em suspensões de terra fina seca ao ar em solução de CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ na proporção solo-solução de 1:2,5. A matéria orgânica (MO) foi determinada após oxidação com $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ em presença de H_2SO_4 e titulação do excesso de dicromato com a solução de $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $0,4 \text{ mol L}^{-1}$. O alumínio trocável (Al^{+3}) foi extraído com $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ e depois titulado com NaOH - $0,025 \text{ mol L}^{-1}$. O cálcio (Ca^{+2}) e magnésio (Mg^{+2}) trocáveis extraídos por resina trocadora de íons e quantificados por espectrofotometria de absorção atômica (EAA, Modelo Varian SpectrAA-55B, Varian, CA, EUA). O potássio (K^+) trocável e o fósforo (P) extraídos também por resina, sendo o K^+ determinado por fotometria de chama e o P por colorimetria.

A acidez potencial ($\text{H}^+ + \text{Al}^{+3}$) foi estimada pelo método do pH SMP. O enxofre foi extraído por solução de $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ e posteriormente a medição da turbidez formada pela precipitação do sulfato pelo cloreto de bário, em colorimetria. Com esses resultados, foram calculadas a capacidade de troca de cátions (CTC) a pH 7,0 e a saturação por bases (V).

b) Teores disponíveis de micronutrientes no solo

Os teores disponíveis de Cu, Fe, Mn e Zn no solo foram obtidos por meio do extrator químico DTPA em pH 7,3 (ABREU *et al.*, 2001a), sendo procedida a determinação por EAA. O teor de B no solo foi avaliado por meio de extração com cloreto de bário, usando aquecimento com forno de micro-ondas e quantificado em espectrofotômetro UV-VIS (Modelo Varian Cary-50, Varian, Victoria, Australia) a 420 nm (ABREU *et al.*, 2001b).

5.5.2 Planta

a) Análises nutricionais, morfológicas, tecnológicas e produtividade

Aos 150 dias após o plantio, realizou-se a coleta de 20 folhas diagnose (folha +1) para a obtenção da área foliar (AF), efetuando as medidas em seu maior comprimento (C) e largura (L), aplicando a fórmula para a avaliação da área foliar $AF (m^2) = 0,75 \times L \times C$ (FRANCIS *et al.*, 1969), em todas as repetições. Nesse mesmo período, foram coletadas 10 folhas por unidade experimental, retirando os 20 cm centrais da folha + 1 (folha mais alta com colarinho visível - "TVD"), excluindo a nervura central (RAIJ, 2011) para, posteriormente, realizar as determinações dos teores de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn, conforme metodologia descrita por Malavolta *et al.* (1997).

Para a estimativa de produtividade da cana-de-açúcar, foram utilizados os parâmetros morfológicos, que são determinantes para a formação do potencial agrícola. Para tal, com o auxílio de uma fita métrica, foram realizadas medidas do comprimento do colmo (Cc, m) e a altura de planta desde a superfície do solo até a primeira folha visível. Para o número de perfilhos (Np, perfilhos por m), realizou-se a contagem individual dos colmos em vinte metros. Para o diâmetro de colmos (d, mm), considerou-se a medida do quinto entrenó, com o auxílio de um paquímetro graduado. O espaçamento entre os sulcos foi de 1,50 m (Figura 9).

Figura 9 - Coleta dos dados morfológicos para a estimativa da produtividade: diâmetro de colmos (a), altura de plantas (b), largura maior da folha (c) e comprimento maior da folha (d)



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A colheita do experimento (Figura 10) foi realizada mediante o corte manual em agosto de 2020, quando a cultura possuía nove meses de idade. A produtividade da cana-de-açúcar (TCH, $t\ ha^{-1}$), foi avaliada considerando o peso total dos colmos, na área útil, sendo colhidos apenas os três sulcos centrais de cada parcela. Dentro da área útil de cada unidade experimental, foram colhidos 10 colmos por metro, para realização das avaliações das características tecnológicas por meio da determinação do Brix% caldo, do açúcar total recuperável (ATR, $kg\ ha^{-1}$) e da percentagem de sacarose da cana (Pol, % cana), quantificados conforme o CONSECAN (2006). Também, foram calculados a produtividade de açúcar, em toneladas de açúcar por hectare (TAH, $t\ ha^{-1}$), mediante o produto do ART pelo TCH, dividido por 1000.

Figura 10 - Colheita da cultura da cana-de-açúcar aos nove meses após o plantio



Fonte: Elaboração do próprio autor.

5.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância sendo aplicado o teste F ($P \leq 0,05$) e, quando significativas, as médias foram agrupadas pelo teste de Scott-Knott ($P \leq 0,05$) para variáveis qualitativas e análise de regressão para os fatores quantitativos (doses de CLE). A análise estatística e a correlação por heatmap foram realizadas com auxílio dos programas AgroEstat (BARBOSA; MALDONADO JÚNIOR, 2015) e RStudio (R CORE TEAM, 2020).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO

Avaliando apenas o efeito da aplicação das doses de CLE (variando de 0 a 7,5 t ha⁻¹, base úmida) sobre os atributos do solo nas duas profundidades, observou-se que não houve influência para a MO, Al, K, S, B, Fe e Mn na camada superficial. Exceto para os teores de Zn, os demais atributos avaliados na camada subsuperficial, também não foram alterados em resposta às doses de CLE (Tabela 4). Por outro lado, pôde-se notar aumento linear para os atributos pH, SB, V, CTC, P, Ca, Mg e Cu, na profundidade de 0–25 cm.

Tabela 4 - Análise de regressão dos atributos químicos das amostras de solo coletadas após o cultivo da cana-de-açúcar, nas camadas 0–25 e 25–50 cm de profundidade, em função das doses de CLE (0,0; 2,5; 5,0 e 7,5 t ha⁻¹, base úmida)

Atributos	Profundidade (0–25 cm)			Profundidade (25–50 cm)		
	Equação	R ²	F	Equação	R ²	F
MO	$\hat{y} = 18,25$	-	ns	$\hat{y} = 12,69$	-	ns
pH	$\hat{y} = 0,460x + 5,602$	0,87	5,54*	$\hat{y} = 5,4$	-	ns
H+Al	$\hat{y} = 0,13x^2 - 1,245x + 16,137$	0,65	5,26*	$\hat{y} = 16,0$	-	ns
Al	$\hat{y} = 0,0$	-	ns	$\hat{y} = 0,0$	-	ns
SB	$\hat{y} = 4,341x + 34,815$	0,92	11,03**	$\hat{y} = 33,26$	-	ns
V	$\hat{y} = 1,600x + 70,375$	0,89	9,85*	$\hat{y} = 67,0$	-	ns
CTC	$\hat{y} = 4,071x + 50,140$	0,88	10,00*	$\hat{y} = 49,25$	-	ns
P	$\hat{y} = 9,575x + 0,500$	0,76	45,81**	$\hat{y} = 5,31$	-	ns
K	$\hat{y} = 1,66$	-	ns	$\hat{y} = 1,26$	-	ns
Ca	$\hat{y} = 3,110x + 22,775$	0,82	9,28*	$\hat{y} = 21,75$	-	ns
Mg	$\hat{y} = 1,200x + 10,500$	0,85	9,42*	$\hat{y} = 10,25$	-	ns
S	$\hat{y} = 3,75$	-	ns	$\hat{y} = 3,62$	-	ns
B	$\hat{y} = 0,15$	-	ns	$\hat{y} = 0,10$	-	ns
Cu	$\hat{y} = 0,131x + 0,778$	0,94	25,72**	$\hat{y} = 1,0$	-	ns
Fe	$\hat{y} = 37,94$	-	ns	$\hat{y} = 29,12$	-	ns
Mn	$\hat{y} = 11,92$	-	ns	$\hat{y} = 4,94$	-	ns
Zn	$\hat{y} = 0,426x + 0,502$	0,96	32,15**	$\hat{y} = 0,035x + 0,338$	0,89	8,08*

*, ** e ns: significativo a $P \leq 0,05$, $P \leq 0,01$ e não significativo, respectivamente. MO: Matéria orgânica. CTC: Capacidade de troca catiônica. SB: Soma de bases. V: Saturação por bases

Os teores de Zn em ambas as profundidades avaliadas também apresentaram incremento linear em função do aumento das doses de CLE (Tabela 3). Para essas variáveis, pode-se afirmar que a dose de 7,5 t ha⁻¹ (base úmida) seria recomendada para aplicação em viveiro de mudas de cana-de-açúcar. Entretanto, como os aumentos foram lineares, é possível que a aplicação de maiores quantidades de CLE

proporcionasse um incremento ainda maior desses atributos. Tal observação vai de encontro aos resultados apresentados no estudo realizado por Prates (2020). Conforme esse autor, em pesquisa realizada com o objetivo de avaliar doses de CLE (10, 15, 20 e 25 t ha⁻¹, base úmida) e dois modos de aplicação (área total e nas entrelinhas das culturas), em um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico, cultivado sucessivamente com a cultura da soja e do milho, foi verificado que as doses de 20,5 e 24,4 t ha⁻¹, proporcionaram os maiores incrementos nos atributos pH, SB, CTC e V.

Em relação aos tratamentos testados, notou-se haver maior quantidade de matéria orgânica (MO) na camada superficial (Figura 11a). Entretanto, não foi observado diferença entre os tratamentos em relação às quantidades de MO presente nas duas camadas avaliadas, indicando que o fertilizante orgânico associado ou não com os adubos minerais não influenciou na quantidade de MO acumulada após o cultivo de cana-de-açúcar no viveiro de mudas.

Mesmo não sendo notado diferença na camada 0–25 cm de profundidade, em alguns tratamentos, os teores de MO estavam em média 47% acima (16,3 a 20,8 g dm⁻³) da quantidade observada de MO antes da instalação do experimento (12,7 g dm⁻³) (Tabela 3). Esse incremento é muito relevante para o solo avaliado que possui textura arenosa e baixa quantidade de MO. Sabe-se que a MO pode promover o aumento nos teores de macro e micronutrientes, maior retenção de água e agregação do solo, diminuição da densidade do solo, além do fornecimento de energia para os microrganismos presentes no solo, contribuindo assim para ganhos de fertilidade das culturas (BONINI *et al.*, 2015; ARIF *et al.*, 2017; BAI *et al.*, 2018). Os efeitos benéficos do CLE no fornecimento de MO em solos arenosos cultivados com cana-de-açúcar também foram evidenciados por Oueriemmi *et al.* (2018).

Exceto para o tratamento controle (T1), verificou-se que os valores de pH diferiram entre as profundidades do solo, sendo notado maiores valores na camada superficial (Figura 11b). Verificou-se, também, que os valores médios de pH na camada de 0–25 cm profundidade variaram de 5,5 a 5,9, sendo os maiores valores de pH encontrados nos tratamentos T5, T6 e T8. Na camada subsuperficial (25–50 cm), os valores de pH variaram de 5,0 a 5,3, sendo notado menores valores de pH nos tratamentos T2, T9, T10 e T11.

Em pesquisa desenvolvida com o objetivo de avaliar os efeitos de aplicações de doses de CLE variando de 0 a 82 t ha⁻¹ (base seca), associado à aplicação de N e P, em um LATOSSOLO VERMELHO AMARELO cultivado com cana-de-açúcar (segunda e terceira soca), foi verificada alterações nos valores de pH apenas nas camadas superficiais (0–10 e 10–20 cm de profundidade), sendo que os valores de pH aumentaram com o incremento das doses de CLE até as doses de 35,6 t ha⁻¹, no qual foi notado uma variação de 4,4 a 5,8 (BRAGA, 2013).

Os valores de pH obtidos em função dos tratamentos e das profundidades, são superiores aos encontrados nas duas profundidades (0–25 cm = 5,2 e 25–50 cm = 5,1) das amostras de solo coletadas antes da instalação do experimento (Tabela 3). O pH influencia as reações do solo e, de maneira geral, valores entre 5,5 à 6,5 são favoráveis ao desenvolvimento da maior parte das plantas, incluindo a cana-de-açúcar. Os macronutrientes e o B, em valores de pH próximos a neutralidade, têm sua disponibilidade aumentada. Por outro lado, valores de pH inferiores a 5,5, podem favorecer a elevada atividade de elementos potencialmente fitotóxicos, como Al e Mn (SILVA, 2021).

De modo geral, a acidez potencial (H+Al) não foi influenciada pelos tratamentos, sendo observado menor valor desse atributo apenas no tratamento T8 (7,5 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC) na camada superficial em comparação com a camada 25–50 cm de profundidade (Figura 11c). Outros estudos também evidenciaram pouca influência do lodo de esgoto na acidez potencial em solos da região de Cerrado (RICCI *et al.*, 2010; BONINI *et al.*, 2015). Ainda assim, é possível notar que o valor da acidez potencial propiciado com o tratamento T8 (10,25 mmol_c dm⁻³), na camada superficial, é inferior ao valor (14,5 mmol_c dm⁻³) obtido nas amostras de solo coletadas antes da aplicação dos tratamentos (Tabela 3).

Os maiores valores da soma de bases (SB) foram observados nos tratamentos T5 e T8, ou seja, no qual foi aplicada a dose de 7,5 t ha⁻¹ de CLE e a dose de 7,5 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC, respectivamente (Figura 11d). Esse incremento se deve à adição de cátions trocáveis, principalmente de Ca e Mg, presentes na composição do CLE (Tabela 2). Em pesquisa realizada com objetivo de avaliar o efeito da utilização do lodo de esgoto e da adubação mineral na recuperação de atributos químicos de um LATOSSOLO VERMELHO degradado, foi observado que o lodo de esgoto influenciou positivamente no aumento da SB (BONINI *et al.*, 2015). Os valores da SB em um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico argiloso também

foram incrementados após duas aplicações de doses de CLE (5,0; 7,5; 10,0 e 12,5 t ha⁻¹, base úmida) – mesmo fertilizante orgânico avaliado na presente pesquisa (PRATES, 2020).

