UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA AMBIENTAL

JÉSSICA TAEKO SANCHES KOHARA DE ANGELI

IMPLICAÇÃO AMBIENTAL NO USO DO COMPOSTO DE LODO DE
CURTUME EM APLICAÇÃO AGRÍCOLA

SÃO PAULO

2021

JÉSSICA TAEKO SANCHES KOHARA DE ANGELI

IMPLICAÇÃO AMBIENTAL NO USO DO COMPOSTO DE LODO DE CURTUME EM
APLICAÇÃO AGRÍCOLA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência Ambiental do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Joel Barbujani Sígolo

Versão Corrigida

SÃO PAULO

2021

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITE A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

Angeli, Jéssica Taeko Sanches Kohara de.

Implicação ambiental no uso do composto de lodo de curtume em aplicação agrícola. / Jéssica Taeko Sanches Kohara de Angeli ; orientador: Joel Barbujani Sígolo. – São Paulo, 2021.

79 f.: il; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Ciência Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental - Instituto de Energia e Meio Ambiente - Universidade de São Paulo

1. Contaminação do solo. 2. Metais. 3. Vegetação – contaminação. 4. Curtume. 5. Lodo. I. Título.

Elaborado por Maria Penha da Silva Oliveira CRB-8/6961

Nome: Angeli, Jéssica Taeko Sanches Kohara de

Título: Implicação ambiental no uso do composto de curtume em aplicação agrícola

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência Ambiental do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciência.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Instituição: _____

Dr. _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Instituição: _____

Dr. _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Instituição: _____

Dr. _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Instituição: _____

Dr. _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu esposo, Airison,
por me apoiar e incentivar incondicionalmente,
por estar ao meu lado nos momentos mais difíceis e
por sempre me fazer sorrir.

Uma página inteira não seria o suficiente para expressar
todo meu amor e minha gratidão!

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e aos guias iluminados por todas as bênçãos na minha vida, as quais abriram os caminhos para eu chegar até aqui. Agradeço pela força e iluminação nos momentos mais turbulentos e escuros, depois de superar os obstáculos eu alcancei a vitória, mas nada disso seria possível sem a energia espiritual que eu recebi.

Ao meu esposo, Airison, me faltam palavras para descrever a minha gratidão, ele foi quem mais me incentivou e apoiou a realizar o mestrado, sem o seu amor, companheirismo, paciência e alegria não seria possível alcançar tantas vitórias. Muito obrigada por tudo meu amor, te amo!

Agradeço a toda minha família por sempre acreditar no meu potencial e me incentivar a nunca parar de estudar. Especialmente, agradeço a minha mãe, Maria, que desde quando eu era criança me ensinou a valorizar a educação e sempre seguir meus sonhos, também agradeço as minhas tias, Miyuki, Bete e Elza por todo apoio ao longo dos anos.

Ao professor Dr. Joel B. Sígolo, mais uma vez, palavras não são o suficiente para expressar a minha gratidão. Obrigada pela ida ao campo debaixo de chuva e sol para coletar as amostras, pelas reuniões, pelas conversas distraídas, pelos conselhos e por sempre estar disposto e presente. Os mais profundos e sinceros agradecimentos por toda orientação, ensinamento e incentivo concedidos durante esses anos que trabalhamos juntos.

Aos meus amigos, futuros doutores, Jaqueline e Luis agradeço por todo carinho ao longo dos anos, pelas notas na geladeira e por serem minhas inspirações para seguir na carreira acadêmica.

Em especial, ao Daniel (o qual também faz parte das notas na geladeira), agradeço por todos os conselhos, os incentivos, as conversas, por nunca permitir que eu desanimasse, por incentivar e me inspirar a continuar perseverando e estudando, estudando e perseverando... Obrigada por ser esse amigo tão leal e presente por todos esses anos.

Agradeço a Juliana, uma amiga maravilhosa que conheci durante a pós-graduação, que esteve comigo em várias disciplinas, tivemos várias conversas motivadoras, os conhecimentos dela abriram meus olhos para novos caminhos. Futura Doutora Juliana, obrigada pelos cafés, inspirações e novas percepções.

Agradeço ao Samuel, funcionário do IGc, por todo apoio com a coleta e preparação das amostras.

Agradeço aos funcionários do IEE, principalmente aos que trabalham na secretária do PROCAM, por toda disposição em resolver os problemas burocráticos da forma mais rápida e solicita possível.

Agradeço a CAPES/PROEX pelo auxílio financeiro para realização do projeto e pela concessão da bolsa.

Muito obrigada a TODOS que fizeram parte dessa fase da minha vida, de forma direta ou indireta. Sem a colaboração de vocês esse sonho não teria sido realizado.

*“ Já não há meio ambiente...
Mas preservemos o terço de ambiente que nos resta.”*

Veríssimo Andrade

RESUMO

ANGELI, Jéssica Taeko Sanches Kohara de. Implicação ambiental no uso do composto de lodo de curtume em aplicação agrícola. 2021. Dissertação (Mestrado em Ciência Ambiental) – Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