De modo similar ao observado para a SB, verificou-se que a capacidade de troca catiônica (CTC) diferiu em função dos tratamentos, sendo notado maiores valores desse atributo nos tratamentos T5 (7,5 t ha⁻¹ de CLE) e T8 (7,5 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC) na camada de 0–25 cm de profundidade (Figura 11e). Por outro lado, não houve diferença entre os tratamentos na camada de 25–50 cm de profundidade. Também, foi possível observar a diferença da CTC para os valores obtidos nas camadas superficiais e subsuperficiais nos tratamentos T5 e T8.

Conforme já mencionado, houve incremento linear nos valores de CTC na camada superficial em função do aumento das doses de CLE (Tabela 4). O aumento da CTC em função da aplicação de doses de CLE também foi reportado em outros estudos (OLIVEIRA *et al.*, 2002; BEZERRA *et al.*, 2006; SANTOS *et al.*, 2014; BONINI *et al.*, 2015). A utilização de resíduos orgânicos, em particular do lodo de esgoto que se caracteriza por altos teores de MO, promove o aumento da CTC dos solos (SANTOS *et al.*, 2014). Em solos tropicais, o aumento de cargas superficiais negativas é dependente do pH, tendo os coloides orgânicos como principal componente para aumentar a CTC e, conseqüentemente, elevar a retenção de cátions (ABREU *et al.*, 2001a).

Os teores médios de saturação por bases (V) na camada de 0–25 cm de profundidade variaram de (69 a 86%). Já na camada de 25–50 cm de profundidade, os valores de V variaram de (62 a 73%). Assim, exceto para os tratamentos T5 (7,5 t ha⁻¹ de CLE) e T8 (7,5 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC), não se constatou-se diferença nos valores de V para as duas profundidades (Figura 10f). Os maiores valores de V na camada superficial se devem ao fato de o CLE ter sido aplicado no sulco de plantio (~ 35 cm). Em relação aos tratamentos testados, exceto no tratamento controle absoluto (T1), observou-se incremento significativo no V na camada de 0–25 cm de profundidade. Novamente, os tratamentos T5 e T8 se destacaram, demonstrando que a dose de 7,5 t ha⁻¹ de CLE, com ou sem 50% da AMC, é capaz de aumentar o V do solo com valores maiores ao tratamento controle absoluto (T1) e similar ao tratamento com AMC (T2). Foi verificado também, aumento linear para o V na camada superficial em função do aumento das doses de CLE. Entretanto, não foi

verificado nenhum ajuste para os valores de V na camada subsuperficial, sendo encontrado valor médio de 67% (Tabela 4).

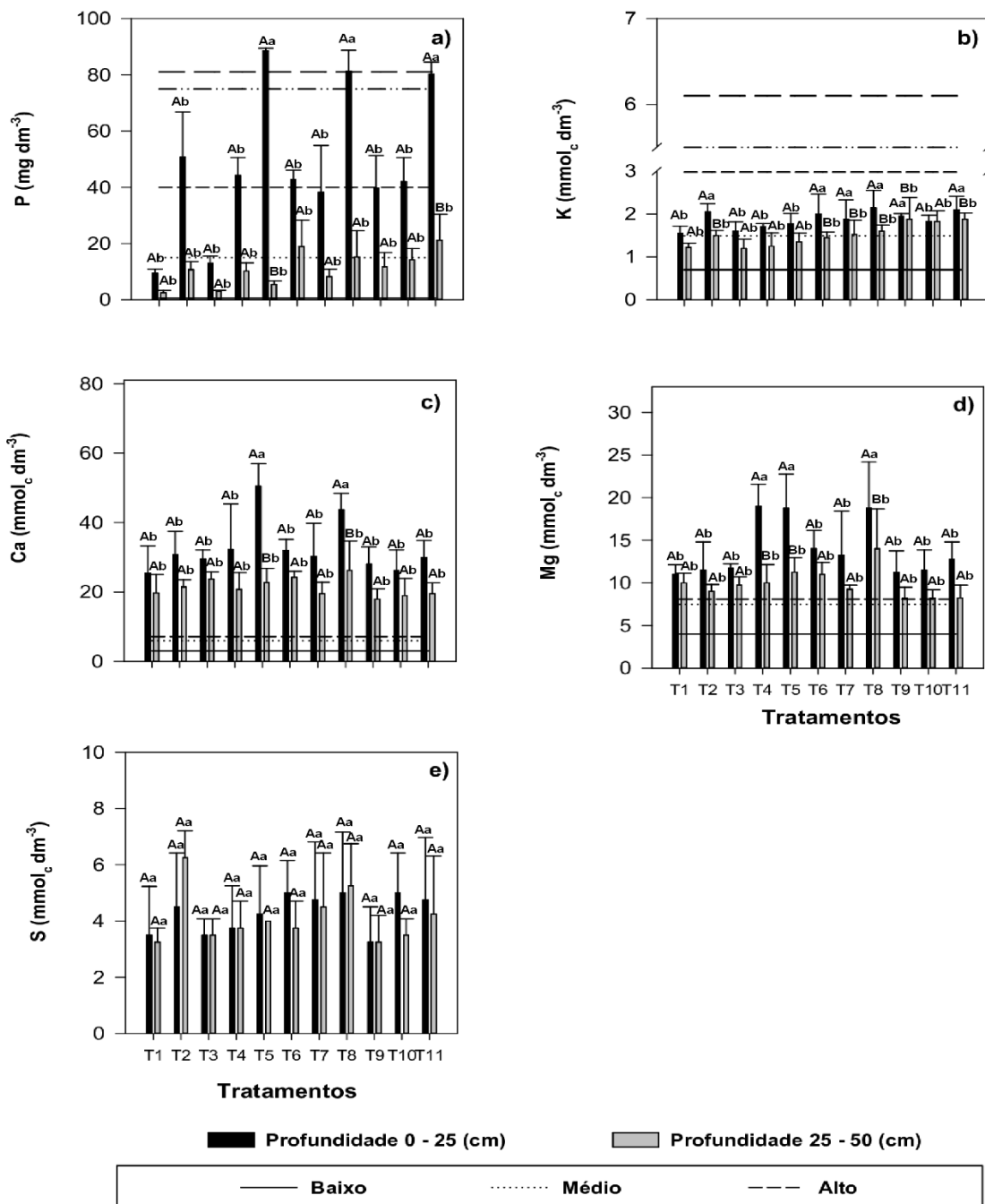
Os valores de V nas duas profundidades variaram de médio (63–69%) a alto (73–86%), conforme os limites de interpretação estabelecidos para solos do Estado de São Paulo (RAIJ *et al.*, 1997). Para o adequado desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar, é recomendado que o solo apresente V igual 60% (SPIRONELLO *et al.*, 1997). Nesse sentido, é possível notar que os valores de V antes da instalação do experimento (Tabela 3) e obtido no tratamento controle absoluto (T1) (Figura 10f), já eram considerados adequados. Contudo, salienta-se que para manter a fertilidade do solo nos viveiros de cana, é comum que sejam aplicados fertilizantes minerais objetivando repor os nutrientes extraídos e exportados no cultivo das plantas. Ademais, em solos de textura arenosa, com CTC a pH 7 menor que $40 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, em que a saturação por bases de 50% não seja suficiente para manter teores de Ca e Mg mínimos de 15 e $5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente, deve-se calcular a dose de calcário para $V = 70\%$, visando atingir esses teores mínimos de Ca e Mg no solo (SOUZA *et al.*, 2015).

No presente estudo, notou-se que a aplicação do CLE, associada ou não com a adubação mineral, contribui para o aumento dos teores de cátions trocáveis (K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+}) na CTC do solo, o que poderá contribuir significativamente para uma maior produtividade. Estudando o efeito residual da adubação com lodo de esgoto sobre a nutrição e a produção do girassol (*Helianthus annuus L.*), também foi verificado aumento no V em função do aumento das doses do composto orgânico (ALBUQUERQUE *et al.*, 2015).

6.2 MACRONUTRIENTES NO SOLO

Em relação aos teores médios de macronutrientes em função dos tratamentos testados, pôde-se notar variação de: P = $10\text{--}89 \text{ mg dm}^{-3}$; K = $1,6\text{--}2,1 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$; Ca = $26\text{--}51 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$; Mg = $11\text{--}19 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e S = $3\text{--}6 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na camada de 0–25 cm de profundidade e P = $3\text{--}21 \text{ mg dm}^{-3}$; K = $1,2\text{--}1,9 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$; Ca = $18\text{--}26 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$; Mg = $8\text{--}14 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e S = $3\text{--}6 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na camada de 25–50 cm de profundidade (Figura 11).

Figura 12 - Teores de fósforo (P) (a), potássio (K) (b), cálcio (Ca) (c), magnésio (Mg) (d) e enxofre (S) (e) nas amostras de solo coletadas após o cultivo da cana-de-açúcar, nas camadas 0–25 e 25–50 cm de profundidade, em função dos tratamentos: T1: controle absoluto – sem aplicação de composto de lodo de esgoto (CLE) e adubação mineral convencional (AMC); T2: 100% da AMC recomendada para a cana-de-açúcar; doses (t ha⁻¹, base úmida) de CLE = T3: 2,5; T4: 5,0; T5: 7,5; doses (t ha⁻¹, base úmida) de CLE + AMC com NPK (kg ha⁻¹) = T6: 2,5 + 50%; T7: 5,0 + 50%; T8: 7,5 + 50%; T9: 2,5 + 100%; T10: 5,0 + 100%; T11: 7,5 + 100%. Médias seguidas da mesma letra (maiúscula para profundidade e minúsculas para tratamentos) não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade (média ± DP, n = 4) As linhas representam os limites de interpretação estabelecidos por Raij *et al.* (1997) para solos do Estado de São Paulo, Brasil



Os teores de P na camada superficial aumentaram com a aplicação de 7,5 t ha⁻¹ de CLE (T5), 7,5 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC (T8) e 7,5 t ha⁻¹ de CLE + 100% AMC (T11). Ademais, os teores de P obtidos nesses tratamentos na camada superficial foram significativamente maiores do que os teores de P obtidos em subsuperfície.

Os teores de P nos demais tratamentos não variaram em função da profundidade ou da aplicação de CLE e/ou AMC. Com base nos limites de interpretação descritos por Raij *et al.* (1997), foi possível notar que os teores iniciais de P na camada de 0–25 cm (1,3 mg dm⁻³) e 25–50 cm (2,7 mg dm⁻³) de profundidade eram considerados muito baixos (0–6 mg dm⁻³) para cana-de-açúcar (Tabela 3).

Após o cultivo da cana, verificou-se que os teores médios de P na camada superficial foram considerados: baixo = 7–15 mg dm⁻³ (T1 e T3), médio = 16–40 mg dm⁻³ (T7 e T9), alto = 41–80 mg dm⁻³ (T2, T4, T6 e T10) e muito alto = > 80 mg dm⁻³ (T5, T8 e T11). Esses resultados demonstram que os tratamentos T5 (dose de 7,5 t ha⁻¹ de CLE), T8 (dose de 7,5 t ha⁻¹ de CLE, com aplicação de 50% da AMC) e T11 (7,5 t ha⁻¹ de CLE + 100% AMC) podem aumentar os teores de P no solo, com valores superiores aos observados nos tratamentos controle absoluto (T1) e AMC (T2). Para a camada subsuperficial, os teores de P variaram de: muito baixo (T1, T3 e T5), baixo (T2, T4, T7, T8, T9 e T10) e médio (T6 e T11) (Figura 12a).

O aumento dos teores de P no solo em função da aplicação do CLE, está relacionado ao teor de P presente no CLE (Tabela 2). O aumento no teor de P em função da alta quantidade presente no CLE também foi reportado por Braga (2013). De acordo com esse autor, após o processo de mineralização do material orgânico, haverá disponibilização do P orgânico no solo. Além disso, sabe-se que o aumento de MO advinda do CLE, pode contribuir para a menor adsorção (fixação) do P, principalmente, em solos tropicais altamente oxídicos. A MO promove a competição entre ânions orgânicos – humato, citrato, malato, oxalato etc. – e o H₂PO₄⁻ pelos mesmos sítios de fixação no solo, dessorvendo o P em virtude da menor retenção desse nutriente nos coloides minerais (p.e. oxidróxidos de Fe e Al). Pode haver também, formação de revestimentos húmicos protetores sobre os coloides minerais com diminuição na fixação pelos mesmos, além de formação de complexos e quelatos (BACKES *et al.*, 2013). Dessa forma, incrementos nos teores de P no solo por meio da aplicação de lodo de esgoto compostado ou não já foram reportados na literatura

(SANTOS *et al.*, 2013; ALBUQUERQUE *et al.*, 2015; OUERIEMMI *et al.*, 2018; PRATES, 2020).

Na camada superficial, notou-se que os maiores teores de K foram encontrados nos tratamentos T2, T6, T7, T8, T9 e T11. Já na camada subsuperficial, os maiores teores de K foram verificados nos tratamentos T8, T9, T10 e T11. Antes da instalação do experimento, foi observado o teor de $1,2 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ nas duas camadas avaliadas. Esse teor é considerado baixo ($0,8\text{--}1,5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) (RAIJ *et al.*, 1997) (Tabela 3). No presente estudo, as maiores doses de CLE associadas à AMC elevaram os teores de K no solo quando comparados aos teores iniciais. Porém, os teores de K ainda são considerados médios ($1,6\text{--}3,0 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) (RAIJ *et al.*, 1997) (Figura 12b). Os baixos teores de K no solo devem estar relacionados à menor quantidade desse nutriente no CLE (Tabela 2), perdas por lixiviação e extração pela cultura (ANDRADE *et al.*, 2021; MARQUES, 2021).

Os maiores teores de Ca foram obtidos com os tratamentos T5 e T8, ou seja, nas doses de $7,5 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE e $7,5 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE mais aplicação de 50% da AMC. Os teores de Ca na camada superficial e subsuperficial antes da instalação do experimento eram, respectivamente, $15,7$ e $17,3 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Esses teores são considerados altos ($> 7 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) (RAIJ *et al.*, 1997). Ainda assim, pôde-se notar aumento nos teores de Ca em todos os tratamentos quando comparados aos teores iniciais. Tal fato deve estar relacionado à aplicação do calcário no solo antes da instalação do experimento, visando a elevação do V e da quantidade de Ca presente no CLE (Tabela 2). O Ca contido no CLE tem origem na adição de calcário no processo de compostagem para fins de redução da acidez e diminuição de odores do composto orgânico.

Avaliando-se o efeito apenas das doses de CLE sobre os teores de Mg no solo, constatou-se aumento linear nos teores desse nutriente na camada superficial (Tabela 4). Porém, não houve efeito das doses de CLE na camada subsuperficial, sendo observado o teor médio de $10,25 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (Tabela 3). Os teores iniciais de Mg na camada de 0–25 cm era de $8,7 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e na camada 25–50 cm era de $10,7 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Esses teores são considerados altos para solos paulistas ($> 8 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) (RAIJ *et al.*, 1997). Contudo, verificou-se aumento nos teores de Mg no solo, principalmente, em relação aos tratamentos T5 e T8 (dose de $7,5$ e $5,0 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE com aplicação de 50 % da AMC). Os teores de Mg reportados nesses tratamentos foram superiores aos observados nos tratamentos controle absoluto (T1)

e AMC (T2) (Figura 12d). Em pesquisa realizada com o objetivo de avaliar o efeito do modo de aplicação (área total e entrelinha) e de doses CLE (5,0, 7,5, 10,0, e 12,5 t ha⁻¹, base úmida) como fertilizante no cultivo da soja em solo tropical inférteis, foi verificado aumento linear nos teores de Mg quando o CLE foi aplicado nas entrelinhas da cultura (PRATES, 2020). O CLE utilizado no presente trabalho possui alto teor de Mg (9,5 g kg⁻¹), tornando-o uma fonte alternativa desse nutriente para a cultura da cana. Entretanto, a composição do CLE pode variar de acordo com a origem dos materiais aproveitados no processo de compostagem, sendo necessário sempre sua avaliação visando manter o equilíbrio de bases trocáveis no solo para adequada nutrição da cana-de-açúcar.

Os teores de S variaram de 3 a 6 mg dm⁻³, não sendo observado diferença entre as profundidades e os tratamentos testados (Figura 12e). Os teores de S iniciais eram de 2,0 mg dm⁻³ permanecendo em teores baixos (0–4 mg dm⁻³) e médios (5–10 mg dm⁻³) no solo, mesmo após o cultivo da cana. De modo contrário ao verificado no presente estudo, Prates (2020) observou que todos os tratamentos com aplicação de CLE propiciaram aumento do teor de S disponível no solo em comparação aos tratamentos adicionais (controle absoluto e adubação mineral convencional). Além disso, após o cultivo da cultura da soja e do milho, notou-se maior teor de S na camada mais profunda (20–40 cm de profundidade).

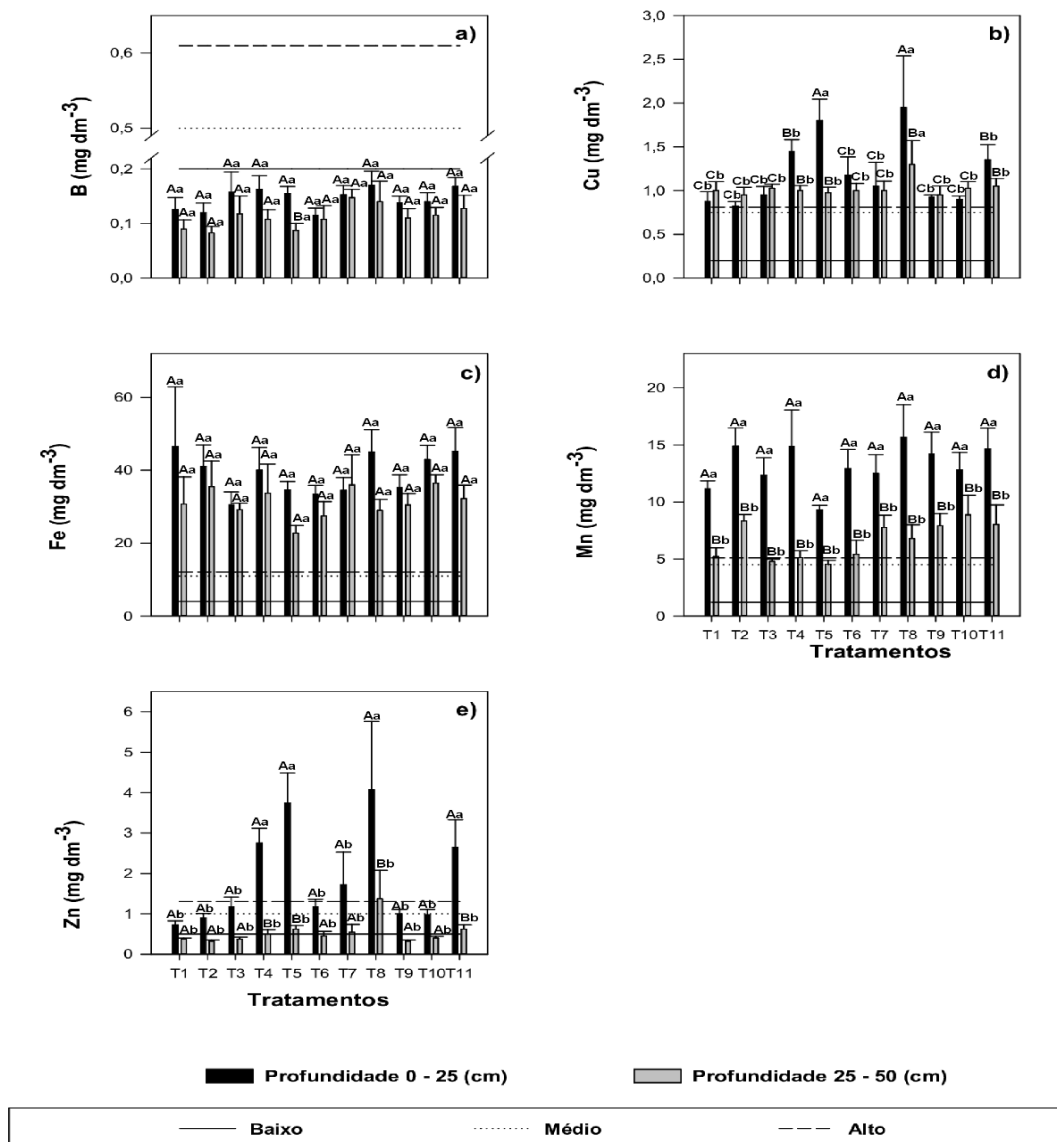
6.3 MICRONUTRIENTES NO SOLO

Os teores médios de micronutrientes variaram em função do elemento estudado, sendo: B = 0,12–0,17 mg dm⁻³; Fe = 30–46 mg dm⁻³; Mn = 9,3–15,7 mg dm⁻³; Cu = 0,8–1,9 mg dm⁻³ e Zn = 0,7–4,1 mg dm⁻³ na camada de 0–25 cm de profundidade e B = 0,08–0,15 mg dm⁻³; Fe = 23–36 mg dm⁻³; Mn = 4,6–8,9 mg dm⁻³; Cu = 0,9–1,3 mg dm⁻³ e Zn = 0,3–1,4 mg dm⁻³ na camada de 25–50 cm de profundidade (Figura 12).

Considerando os limites de interpretação estabelecidos para solos do Estado de São Paulo (RAIJ *et al.*, 1997), verificou-se que os teores de B nas duas profundidades eram considerados baixos (0–0,20 mg dm⁻³) antes da instalação do experimento (Tabela 3) e permaneceram baixos após a aplicação dos tratamentos e o cultivo da cana. De modo geral, solos arenosos possuem baixo teor de MO e elevada lixiviação de B, justificando a baixa concentração desse elemento no solo estudado.

Notou-se diferença apenas no tratamento com 7,5 t ha⁻¹ de CLE na camada de 25–50 cm, não sendo observado efeito significativo para os demais tratamentos (Figura 13a).

Figura 13 - Teores de boro (B) (a), cobre (Cu) (b), ferro (Fe) (c), manganês (Mn) (d) e zinco (Zn) (e) nas amostras de solo coletadas após o cultivo da cana-de-açúcar, nas camadas 0–25 e 25–50 cm de profundidade, em função dos tratamentos: T1: controle absoluto – sem aplicação de composto de lodo de esgoto (CLE) e adubação mineral convencional (AMC); T2: 100% da AMC recomendada para a cana-de-açúcar; doses (t ha⁻¹, base úmida) de CLE = T3: 2,5; T4: 5,0; T5: 7,5; doses (t ha⁻¹, base úmida) de CLE + AMC com NPK kg ha⁻¹) = T6: 2,5 + 50%; T7: 5,0 + 50%; T8: 7,5 + 50%; T9: 2,5 + 100%; T10: 5,0 + 100%; T11: 7,5 + 100%. Médias seguidas da mesma letra (maiúscula para profundidade e minúsculas para tratamentos) não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade (média ± DP, *n* = 4). As linhas representam os limites de interpretação estabelecidos por Raij *et al.* (1997) para solos do Estado de São Paulo, Brasil



Os teores iniciais de Cu e Fe no solo eram considerados altos de ($\text{Cu} = > 0,8 \text{ mg dm}^{-3}$ e $\text{Fe} = > 12 \text{ mg dm}^{-3}$) (Tabela 3) de acordo com o proposto por Raij *et al.* (1997). Na camada superficial, foi verificado maior teor de Cu nos tratamentos T5 e T8. Nestes mesmos tratamentos, pôde-se notar também, que os teores de Cu se mantiveram maiores na camada superficial quando comparado aos teores observados na camada subsuperficial (Figura 13b). Notou-se aumento nos teores disponíveis de Fe no solo antes da instalação do experimento nas camadas de 0–25 cm e 25–50 cm, no qual os teores passaram de 13 e 16 mg dm^{-3} para 30 e 46 mg dm^{-3} , respectivamente. Entretanto, não foi observado efeito significativo nos teores de Fe entre as adubações testadas e entre as camadas de solo coletadas (Figura 13c).

Não houve efeito dos tratamentos nos teores de Mn na camada superficial. Por outro lado, com base nos dados obtidos pelo agrupamento de médias foi possível observar que a partir de 2,5 t ha^{-1} de CLE + 50% da AMC até 7,5 t ha^{-1} de CLE + 100% da AMC, aumentou-se o teor de Mn na camada de 25–50 cm (Figura 13d).

Verificou-se, também, que os teores de Mn foram mais elevados na camada superficial quando comparado com os teores encontrados na camada subsuperficial. Os teores de Mn já eram considerados altos ($> 5,0 \text{ mg dm}^{-3}$) antes da instalação do experimento (Tabela 3) e permaneceram elevados nas duas profundidades após a aplicação dos tratamentos (RAIJ *et al.*, 1997). O Mn é o segundo micronutriente mais extraído do solo pela cultura da cana-de-açúcar. A deficiência de Mn pode ocasionar problemas à cultura canavieira, principalmente, baixa produtividade, uma vez que a adubação até 6,9 kg ha^{-1} pode aumentar o número de internódios e o diâmetro de colmo (BENETT *et al.*, 2011).

Na Figura 13e, foi possível verificar que o solo após o cultivo com uso de CLE, apresentou maiores teores de Zn em função da aplicação de 5,0 e 7,5 t ha^{-1} de CLE; 7,5 t ha^{-1} de CLE + 50 e 100% da AMC; com máximas em relação ao controle e demais tratamentos. O CLE possui alto teor de Zn em sua composição (Tabela 2). Este fato contribuiu efetivamente para a disponibilidade do nutriente no solo com a utilização a partir de 5,0 t ha^{-1} , associado ou não com a adubação mineral. Prates *et al.* (2020), em estudo testando doses e modos de aplicação do CLE nas culturas de soja e milho, também atribuíram o maior teor de Zn no solo em função do fornecimento do composto orgânico. Os maiores teores de Zn foram encontrados na camada superficial. Cabe ressaltar que os teores de Zn antes da implantação do estudo era de 0,6 mg

dm⁻³ nas duas profundidades (Tabela 3). Esse teor de Zn no solo é considerado médio (0,6–1,2 mg dm⁻³) (RAIJ *et al.*, 1997). Dessa forma, foi possível notar incremento nos teores de Zn passando para teor alto no solo (>1,2 mg dm⁻³) nos tratamentos T3, T4, T5, T7, T8 e T10 (Figura 13e). Esses resultados demonstram claramente que o CLE foi diretamente responsável por aumentar linearmente os teores de Zn no solo em ambas as profundidades estudadas (Tabela 4).

Os teores de B e Mn variaram pouco, independentemente da quantidade de MO presente no CLE. A disponibilidade destes micronutrientes no solo é afetada pela interação de vários fatores, como pH, MO, textura, umidade, potencial de oxirredução, interação com outros nutrientes, temperatura etc. (SILVEIRA *et al.*, 2003). Bezerra *et al.* (2006), ao estudarem a viabilidade da aplicação de doses de lodo (0,0; 2,8; 5,7; 11,4 e 22,8 t ha⁻¹, base seca), produzido pela Estação de Tratamento de Esgoto do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro (Etar-Apoio), na revegetação de uma área degradada, observaram que não houve incremento nos teores de Mn no solo. Os autores atribuem este comportamento em função das doses do composto orgânico ao aumento do pH, que neste caso impossibilitou a disponibilidade de maiores quantidades de Mn.

Silva *et al.* (2001), avaliando os efeitos da aplicação de 0, 20 e 40 t ha⁻¹ de lodo de esgoto, na presença e ausência de fertilizante mineral (NPK), em um ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico cultivado com cana-de-açúcar, também verificaram que o aumento do pH promoveu a diminuição do teor de Mn disponível e nenhuma influência nos teores de B, sendo atribuído ao fato do lodo de esgoto ter baixo teor deste micronutriente.

Com a aplicação de CLE foi observado incremento nos teores de Cu e Fe, comportamento já esperado, em consequência da afinidade desses elementos pela matéria orgânica do solo (SILVEIRA *et al.*, 2003; QIAO *et al.*, 2003). Em estudo realizado com o objetivo de avaliar o potencial agrônomo do CLE como fertilizante orgânico no cultivo da soja, foi verificado que as maiores doses do composto (variando de 7,5 a 12,5 t ha⁻¹), resultaram em maiores concentrações de B, Cu e Zn disponíveis no solo (PRATES *et al.*, 2020).

Os teores de Zn se ajustaram a um modelo de regressão linear crescente em ambas as profundidades do solo (Tabela 4). Tal fato pode estar relacionado ao aumento da CTC e da MO do solo, uma vez que há afinidade desse metal pelos sítios de troca das superfícies coloidais (NYAMANGARA, 1998). Em estudo realizado com

aplicação de 0, 20 e 40 t ha⁻¹ de lodo de esgoto, na presença e ausência de fertilizante mineral (NPK) na fertilidade de um ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, cultivado com cana-de-açúcar, também foi verificado aumento nos teores de Zn no solo (OLIVEIRA *et al.*, 2002). De acordo com esses autores, a elevada presença de Zn na composição do lodo foi o principal fator que promoveu o aumento nos teores de Zn no solo.

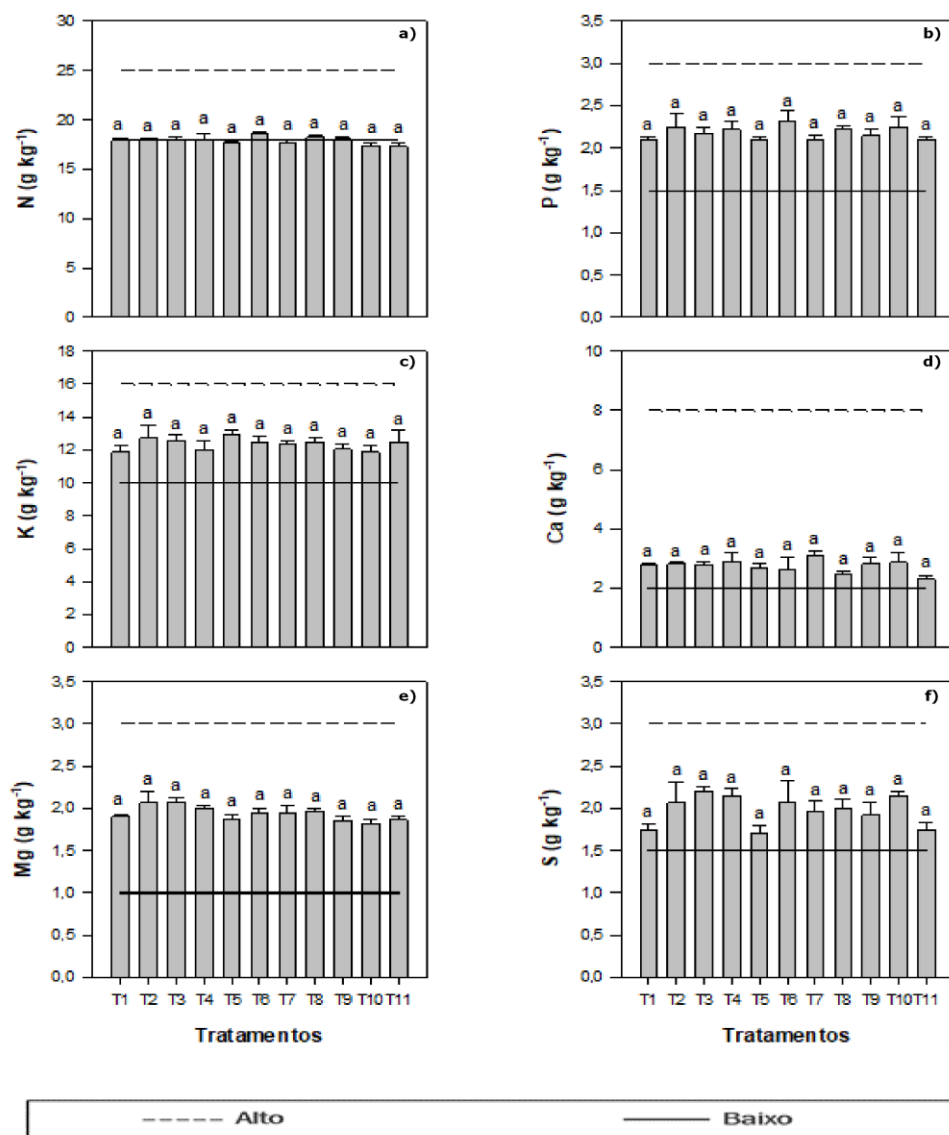
6.4 AVALIAÇÃO DA CULTURA

a) Teores de macronutrientes na folha diagnose

Os teores de N nas folhas não apresentaram diferença em função dos tratamentos estudados (Figura 14a). Exceto para os tratamentos T10 e T11, os teores de N nos demais tratamentos estavam dentro da faixa adequada para este nutriente (18 a 25 g kg⁻¹), de acordo com os limites de interpretação propostos por Raij (2011). Cabe ressaltar que, mesmo sendo considerados baixos, os teores N foliar nos tratamentos 10 e 11 estão muito próximos ao limite inferior da faixa de suficiência. Ademais, nesses tratamentos e nos demais não foram verificados sintomas visuais de deficiência de N. Chiba *et al.* (2009), estudando a aplicação de lodo de esgoto consorciado à adubação mineral em duas profundidades (0–20 e 20–40 cm) observaram diferença na absorção do nutriente na folha da cana-de-açúcar.

Os teores de P também não variaram em função dos tratamentos (Figura 14b). No entanto, todos os teores estavam dentro da faixa de interpretação (1,5 a 3,0 g kg⁻¹) estabelecido para a cultura da cana-de-açúcar (RAIJ, 2011). O mesmo ocorreu no estudo desenvolvido por Ferreira (2018), no qual este autor encontrou teores variando de 1,12 a 1,30 g kg⁻¹ na folha de cana-de-açúcar cultivada em um LATOSSOLO ARENOSO adubado com um organomineral a base de biossólido e bioestimulante. Souza *et al.* (2019), observaram que a aplicação de um fertilizante organomineral a base de lodo de esgoto, forneceu quantidades semelhantes de N, P e K para a cana-de-açúcar em comparação somente ao fertilizante mineral. Nesse estudo, os teores de P nas folhas variaram de 1,9 a 2,0 g kg⁻¹.

Figura 14 - Teor de N (a), P (b), K (c), Ca (d), Mg (e) e S (f) na folha diagnose da cultura da cana-de-açúcar, em função dos tratamentos: T1: controle absoluto – sem aplicação de composto de lodo de esgoto (CLE) e adubação mineral convencional (AMC); T2: 100% da AMC recomendada para a cana-de-açúcar; doses ($t\ ha^{-1}$, base úmida) de CLE = T3: 2,5; T4: 5,0; T5: 7,5; doses ($t\ ha^{-1}$, base úmida) de CLE + AMC com NPK $kg\ ha^{-1}$) = T6: 2,5 + 50%; T7: 5,0 + 50%; T8: 7,5 + 50%; T9: 2,5 + 100%; T10: 5,0 + 100%; T11: 7,5 + 100%. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade (média \pm DP, $n = 4$). As linhas representam a faixa de interpretação de teores de macronutrientes para a cultura da cana-de-açúcar conforme descrito em Raji (2011)



Não houve influência dos tratamentos nos teores K das folhas da cana-de-açúcar (Figura 14c). Ademais, todos os teores de K estiveram dentro dos limites de interpretação ($10,0$ a $16,0\ g\ kg^{-1}$) descritos para a cultura da cana-de-açúcar (RAIJ,

2011), demonstrando uma adequada nutrição da planta em relação a este nutriente. Giorgenon (2019), ao analisar o efeito da adubação com um fertilizante organomineral a base de biossólido, observou que os teores de K na folha da cana-de-açúcar foram muito semelhantes aos encontrados neste estudo, variando de 14,75 a 17,13 g kg⁻¹.

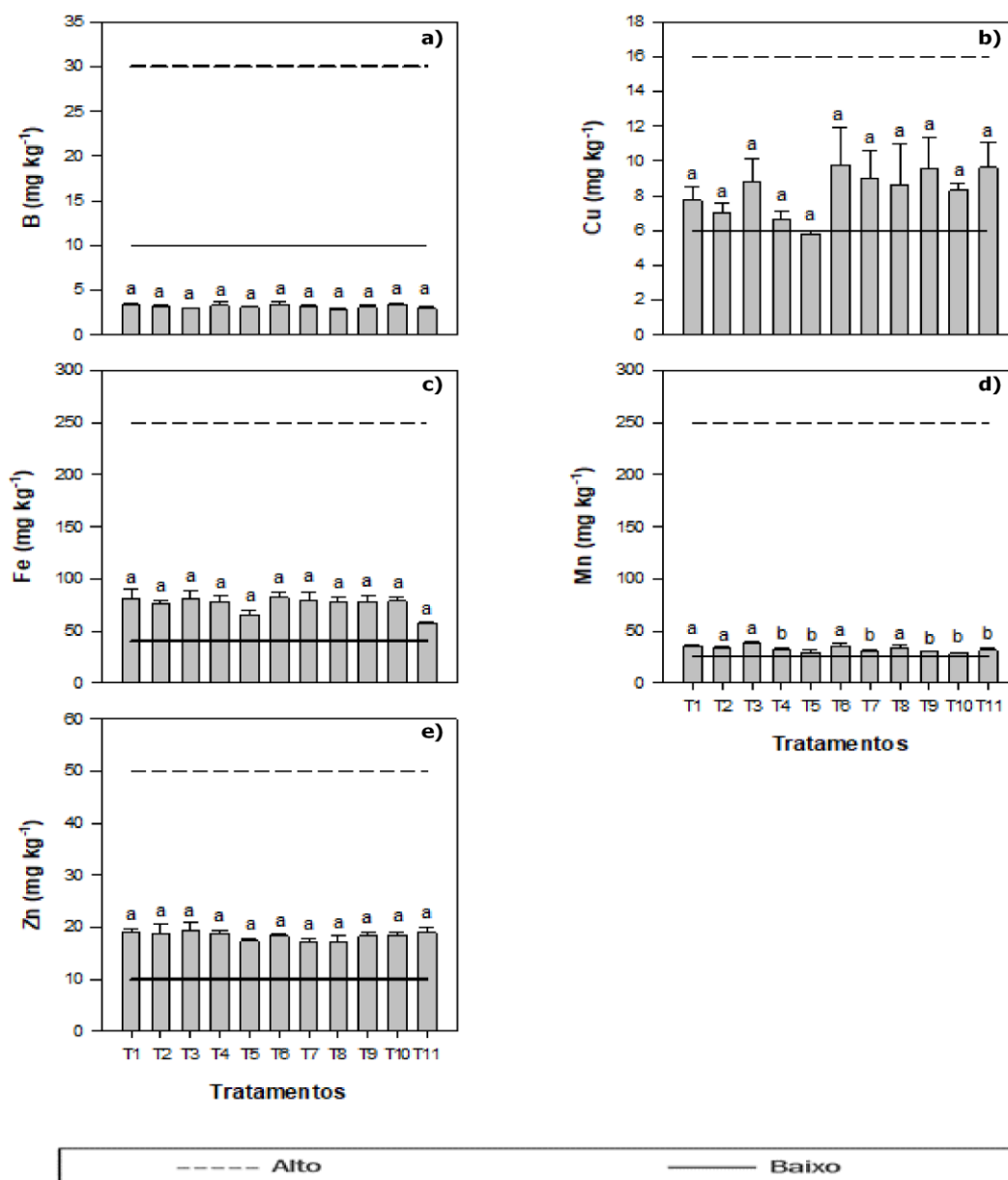
Apesar de não ter sido notado diferença entre os teores de Ca em resposta à aplicação do CLE, associado ou não com os fertilizantes minerais, verificou-se que os teores encontrados estavam dentro dos limites de interpretação (2,0 a 8,0 g kg⁻¹) deste nutriente para a cultura da cana-de-açúcar (RAIJ, 2011). De forma similar, os teores de Mg e de S não diferiram em função dos tratamentos avaliados (Figura 14e e 14f) e estavam dentro da faixa de interpretação segundo Raij (2011) (Mg = 1,0 a 3,0 g kg⁻¹ e S = 1,5 a 3,0 g kg⁻¹). Um bom fornecimento desses elementos é fundamental para o desenvolvimento da cana-de-açúcar, uma vez que a cultura é uma grande extratora desses nutrientes (OLIVEIRA *et al.*, 2010).

b) Teores de micronutrientes na folha diagnose

Observou-se que os teores de B não diferiram entre os tratamentos (Figura 15a). Além disso, os teores de B ficaram abaixo do limite inferior de interpretação (10 a 30 mg kg⁻¹) estabelecido por Raij (2011). Os menores teores de B na planta estão diretamente relacionados à baixa disponibilidade desse nutriente no solo (Tabela 3 e Figura 13a) e no CLE (Tabela 2). Apesar dos teores de B foliar estarem menores que 5 mg kg⁻¹, não foi evidenciado sintoma visual de deficiência deste nutriente nas plantas cultivadas em todos os tratamentos. Porém, sabe-se que mesmo sendo absorvidos em pequenas quantidades, esse elemento, tem papel fundamental para a sobrevivência das espécies vegetais, no crescimento do tubo polínico, nos processos de frutificação, no metabolismo do N e na atividade de hormônios (DECHEN *et al.*, 2018).

Na planta, o B atua no transporte de açúcares, já que o íon borato pode complexá-los. Esta propriedade indica que o B também participa do transporte de carboidratos das folhas para outros órgãos, função muito importante na cana-de-açúcar (ORLANDO FILHO; ROSSETTO; CASAGRANDE, 2001).

Figura 15 - Teores de B (a), Cu (b), Fe (c), Mn (d) e Zn (e) na folha diagnose da cultura da cana-de-açúcar, em função dos tratamentos: T1: controle absoluto – sem aplicação de composto de lodo de esgoto (CLE) e adubação mineral convencional (AMC); T2: 100% da AMC recomendada para a cana-de-açúcar; doses ($t\ ha^{-1}$, base úmida) de CLE = T3: 2,5; T4: 5,0; T5: 7,5; doses ($t\ ha^{-1}$, base úmida) de CLE + AMC com NPK $kg\ ha^{-1}$) = T6: 2,5 + 50%; T7: 5,0 + 50%; T8: 7,5 + 50%; T9: 2,5 + 100%; T10: 5,0 + 100%; T11: 7,5 + 100%. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade (média $\pm DP$, $n = 4$). As linhas representam a faixa de interpretação de teores de micronutrientes para a cultura da cana-de-açúcar conforme descrito em Raji (2011)



Apesar de haver variação entre os teores de Cu nas folhas, não foi notado diferença entre os tratamentos (Figura 15b). Exceto no tratamento que recebeu a aplicação de 2,5 t ha⁻¹ de CLE e 50% da AMC, os teores de Cu nos demais tratamentos estiveram dentro da faixa adequada para o Cu (6 a 16 mg kg⁻¹) segundo Raij (2011). Os teores de Fe nas folhas da cana-de-açúcar também não variaram entre os tratamentos (Figura 15c), sendo observado que em todos os tratamentos os teores de Fe estiveram acima do limite inferior (40 mg kg⁻¹) de interpretação para essa cultura (RAIJ, 2011).

Os teores foliares de Mn variaram entre os tratamentos (Figura 15d). Os tratamentos que receberam 7,5 t ha⁻¹ de CLE (T5), 2,5 e 7,5 t ha⁻¹ de CLE + 50% AMC (T6 e T8) e 2,5, 5,0 e 7,5 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC (T9, T10 e T11) apresentaram valores inferiores aos demais tratamentos. No entanto, apesar desta diferença, todos os teores de Mn estavam dentro da faixa adequada de nutrição para este elemento na cana-de-açúcar (25 a 250 mg kg⁻¹) (RAIJ, 2011). Já os teores foliares de Zn não foram influenciados pelos tratamentos (Figura 15e). No entanto, todos os teores estavam dentro dos limites de interpretação (10 a 50 mg kg⁻¹) proposto por Raij (2011).

Apesar de ter sido notado aumento nos teores de alguns micronutrientes no solo após a aplicação das doses do CLE (Figura 13), notou-se que as quantidades disponíveis desses elementos no solo, exceto para o B, foram suficientes para manter o estado nutricional da cana em níveis adequados. Estudos já demonstraram que o CLE, por possuir alguns micronutrientes (Cu, Mn, Fe e Zn) em sua composição, sendo capaz de suprir as quantidades necessárias desses nutrientes para a cultura da cana-de-açúcar (CINCINELLI *et al.*, 2012) e para cultura da soja (PRATES *et al.*, 2020). Por outro lado, pesquisa realizada em um LATOSSOLO VERMELHO AMARARELO Distrófico, testando doses (0 a 564 kg ha⁻¹) de um organomineral a base de lodo de esgoto e adubo mineral (470 kg ha⁻¹) foi verificado que teores de micronutrientes na cultura da cana-de-açúcar não foram influenciados no período avaliado de 150 a 270 dias após o plantio e tão pouco quando aplicado em cobertura (FERREIRA, 2018). Giorgenon (2019) também não constatou diferença entre os teores de micronutrientes na folha da cana-de-açúcar em reposta à aplicação de doses de um organomineral a base de biossólido.

No presente estudo, notou-se que os teores foliares dos micronutrientes seguiram a seguinte ordem: Fe > Mn > Zn > Cu > B. Tais resultados corroboram com

os encontrados por Silva (2017). Ainda segundo esse autor, os baixos teores foliares de micronutrientes na cana-de-açúcar cultivada nos Estados de Pernambuco e Paraíba (em três contextos geológicos: bacia ígneo-sedimentar, sedimentos argilo-arenosos e complexo gnaíssico-migmatítico), podem ter sido uma das razões para as produtividades baixas (média de 60 t ha⁻¹) das regiões estudadas. Nesse sentido, estudo relacionado à resposta da cana-de-açúcar a adubação com micronutrientes evidenciou um aumento de 17,6% na produção de colmos, demonstrando a importância de um bom fornecimento desses nutrientes para essa cultura (MELLIS; QUAGGIO, 2015).

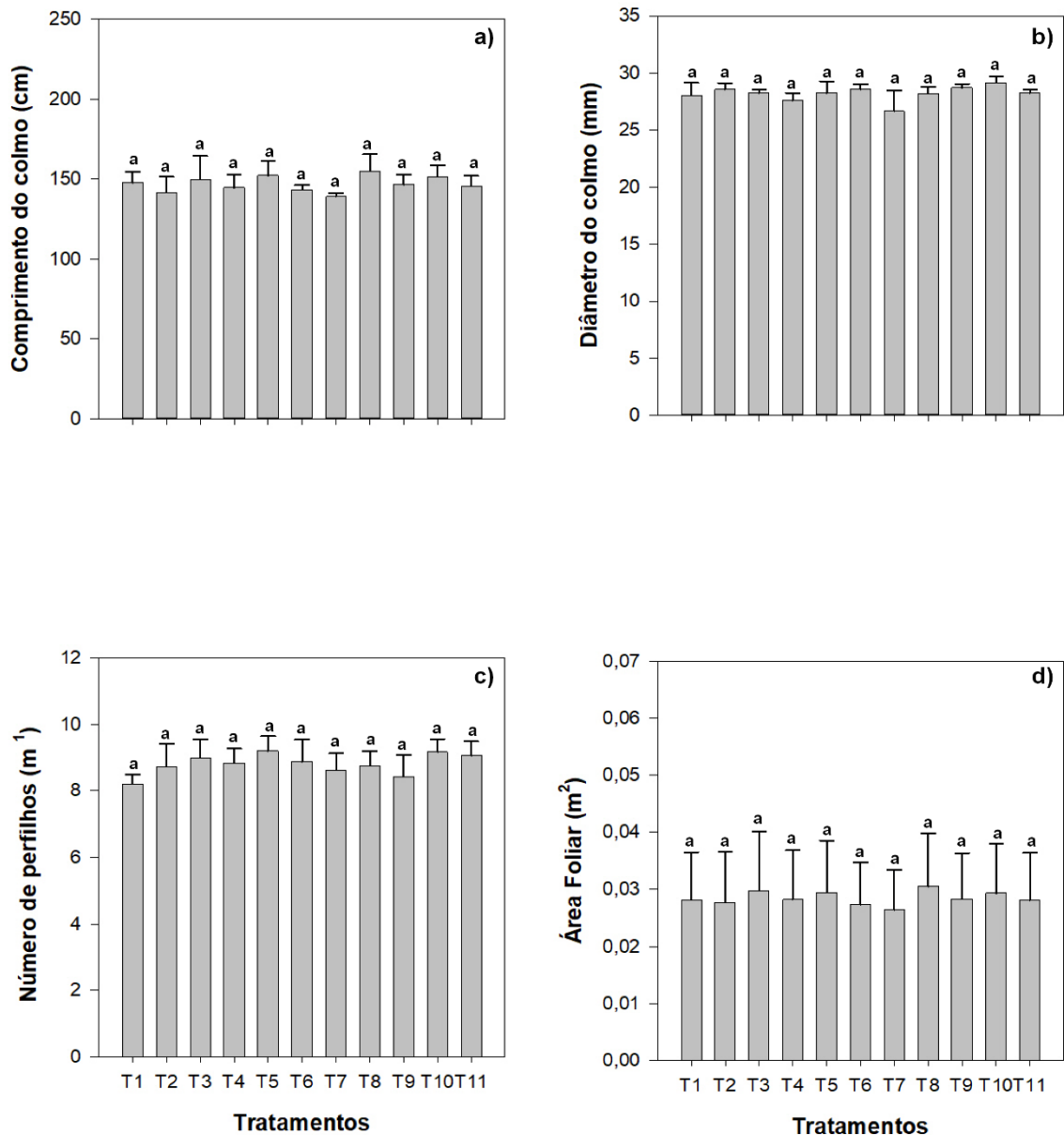
c) Variáveis morfológicas, qualidade tecnológica e produtividade da cultura

Não houve diferenças entre os tratamentos para o comprimento dos colmos (Figura 16a), sendo que os valores variaram de 139,2 a 154,9 cm. O mesmo comportamento foi mencionado por Ataíde *et al.* (2019). Esses autores estudaram o desenvolvimento vegetativo e biométrico em mudas de quatro variedades (CTC933094, CTC1007, RB002506 e RB867515) de cana-de-açúcar em resposta a formulação de substratos a base de resíduos orgânicos da indústria sucroenergética e adubação mineral (N = 20 kg ha⁻¹, P₂O₅ = 120 kg ha⁻¹ e K₂O = 140 kg ha⁻¹).

Notou-se que não há efeito dos tratamentos no diâmetro de colmos (Figura 16b) avaliados aos 150 dias após o plantio, sendo verificado uma variação de 26,1 a 29,1 mm. Também foi observado que não houve efeito dos tratamentos na altura das plantas, sendo encontrado valores variando de 139,1 a 154,8 cm. Noronha (2018), avaliando o plantio de mudas de cana-de-açúcar no sistema de manejo em um LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico, não observou diferenças entre o diâmetro do colmo e altura das plantas. Souza *et al.* (2020) também não encontrou efeito significativo na utilização de bio sólidos associados ou não a adubação mineral em relação a altura e diâmetro das plantas.

O número de perfilhos também não diferiu entre os tratamentos, sendo encontrado valores variando de 8,2 a 9,2 perfilhos por metro no período de avaliação, ou seja, 150 dias após o plantio (Figura 16c). Santos *et al.* (2020), avaliando o perfilhamento em quatro variedades de cana-de-açúcar (CTC 2, RB867515, RB92579 e CTC 4) também não observaram incremento para essa variável, porém os valores variam de 17,0 a 18,8 perfilhos por metro, para a variedade RB867515.

Figura 16 - Comprimento do colmo (a), diâmetro de colmos (b), número de perfilhos (c), área foliar (d) em função dos tratamentos: T1: controle absoluto – sem aplicação de composto de lodo de esgoto (CLE) e adubação mineral convencional (AMC); T2: 100% da AMC recomendada para a cana-de-açúcar; doses (t ha⁻¹, base úmida) de CLE = T3: 2,5; T4: 5,0; T5: 7,5; doses (t ha⁻¹, base úmida) de CLE + AMC com NPK kg ha⁻¹) = T6: 2,5 + 50%; T7: 5,0 + 50%; T8: 7,5 + 50%; T9: 2,5 + 100%; T10: 5,0 + 100%; T11: 7,5 + 100%. Médias seguidas da mesma letra) não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade (média ± DP, *n* = 4)



A área foliar (AF) também não diferiu entre os tratamentos, sendo notado valores variando de 0,049 a 0,052 m² (Figura 16d). Bozza e Marchiori (2020), avaliando a utilização do LE associado a adubação mineral, estudando a mesma

variedade de cana, em um período de até 122 dias após o plantio, encontrou pequena diferença em relação à área foliar. No entanto, os autores observaram que os melhores resultados foram encontrados no tratamento com adubação mineral.

Não houve efeito dos tratamentos na qualidade tecnológica sendo que o Brix caldo variou de 21,9 a 22,4% (Figura 17a), o ATR variou de 158,2 a 161,5 kg ha⁻¹ (Figura 17b) e o Pol cana variou de 19,1 a 19,5% (Figura 17c). A variação da temperatura e a precipitação pluviométrica (Figura 2) podem ter ocasionado a maior concentração do ATR em todos os tratamentos, não sendo possível observar as diferenças dos efeitos do CLE e adubação mineral testados nos tratamentos.

Estudos relatam que temperaturas médias diárias de 30 °C é o ideal para o desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar, além da adequada precipitação pluvial e na época pré-colheita onde se inicia a maturação e posteriormente a colheita a temperatura deverá ser mais baixa, em torno de 10 a 20 °C. Por outro lado, se a temperatura estiver acima de 38 °C haverá a redução da fotossíntese e aumento da respiração. Para o amadurecimento, temperaturas relativamente baixas em uma faixa de 12 a 14 °C são desejáveis, visto terem influência notável na redução do crescimento vegetativo e elevação no teor de sacarose (FARIAS, 2006; DIOLA; SANTOS, 2010; MOURA *et al.*, 2014).

Os rendimentos de TAH (Figura 17d) expressaram valores significativos, que variaram de 7,6 a 16,7 t ha⁻¹. O tratamento T7 (5,0 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC) obteve a melhor produtividade de açúcar 16,7 t ha⁻¹. Os tratamentos T3 (2,5 t ha⁻¹ de CLE) e T5 (7,5 t ha⁻¹ de CLE), apresentaram produtividades de 14,7 e 15,7 t ha⁻¹, respectivamente. O efeito referente às diferenças observadas, pode estar relacionado à variação da produtividade cana por hectare (Figura 18), já que não foram verificadas diferenças para o ATR (Figura 17b). Menezes e Rezende (2016), estudando a influência da TCH, ATR e TAH em diferentes épocas de plantio utilizando duas variedades (RB92579 e RB962962) de cana-de-açúcar, encontraram comportamento semelhantes para TAH, no qual os valores variaram de 18,86 e 24,76 t ha⁻¹, enquanto os valores para o ATR variaram de 139,25 a 144,14 kg ha⁻¹, não sendo significativos.

A produtividade média dos colmos por hectare (TCH) variou de 47,8 a 103,8 t ha⁻¹ (Figura 18). No tratamento T8 (7,5 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC), foi verificado o maior valor de produtividade, sendo notado um incremento de 20,5% em relação ao tratamento T2 (100% de AMC) e um incremento de e 53,9% em relação ao tratamento controle T1 (0 t ha⁻¹ de CLE + 0% de AMC). Observou-se, também, que os tratamentos

T4 (5,0 t ha⁻¹ de CLE) e T6 (2,5 t ha⁻¹ associado a 50% de AMC), também apresentaram valores de produtividades similares ao tratamento T8, demonstrando que o CLE associado ou não à AMC pode ser uma alternativa interessante para a adubação da cultura da cana-de-açúcar. Caetano *et al.* (2018) também relataram que houve aumento da produtividade na cultura da cana-de-açúcar, variedade RB 867515, cultivada em LATOSSOLO VERMELHO AMARELO em função da aplicação de doses de lodo de esgoto variando de 6,4 a 19,2 t ha⁻¹.

Figura 17 - Brix% caldo (a), açúcar total recuperável (ATR) (b), porcentagem de sacarose da cana (Pol% cana) (c) e produtividade de açúcar em toneladas de açúcar por hectare (TAH) (d), em função dos tratamentos: T1: controle absoluto – sem aplicação de composto de lodo de esgoto (CLE) e adubação mineral convencional (AMC); T2: 100% da AMC recomendada para a cana-de-açúcar; doses (t ha⁻¹, base úmida) de CLE = T3: 2,5; T4: 5,0; T5: 7,5; doses (t ha⁻¹, base úmida) de CLE + AMC com NPK kg ha⁻¹) = T6: 2,5 + 50%; T7: 5,0 + 50%; T8: 7,5 + 50%; T9: 2,5 + 100%; T10: 5,0 + 100%; T11: 7,5 + 100%. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade (média ± DP, n = 4)

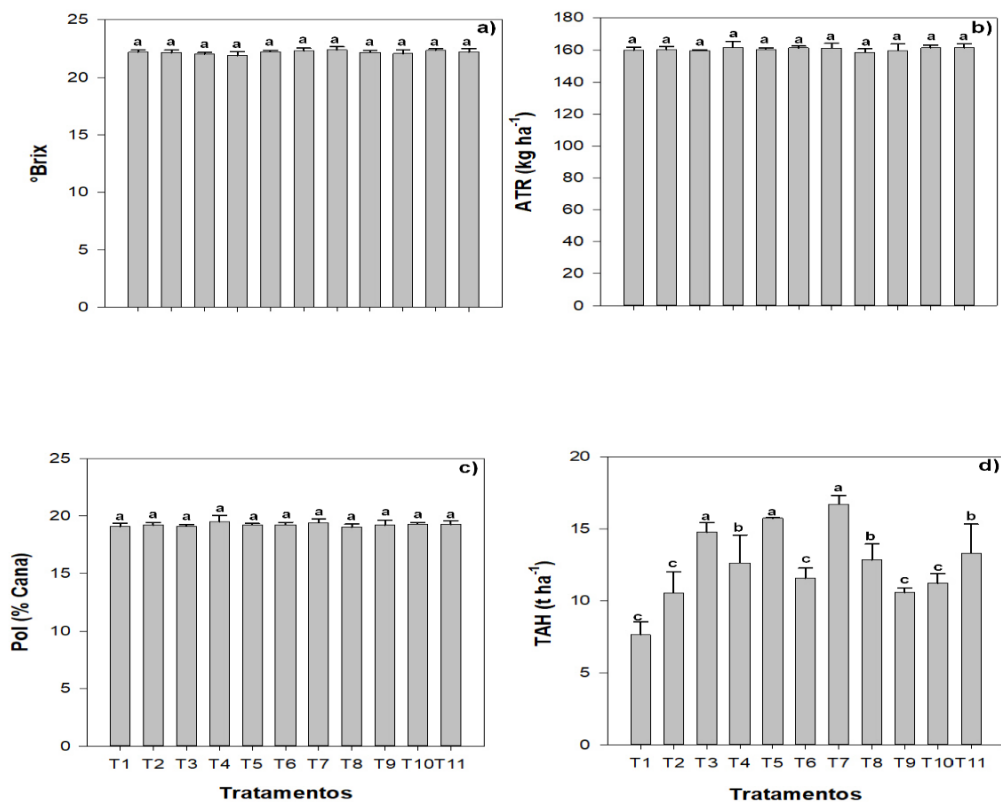
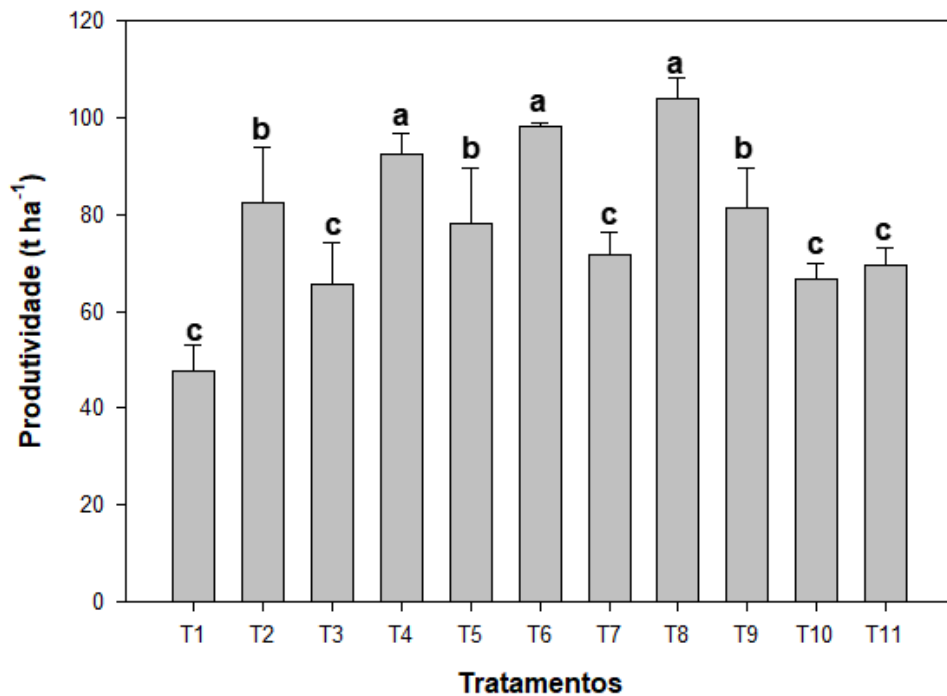


Figura 18 - Produtividade de cana-de-açúcar em toneladas de colmos por hectare (TCH), em função dos tratamentos:), em função dos tratamentos testados: T1: controle absoluto – sem aplicação de composto de lodo de esgoto (CLE) e adubação mineral convencional (AMC); T2: 100% da AMC recomendada para a cana-de-açúcar; doses ($t\ ha^{-1}$, base úmida) de CLE = T3: 2,5; T4: 5,0; T5: 7,5; doses ($t\ ha^{-1}$, base úmida) de CLE + AMC com NPK $kg\ ha^{-1}$) = T6: 2,5 + 50%; T7: 5,0 + 50%; T8: 7,5 + 50%; T9: 2,5 + 100%; T10: 5,0 + 100%; T11: 7,5 + 100%. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade (média \pm DP, $n = 4$)



Notou-se que o aporte de macro e micronutrientes por meio da utilização das doses de CLE (Figuras 11 e 12), contribuiu significativamente para o incremento da produtividade da cana (Figura 18). Diversos autores já evidenciaram que a utilização do LE (compostado ou não) na agricultura pode promover melhores condições para o desenvolvimento das plantas com ganhos de produtividade (NOGUEIRA *et al.*, 2013; MENEZES, 2017; KNOPIK *et al.*, 2018; ALONZO, 2018, PRATES *et al.*, 2020).

Levando-se em consideração apenas o efeito da aplicação das doses do CLE variando de 0 a $7,5\ t\ ha^{-1}$ sobre os parâmetros de desenvolvimento, da qualidade tecnológica e da produtividade da cultura da cana-de-açúcar, é possível notar que não houve alteração na área foliar e nos valores Brix% cana, ATR e Pol% cana. Por outro lado, pôde-se observar ajuste quadrático para TCH e TAH, no qual a dose de $5,6\ t\ ha^{-1}$ de CLE, proporcionou os maiores valores de TCH ($92\ t\ ha^{-1}$) e TAH ($14\ t\ ha^{-1}$).

Tabela 5 - Análise de regressão das variáveis área foliar, produtividade de cana-de-açúcar em toneladas de colmos por hectare (TCH), açúcar total recuperável (ATR), produtividade de açúcar em toneladas de açúcar por hectare (TAH), porcentagem de sacarose da cana (Pol% cana) e Brix% caldo, em função das doses de CLE (0,0; 2,5; 5,0 e 7,5 t ha⁻¹, base úmida) aplicadas

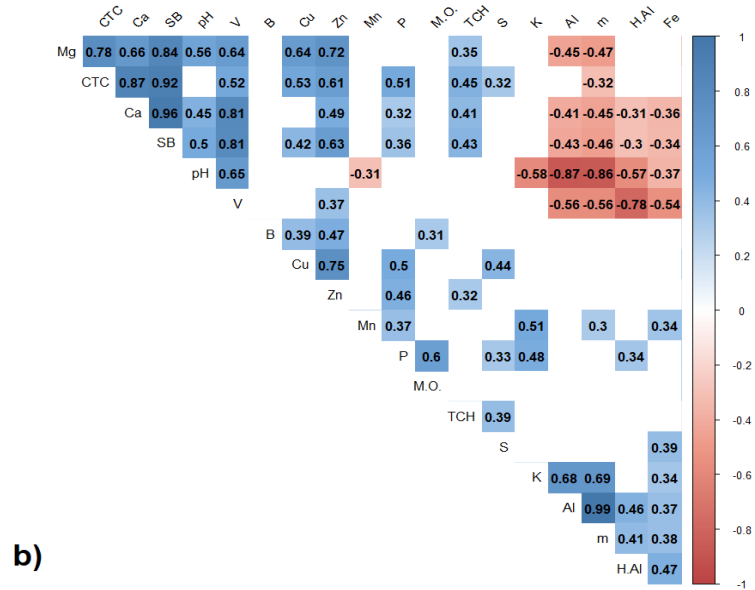
Variáveis	Equação	R ²	Teste F
Área foliar	$\hat{y} = 0,05$	0,96	2,80 ^{ns}
TCH	$\hat{y} = - 1,283x^2 + 14,35x + 45,32$	0,52	7,15 ^{**}
ATR	$\hat{y} = 160,67$	0,91	0,41 ^{ns}
TAH	$\hat{y} = - 0,200x^2 + 2,27x + 7,26$	0,51	6,69 ^{**}
Pol% cana	$\hat{y} = 19,25$	0,80	0,38 ^{ns}
Brix% caldo	$\hat{y} = 22,05$	0,99	0,01 ^{ns}

** e ^{ns}: significativo a $P \leq 0,01$ e não significativo, respectivamente.

No presente estudo, verificou-se que a aplicação do CLE associado ou não a adubação mineral aumentou a CTC (Figura 11 e) e os teores de Ca no solo (Figura 12c). Nesse sentido, é possível verificar correlação positiva ($r = 0,97$) entre essas variáveis, evidenciando que a aplicação do CLE de fato pode aumentar os teores de Ca na camada superficial do solo, promovendo o incremento da CTC (Figura 19a). O efeito da correlação positiva da CTC também pôde ser observado com Mg ($r = 0,92$), SB ($r = 0,99$); P ($r = 0,74$), Cu ($r = 0,71$) e Zn ($r = 0,74$) (Figura 19a).

As correlações positivas para o teor de Zn no solo (Figura 19a e 19b), podem ser um grande indicativo que o CLE pode promover o incremento deste nutriente no solo. Sabe-se que este nutriente contribui significativamente na produtividade final da cultura da cana-de-açúcar (NAVARRETE *et al.*, 2017).

Comparando os teores de P antes (média de 2,7 mg dm⁻³) e após (média de 50,3 mg d⁻³) a instalação do experimento, notou-se um aumento expressivo de até 18,6 vezes. Isso também demonstra o potencial do CLE no fornecimento de P ao solo. A correlação positiva dos teores de P (Figura 19a) com outras atributos do solo, demonstra o quanto o fornecimento de nutriente via CLE (doses acima de 5,0 a 7,5 t ha⁻¹ de CLE) associadas ou não a adubação mineral proporcionou melhores produtividades (Figura 18). Todo esse benefício está relacionado ao efeito do P no enraizamento, perfilhamento e absorção de outros nutrientes que são favorecidos pelo fornecimento adequado do nutriente (NICCHIO *et al.*, 2019).



Na camada de 0–25 cm de profundidade, foi possível notar que os principais nutrientes do solo que influenciaram na produtividade da cana foram Ca, Mg, K, Cu, Mn e Zn (Figura 19a). Na já camada subsuperficial, o teor de Ca, Mg, S e Zn apresentaram correlação positiva com a produtividade da cana (Figura 19b).

Também, destaca-se que a aplicação do CLE associada ou não à AMC, proporcionou uma correlação negativa entre o teor de pH e Fe, ou seja, o aumento do pH no solo promoveu redução dos teores de Fe do solo. A menor disponibilidade de Fe no solo em função do aumento dos valores de pH já é bastante conhecida na literatura (CAMARGO *et al.*, 1982).

A correlação negativa também pode ser vista com a acidez potencial, alumínio trocável e na saturação de alumínio. Esse comportamento expressa que as doses CLE pode favorecer o incremento dos teores de pH no solo, o que dará maiores condições para o desenvolvimento radicular e, conseqüentemente, maiores condições de absorção de nutrientes. Santos (2021), estudou o efeito da adubação orgânica oriunda de compostagem de resíduos, variando doses de 0 a 40 t ha⁻¹ em LATOSSOLO VERMELHO, sendo possível observar uma redução da acidez total (H+Al), da acidez trocável (Al³⁺) e da acidez ativa (pH).

Na profundidade de 25–50 cm (Figura 19b), observou-se haver uma correlação positiva entre os teores de Ca para Mg ($r = 0,66$), CTC ($r = 0,86$) e SB ($r = 0,96$). Do mesmo modo, observou-se também a maior correlação negativa dos teores de pH para Al³⁺ ($r = 0,87$) e m ($r = 0,86$).

Foi avaliado também a correlação de Pearson para as análises morfológicas,

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As doses de CLE não alteraram significativamente as quantidades de matéria orgânica nas duas profundidades. Por outro lado, pôde-se observar o aumento dos teores de CTC no solo, principalmente na camada superficial. As doses de CLE a partir de 5,0 t ha⁻¹ (base úmida), associado ou não com aplicação de 50% da AMC, proporcionaram os maiores valores de pH, SB, P, K, Ca, Mg, Cu e Zn na camada superficial e incrementaram os teores de Zn na camada subsuperficial. Exceto para os teores de Zn, não foi observado alterações nos atributos químicos do solo na camada 25–50 cm de profundidade em função do incremento de doses de CLE.

As doses de CLE associadas à adubação mineral não influenciaram os teores foliares de macro e micronutrientes. Porém, exceto para o B, notou-se haver adequado estado nutricional da cultura.

As variáveis morfológicas (comprimento dos colmos, diâmetro de colmos, altura da planta, área foliar e número de perfilhos) não foram influenciadas pela aplicação das doses de CLE. O mesmo comportamento foi observado para as variáveis tecnológicas (Brix% cana, ATR e Pol% cana). Todavia, quando foi aplicado 7,5 t ha⁻¹ de CLE (base úmida) associado a 50% AMC, pôde-se notar maior valor na produtividade de TAH (16,7 t ha⁻¹).

Nos tratamentos que receberam a aplicação de 5,0 t ha⁻¹ de CLE (base úmida), 2,5 t ha⁻¹ de CLE (base úmida) + 50% AMC com NPK kg ha⁻¹ e 7,5 t ha⁻¹ de CLE (base úmida) + 50% AMC com NPK kg ha⁻¹, verificou-se os maiores ganhos de produtividade de colmos, superando os valores obtidos apenas com a aplicação de 100% da adubação mineral convencional.

Conclui-se que o uso do CLE como fertilizante orgânico em viveiros de cana-de-açúcar, contribui para a melhoria da fertilidade do solo e para o aumento da produtividade, podendo propiciar redução das quantidades fornecidas de fertilizantes minerais, além de ser uma alternativa viável e mais sustentável na disposição final do lodo de esgoto.

REFERÊNCIAS

- ABREU, C. A.; ABREU, M. F.; ANDRADE, J. C. Determinação de cobre, ferro, manganês, zinco, cádmio, cromo, níquel e chumbo em solos usando a solução de DTPA em pH 7,3. In: RAIJ, B. van; ANDRANDE, J. C.; CANTARELLA, H.; GUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. p. 231–239.
- ALBUQUERQUE, H. C.; ZUBA JUNIO, G. R.; SAMPAIO, R. A.; FERNANDES, L. A.; ZONTA, E.; BARBOSA, C. F. Yield and nutrition of sunflower fertilized with sewage sludge. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 6, p. 553–559, 2015.
- ALVES, A. S. **Adubação orgânica e manutenção da palhada na cana-de-açúcar: efeitos na volatilização de amônia, parâmetros químicos e físicos do solo e produtividade**. 2020. 54 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Animal). Universidade Federal do Maranhão, Chapadinha, 2020.
- ANDRADE, A. F.; FLORES, R. A.; CASAROLI, D.; BUENO, A. M.; PESSOA-DE-SOUZA, M. A.; JARDIM, C. C. S.; ABDALA, K. O. A.; MARQUES, E. P.; MESQUITA, M. Biometric and Physiological Relationships and Yield of Sugarcane in Relation to Soil Application of Potassium. **Sugar Tech**, [s. l.], p. 1-12, 2021.
- ARIF, M.; ILYAS, M.; RIAZ M.; ALI, K.; SHAH, K.; HAQ, I. U.; FAHAD S. Biochar improves phosphorus use efficiency of organic-inorganic fertilizers, maize-wheat productivity and soil quality in a low fertility alkaline soil. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 214, p. 25-37, 2017.
- Associação Rural dos Fornecedores e Plantadores de Cana da Média Sorocabana - ASSOCANA. **Características agrotécnicas e manejo varietal da cana de açúcar**. Disponível em: http://www.assocana.com.br/arquivos/upload/files/documentos/variedades_2020.pdf. Acesso em: 10 abr. 2021.
- ATAIDE, L. S. C.; PEREIRA, M. J.; SILVA, C. J. C.; MONTE, I. R.; SANTOS, R. L. Avaliação biométrica da cana-de-açúcar em sistema de mudas pré-brotadas (MPB) biometric evaluation of sugar cane in pre-browned muds system (MPB). In: CONGRESSO INTERNACIONAL DAS CIÊNCIAS AGRÁRIAS - COINTER – PDV-Agro, 4., 2019. **Anais [...]** [S. l.]: COINTE, 2019.
- BAI, Z.; CASPARI, T.; GONZALEZ, M. R.; BATJES, N. H.; MÄDER, P.; BÜNEMANN, E. K.; GOEDE, R.; BRUSSAARD, L.; XU, M.; FERREIRA, C. S. S.; REINTAM, E.; FAN, H.; MIHELIČ, R.; GLAVAN, M.; TÓTH, Z. Effects of agricultural management practices on soil quality: A review of long-term experiments for Europe and China. **Agriculture, ecosystems & environment**, Amsterdam, v. 265, p. 1-7, 2018.
- BALAGANESH, P.; VASUDEVAN, M.; SUNEETHKUMAR, S. M.; SHAHIR, S.; NATARAJAN, N. Evaluation of Sugarcane and Soil Quality Amended by Sewage Sludge Derived Compost and Chemical Fertilizer. **Nature Environment and Pollution Technology**, Pune, v. 19, n. 4, p. 1737-1741, 2020.

BARBOSA, J. C.; MALDONADO JUNIOR, W. **AgroEstat**: sistema para análises estatísticas de ensaios agrônômicos. Jaboticabal: FCAV/UNESP, 2015. 396 p.

BASTOS, A. V. S. **Manejo de zinco e irrigação de salvamento em variedades de cana-de-açúcar cultivadas no cerrado**. 2021. 77 f. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias – Agronomia) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Rio Verde, 2021.

BATISTA, F. F. **Qualidade agroindustrial da cana-de-açúcar fertilizada com fontes mineral e organomineral associadas à bioestimulante**. 2021. 29 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) - Universidade Federal de Uberlândia, 2021.

BEDADA, W.; LEMENIH M.; KARLTUN, E. Soil nutrient build-up, input interaction effects and plot level N and P balances under long-term addition of compost and NP fertilizer. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 218, p. 220-231, 2016.

BENETT, C. G. S.; BUZETTI, S.; SILVA, K. S.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; GARCIA, C. M. D. P.; MAESTRELO P. R. Produtividade e desenvolvimento da cana-planta e soca em função de doses e fontes de manganês. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, p. 1661-1667, 2011.

BEZERRA, F. B.; OLIVEIRA, M. A. C. L. D.; PEREZ, D. V.; ANDRADE, A. G. D.; MENEGUELLI, N. D. A. Lodo de esgoto em revegetação de área degradada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 41, p. 469-476, 2006.

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.

BOZZA, N. G.; MARCHIORI, L. F. S. Utilização do Lodo de Esgoto como Adubo na Cultura da Cana de Açúcar. **Bioenergia em Revista**, [s. l.], v. 10, n. 1, 2020.

BRAGA, N. C. C.; SEVERIANO, E. D. C.; SANTOS, L. D. S.; RÚBIO NETO, A.; RODRIGUES, T. M.; LIMA, J. D. P. Production of sugarcane seedlings pre-sprouted in commercial and alternative substrates with by-products of the sugarcane industry. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 40, n. 1, p. 33-48, 2019.

BRAGA, VIVIAN S. 2013. **Composto de lodo de esgoto na cultura da cana-de-açúcar: nitrogênio, fósforo, fertilidade do solo e produtividade**. 2013. 100 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Piracicaba, 2021.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução normativa nº 61**, de 08 de julho de 2020. Diário Oficial da União, Brasília, 15 jul. 2020b, Edição 134, Seção 1, p: 5.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento/Secretaria de Defesa Agropecuária. **Resolução nº 498**, de 19 de agosto de 2020. Diário Oficial da União, Brasília, 21 agosto. 2020a, Edição 161, Seção 1, p: 265.

CAETANO, L. C. S.; PACHECO, B. M.; COSTA, A. N.; COSTA, A.F. S.; GUARÇONI M., A. Utilização do lodo de estação de tratamento de esgoto para adubação da cana de açúcar. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS (CBR). 2., 2018, Vitória. Anais [...]* Vitória: Instituto Capixaba de Pesquisa Assistência Técnica e Extensão Rural (IncaPer), 2018.

CAMARGO, O. A.; VALADARES, J. M. A. S.; DECHEN, A. R. Efeitos do pH e da incubação na extração do manganês, zinco, cobre e ferro do solo. **Revista brasileira de ciência do Solo**, Campinas, v. 6, p. 83-88, 1982.

CARDOSO, B. C.; PALAVICINI, A. L. S.; MANTOVANI, A.; CHIAMOLERA, D. L.; ZILIO, M.; FELICIO, T. P. Rendimento de cana-de-açúcar e graus Brix em função de diferentes formas de adubação. **Scientific Electronic Archives**, Sinop, v. 14, n. 4, 2021.

CASTÁN, E.; SATTI, P.; GONZÁLEZ-POLO, M.; MARÍA C. IGLESIAS, M. C.; MAZZARINO, M. J. Managing the value of composts as organic amendments and fertilizers in sandy soils. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 224, p. 29-38, 2016.

CHERUBIN, M. R.; CARVALHO, J. L. N.; CERRI, C. E. P.; NOGUEIRA, L. A. H.; SOUZA, G. M.; CANTARELLA, H. Land use and management effects on sustainable sugarcane-derived bioenergy. **Land**, Stockholm, v. 10, n. 1, p. 72, 2021.

CHIBA, M. K.; MATTIAZZO, M. E.; OLIVEIRA, F. C. Cultivo de cana-de-açúcar em Argissolo tratado com lodo de esgoto: II-Fertilidade do solo e nutrição da planta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, p. 653-662, 2008.

CINCINELLI, A.; MARTELLINI, T.; MISURI, L.; LANCIOTTI, E.; SWEETMAN, A.; LASCHI, S.; PALCHETTI, I. PBDEs in Italian sewage sludge and environmental risk of using sewage sludge for land application. **Environmental Pollution**, Oxford, v. 161, p. 229-234, 2012.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. Brasília, DF, 2020. Disponível em: <http://conab.gov.br/>. Acesso em: 23 de mar. de 2020.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. Brasília, DF, 2020. Disponível em: <http://conab.gov.br/>. Acesso em: 23 de mar. de 2020.

Conselho dos Produtores de Cana-De-Açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo – CONSECAN. **Manual de Instruções**. 4. ed. Piracicaba: COSECANA, 2012. 112 p.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006**. Brasília, DF, 2006. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf>. Acesso em: 15 de jul. 2020.

DIOLA, V.; SANTOS, F. Fisiologia. In: SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. **Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e álcool – tecnologia e perspectivas**. Viçosa, MG: Suprema, 2010. p. 25 – 49.

DUONG, T. T. T.; VERMA, S. L.; PENFOLD, C.; MARSCHNER, P. Nutrient release from composts into the surrounding soil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 195, p. 42-47, 2013.

FARIAS, C. H. A. **Otimização do uso da Água e do Zinco na Cana-de-açúcar em Tabuleiro Costeiro Paraibano**. 2006. 142 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2006.

FERREIRA, M. **Diagnose nutricional da cana-de-açúcar (*saccharum spp.*) fertilizada com organominerais a base de lodo de esgoto e bioestimulante**. 2018. 24f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia). Instituto Federal Goiano, Morrinhos, 2018.

FERREIRA, M. M. R. **Adubação Fosfatada em Variedades de Cana-de-açúcar Cultivadas em Ambiente Restritivo de Cerrado**. 2015. 55 f. Tese (Doutorado em Sistemas de Produção) - Faculdade de Engenharia UNESP, Ilha Solteira, 2015.

FERREIRA, S. R.; FERREIRA, M.; TEIXEIRA, A. O.; PEREIRA, I. A.; SOUZA, M. T.; MORAES, M. D.; LANA, R. M. Q.; MORAES, E. R. Produtividade de cana-de-açúcar de segundo corte fertilizada com organomineral de lodo de esgoto e bioestimulante. **Brazilian Journal of Development**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 4594-4600, 2020.

FLORENTINO, A. L.; DE VICENTE FERRAZ, A.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; ASENSIO, V.; MURAOKA, T.; DOS SANTOS DIAS, C. T.; NOGUEIRA, T.A.R.; CAPRA, G.F.; ABREU-JUNIOR, C. H. Long-term effects of residual sewage sludge application in tropical soils under Eucalyptus plantations. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 220, p. 177–187, 2019.

FRANCIS, C. A.; RUTGER, J. N.; PALMER, A. F. E. A rapid method for plant leaf area estimation in maize (*Zea mays* L.) 1. **Crop science**, Madison, v. 9, n. 5, p. 537-539, 1969.

GAZOLA, T.; CIPOLA FILHO, M. L.; JÚNIOR, N. C. F. Avaliação de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar provenientes de substratos submetidos a adubação química e orgânica. **Científica**, [s. l.], v. 45, n. 3, p. 300-306, 2017.

GIORGENON, E. P. **Estado Nutricional da Cana-de-Açúcar Adubada com Fertilizante Mineral, Organomineral de Lodo de Esgoto e Bioestimulante**. 2019. 33f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

HARGREAVES, J. C., ADL, M. S., WARMAN, P. R. A review of the use of composted municipal solid waste in agriculture. **Agriculture, Ecosystem & Environment**, Kuala Lumpur, v. 123, n. 1-3, p.1–14, 2008.

HERNÁNDEZ, T; CHOCANO, C.; MORENO, J.L; GARCÍA, C. Use of compost as an alternative to conventional inorganic fertilizers in intensive lettuce (*Lactuca sativa* L.) crops—Effects on soil and plant. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 160, p. 14-22, 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Pesquisa nacional de saneamento básico 2017**: abastecimento de água e esgotamento sanitário. Rio de Janeiro: IBGE, 2020.

JAKUBUS, M.; BAKINOWSK, E. Visualization of long-term quantitative changes of microelements in soils amended with sewage sludge compost evaluated with two extraction solutions. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 49, n. 11, p. 1355–1369, 2018.

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**, Curitiba, v. 7, n. 3, p. 379-389, 2018.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha: Verlag Justus Perthes, 1928.

MARIN, F. R.; EDREIRA, J. I. R.; ANDRADE, J.; GRASSINI, P. On-farm sugarcane yield and yield components as influenced by number of harvests. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 240, p. 134-142, 2019.

MARQUES, E. P. **Fontes alternativas de potássio para soqueira da cana-de-açúcar**. 2021. 73 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2021.

MARQUES, O. M.; BELLINGIERI, A. P.; MARQUES, A. T.; NOGUEIRA, T. A. R. Qualidade e produtividade da cana-de-açúcar cultivada em solo com doses crescentes de lodo de esgoto. **Bioscience Journal**, Darmstadt, v. 23, n. 2, 2007.

MELLIS, E. V.; QUAGGIO, J. A. **Uso de micronutrientes em cana-de-açúcar**. Brasília, DF: International Plant Nutrition Institute – IPNI, 2015. (Informações agrônômicas, n. 149)

MENEZES, F. G. **Qualidade tecnológica e rendimento da cana-de-açúcar adubada com organomineral de lodo de esgoto e bioestimulante**. 2017. 23 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) - Instituto Federal Goiano - Campus Morrinhos, 2017.

MENEZES, T. N.; RESENDE, R. S. Influência de épocas de plantio na eficiência do uso da água da chuva em cultivo irrigado de cana-de-açúcar. **Irriga**, Botucatu, v. 1, n. 1, p. 291-291, 2016.

- MOURA, L. C.; SILVA, N. F.; CUNHA, F. F. N.; BASTOS, J. C.; CÉLIA, J. A.; TEIXEIRA, M. B. Índice de maturação da cana-de-açúcar fertirrigada sobre diferentes lâminas. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 8, n. 1, p. 64-76, 2014.
- NAVARRETE A. A., MELLIS E. V., ESCALAS A., LEMOS L. N., JUNIOR J. L., QUAGGIO J. A., ZHOUC J., TSAI S. M. Zinc concentration affects the functional groups of microbial communities in sugarcane-cultivated soil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 236, p. 187-197, 2017.
- NAVARRETE, A. A.; ALVAREZ, R. D. C. F.; ROQUE, C. G.; ROSSETTO, R.; ADÃO, D. V.; RODRIGUES, T. D. S.; TOLEDO, V. R. 2021. **As lições para o manejo do solo canavieiro nos primeiros 20 anos de colheita mecanizada no Brasil**, Campo Grande, MS: Ed. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), 2021. 52 p.
- NICCHIO, B.; KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; SANTOS, G.A. Eficiência agrônômica de fontes alternativas de fósforo em cultivo de cana planta. **Journal of Agronomic Sciences**, Londrina, v. 8, n. 2, p. 39-56, 2019.
- NICCHIO, B; CARDOZO, C. C; VIEIRA, M. A. M. Efeitos de substratos na qualidade de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Pernambucana**, Recife, v. 25, n. 1, 2020.
- NOGUEIRA, T. A. R.; FRANCO, A.; HE, Z.; BRAGA, V. S.; FIRME, L. P.; ABREU-JUNIOR, C. H. Short-term usage of sewage sludge as organic fertilizer to sugarcane in a tropical soil bears little threat of heavy metal contamination. **Journal of Environmental Management**, London, v. 114, p. 168–177, 2013.
- NYAMANGARA, J. Use of sequential extraction to evaluate zinc and copper in a soil amended with sewage sludge and inorganic metal salts. **Agriculture, ecosystems & environment**, Amsterdam, v. 69, n. 2, p. 135-141, 1998.
- OLIVEIRA, A.; SOUZA, A. R.; CLEMENTE, J. M.; DOS SANTOS, T. M.; DUARTE, A. R.; MACHADO, M. G. Crescimento vegetativo de variedades de cana-de-açúcar. **Humanidades e Tecnologia (FINOM)**, [s. l.], v. 18, n. 1, p. 24-32, 2019.
- OLIVEIRA, C. M. R.; PASSOS, R. R.; ANDRADE, F. V.; REIS, E. F.; STURM, G. M.; SOUZA, R. B. Corretivos da acidez do solo e níveis de umidade no desenvolvimento da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Botucatu, v. 5, n. 1, p. 25-31, 2010.
- OLIVEIRA, F. C.; MATTIAZZO, M. E.; MARCIANO, C. R.; ROSSETTO, R. Efeitos de aplicações sucessivas de lodo de esgoto em um Latossolo Amarelo distrófico cultivado com cana-de-açúcar: carbono orgânico, condutividade elétrica, pH e CTC. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 26, n. 2, p. 505-519, 2002.

OLIVEIRA, M. W.; OLIVEIRA, T. B. A.; Nascif, C.; NOGUEIRA, C. H. C.; ASSIS, W.O.; BORGES, S.T.F. Nitrogen fertilization in sugarcane nurses. **Brazilian Journal of Development**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 2855-2860, 2020.

OUERIEMMI, H.; ARDHAOU, K.; MOUSSA, M. Short-Term Effects of Sewage Sludge Compost Application on Some Chemical Properties of Sandy Soil. In: **Conference of the Arabian Journal of Geosciences**. Springer, Cham, p. 113-115, 2018.

PILAN, P. H.; CERVI, R. G.; RODRIGUES, S. A.; OLIVEIRA, P. A.; ROSSI, A. L. D. Caracterização de variedades de Cana-de-açúcar submetidas à processos mecanizados de colheita em diferentes estágios de corte. **Tekhne e Logos**, Botucatu, v. 8, n. 3, p. 167-182, 2017.

PINTO, L. E. V.; SPÓSITO; T. H. N.; Godinho, A. M. M.; Martins, B. F. Produção de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar em função de diferentes substratos. **Colloquium Agrariae**, Presidente Prudente, v. 8, p. 93-99, 2016.

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

PRATES, A. R.; COSCIONE, A. R.; FILHO, M. C. M. T.; MIRANDA, B. G.; ORIVALDO, A.; ABREU-JUNIOR, C. H.; OLIVEIRA, F. C.; MOREIRA, A.; GALINDO, F.A.; SARTORI, M. P.; HE, Z.; JANI, D. A.; CAPRA, G. F.; GANGA, A.; NOGUEIRA, T. A. R. Composted Sewage Sludge Enhances Soybean Production and Agronomic Performance in Naturally Infertile Soils (Cerrado Region, Brazil). **Agronomy**, Basel, v. 10, n. 11, p. 1677, 2020.

QIAO, X.; LUO, Y.; CHRISTIE, P.; WONG, M. H. Chemical speciation and extractability of Zn, Cu and Cd in two contrasting biosolids-amended clay soils. **Chemosphere**, Oxford, v. 50, n. 6, p. 823-829, 2003.

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

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo/Fundação – IAC, 1997. 285 p.

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

REDE INTERUNIVERSITÁRIA PARA O DESENVOLVIMENTO DO SETOR SUCROALCOOLEIRO (RIDESA). **Catálogo nacional de variedades “RB” de cana-de-açúcar**. [S. l.]: Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro, 2010. 85 p.

RICCI, A.B.; PADOVANI, V.C.R.; JÚNIOR, D.R.P. Uso de lodo de esgoto estabilizado em um solo decapitado. II - Atributos químicos e revegetação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, n. 2, n. 543, n. 551, 2010.

RIGBY, H.; CLARKE, B. O.; PRITCHARD, D. L.; MEEHAN, B.; BESHAN, F.; SMITH, S. R.; PORTER, N. A. A critical review of nitrogen mineralization in biosolids-amended soil, the associated fertilizer value for crop production and potential for emissions to the environment. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 541, p. 1310-1338, 2016.

ROSA, P. A. L.; MORTINHO, E. S.; JALAL, A.; GALINDO, F. S.; BUZETTI, S.; FERNANDES, G. C.; TEIXEIRA FILHO, M.C.M.T. Inoculation with growth-promoting bacteria associated with the reduction of phosphate fertilization in sugarcane. **Frontiers in Environmental Science**, Lausanne, v. 8, p. 32, 2020.

SANTOS, D. M. S. **Atributos químicos do solo e crescimento de mudas de uvaia (*Eugenia pyriformis cambess*) adubadas com composto de resíduos de aquicultura**. 2021. 45 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia). Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho, Jaboticabal, 2021.

SANTOS, F. E. V.; KUNZ, S. H.; CALDEIRA, M. V. W.; AZEVEDO, C. H. S.; RANGEL, O. J. P. Características químicas de substratos formulados com lodo de esgoto para produção de mudas florestais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, p. 971-979, 2014.

SANTOS, F.; BORÉM, A. **Cana-de-açúcar: do plantio à colheita**. Viçosa, MG: Univesidade Federal de Viçosa, 2013.

SANTOS, G. A.; NICCHIO, B.; BORGES, M. A.; GUALBERTO, C. D. A. C.; PEREIRA, H. S.; KORNDÖRFER, G. H. Effect of biostimulants on tilling, yield and quality component of sugarcane. **Brazilian Journal of Development**, [s. l.], v. 6, n. 5, p. 29907-29918, 2020.

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

SILVA, F. C. D; BOARETTO, A. E.; BERTON, R. S.; ZOTELLI, H. B.; PEXE, C. A.; BERNARDES, E. M. Efeito de lodo de esgoto na fertilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 36, p. 831-840, 2001.

SILVA, J. **Árvore do conhecimento: Pimenta: Adubação e nutrição**. Brasília, DF: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2021.

SILVA, M. T.; MARTINAZZO, R.; SILVA, S. D. A.; BAMBERG, A. L.; STUMPF, L.; FERMINO, M. H.; VALGAS, R.A. Innovative substrates for sugarcane seedling production: sewage sludges and rice husk ash in a waste-to-product strategy. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 157, p. 112812, 2020.

SILVA, R. C. F. **Teores de Fe, Zn, e Cu em solos de cana-de-açúcar: reserva, disponibilidade e concentração na planta**. 2017. 64 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Ciências do Solo) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2017.

SILVEIRA, M. L. A.; ALLEONI, L. R. F.; GUILHERME, L. R. G. Biosolids and heavy metals in soils. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, p. 793-806, 2003.

SOUSA, D.M.G.; REIN, T.A.; NUNES, R.S.; JUNIOR, J. D. G. S. **Recomendações para correção da acidez do solo para cana-de-açúcar no cerrado**. [S. l.: s. n.], 2016. (Comunicado técnico, v. 2015).

SOUSA, R. T. X. Fertilizante organomineral para a produção de cana-de-açúcar. 2014. 87 f. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

SOUZA, M. T.; FERREIRA, S. R.; MENEZES, F. G.; RIBEIRO, L. S.; PEIXOTO, J. V. M. Altura de planta e diâmetro de colmo em cana-de-açúcar de segundo corte fertilizada com organomineral de lodo de esgoto e bioestimulante. **Brazilian Journal of Development**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 1988-1994, 2020.

SOUZA, R. T. X.; HENRIQUE, B. C. M.; HENRIQUE, L. C. M.; HENRIQUE, H. M. Uso de fertilizante organomineral de liberação gradual de nutrientes na cultura da soja. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, Viçosa, MG, v. 6, n. 4, p. 0513-0519, 2020.

SPIRONELLO, A.; RAIJ, B. V.; PENATTI, C. P.; CANTARELLA, H.; MORELLI, J. L.; FILHO, J. O.; LANDELL, M. G. A.; ROSSETO, R. 1997. Outras culturas industriais. In: Raij, B. V. *et al.* (ed.) **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 1997. p. 237-239.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, K.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. Brasília, DF: Embrapa, p. 573, 2017.

TERA AMBIENTAL. **Guia sobre o Fertilizante Orgânico Composto Classe "D"**. Disponível em: <https://www.teraambiental.com.br/guia-fertilizante-organico-composto-classe-d>. Acesso em: 24 nov. 2020.

VASCONCELLOS, G.; LOPES, E. C.; SCHEUER, L. Informational Flow of Logistics Processes: study on the process of fertilizer importation to Brazil. **International Journal for Innovation Education and Research**, [s. l.], v. 7, n. 10, p. 123-132, 2019.

VITTI, G. C. MAZZA, J. A.; LUZ, P. H. C.; QUINTINO, T. A. Manejo e uso de fertilizantes em cana-de-açúcar. *In: Tópicos em tecnologia Sucroalcooleira*. Jaboticabal: Multipress, 2006. p.31-53.

VITTI, G. C.; LUZ, P. H. C.; ALTRAN, W. S. Nutrição e adubação. *In: SANTOS, F.; BOREM, A.; CALDAS, C. Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e etanol: tecnologias e perspectivas*. 2. ed. Viçosa, MG: [s. n.], 2011. p. 73-117.