O lodo gerado pelas indústrias de curtume é atualmente objeto de grande atenção e questionamentos em relação à sua composição química e à interação de seus compostos constituintes com o meio ambiente. O método de compostagem tornou-se uma referência para minimizar os impactos ambientais do lodo. Nos últimos anos, muitas pesquisas sobre dispor o composto de lodo de curtume em áreas agrícolas apresentaram bons resultados, porém ressalta-se a possibilidade do acúmulo de compostos em concentrações elevadas tornando-os assim perigosos no solo. Este mestrado teve o objetivo de avaliar as implicações ambientais da aplicação do composto de lodo de curtume em uma área de pastagem (*Brachiaria decumbens*) para gado de corte. A caracterização química das amostras de solos e vegetação (folhas e raízes da braquiária) foi realizada pelo Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) – USP, por meio da análise quantitativa de Al, Cd, Cr, Cu, K, Mn, Na, P, S, Se e Zn utilizando espectrômetro de emissão óptica (ICP-OES). A partir dos resultados analíticos, observa-se que nos solos coletados com profundidade de 10 a 20 cm, metais como Al, Mn e Cr aparecem mais concentrados, nos solos superficiais a concentração de Cd é maior. A vegetação apresentou valores maiores da concentração de Se nas raízes, enquanto nas folhas houve a predominância da concentração de Cu, dentre outros elementos como S e Na. Para garantir a qualidade do solo, realizou-se uma análise comparativa com os valores de orientadores de prevenção, referência de qualidade e valores de intervenção específicos para áreas agrícolas determinados pela DD nº 256/2016/D (CETESB) e Resolução nº 420 (CONAMA). Os resultados demonstraram que o Cr e o Se em alguns pontos de coleta apresentaram concentrações acima dos valores de prevenção e referência de qualidade, porém quando relacionados aos valores orientadores específicos para áreas agrícolas, as concentrações dos metais analisados estão em conformidade com os padrões recomendados. A partir dos dados obtidos, conclui-se que as propriedades químicas do solo estão sendo alteradas com a disposição do composto de lodo de curtume e que apesar das concentrações dos metais não ultrapassarem os valores definidos especificamente para áreas agrícolas, as concentrações de Cr, principalmente, devem ser monitoradas, porque possuem valores bem próximos aos valores de intervenção determinados pela CETESB e CONAMA. A possibilidade de percolação e lixiviação dos metais analisados para outras áreas e águas subterrâneas não deve ser descartada nessa área analisada como referência. Em relação à qualidade da vegetação (*Brachiaria decumbens*), as concentrações de Cu presentes nas folhas analisadas, em comparação com outros estudos, indicam que na possibilidade do consumo dessa vegetação, o que ocorre quando o gado vai para o processo de corte visando rápida engorda, esses elementos podem estar sendo transladados para os animais alocados nessa área, podendo assim ocasionar distúrbios na saúde animal, e consequentemente se os derivados desses animais abatidos forem consumidos, podem acarretar impactos na saúde humana.

Palavras-chaves: Composto de lodo de curtume. Contaminação do solo. Metais. Contaminação da vegetação. Resíduos.

ABSTRACT

ANGELI, Jéssica Taeko Sanches Kohara de. Environmental implications of using composting tannery sludge in agricultural applications. 2021. Dissertation. (Master's Degree in Environmental Science) – Energy and Environment Institute, University of São Paulo, São Paulo, 2021.

The sludge generated by the tannery industries is currently an object of great attention and questions regarding its chemical composition and the interaction of its constituent compounds with the environment. The composting method has become a benchmark for minimizing the environmental impacts of sludge. In recent years, much research on disposing the tannery sludge compound in agricultural areas has presented good results, but the possibility of the accumulation of compounds in high concentrations is highlighted, thus making them harmful in the soil. This Master's Dissertation aimed to evaluate the environmental implications of applying the tannery sludge compound in a pasture area (*Brachiaria decumbens*) for beef cattle.

The chemical characterization of soil and vegetation samples (leaves and roots of the *brachiaria*) were performed by the Technological Characterization Laboratory (LCT) - USP, through the quantitative analysis of Al, Cd, Cr, Cu, K, Mn, Na, P, S, Se and Zn, using inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES). From the analytical results, it is observed that in soils collected with a depth of 10 to 20 cm, metals such as Al, Mn and Cr appear more concentrated, in surface soils the Cd concentration is higher. The vegetation presented higher values of Se concentration in the roots, while in the leaves there was a predominance of Cu concentration, among other elements such as S and Na. In order to guarantee soil quality, a comparative analysis was carried out with the values of prevention advisers, quality reference and specific intervention values for agricultural areas determined by DD nº 256/2016 / D (CETESB) and Resolution nº 420 (CONAMA). The results showed that Cr and Se in some collection points presented concentrations above the values of prevention and quality reference, however, when related to the specific guiding values for agricultural areas, the concentrations of the metals analyzed are in accordance with the recommended standards. From the obtained data, it is possible to conclude that the chemical properties of the soil are being altered with the disposal of the tannery sludge compound and that, despite the metal concentrations do not exceed the values defined specifically for agricultural areas, the Cr concentrations, mainly, must be monitored as their values are very close to the intervention ones, determined by CETESB and CONAMA. The possibility of percolation and leaching of the metals analyzed for other areas and groundwater should not be ruled out in this area analyzed as a reference. Regarding the quality of vegetation (*Brachiaria decumbens*), the Cu concentrations present in the analyzed leaves, in comparison with other studies, indicate that in the possibility of consumption of this vegetation, which occurs when beef cattle go to process aiming at rapid fattening, these elements may be transferred to the animals allocated there, and thus be able to cause disturbances in animal health, and consequently, if the derived products of these slaughtered animals are consumed, it may have impacts on human health.

Keywords: Composting Tannery Sludge. Soil Contamination. Metals. Vegetation Contamination. Waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Peles salgadas de origem bovina.....	22
Figura 2 -	(a e b) Área da produção do composto de lodo de curtume, (c) pátio de armazenamento e (d) localização da usina de compostagem na planta industrial do curtume.....	38
Figura 3 -	Localização da área de estudo a partir do mapa do Estado de São Paulo (a), dá área de contorno (b) e das pastagens cultivadas com o composto de lodo de curtume (c).....	38
Figura 4 -	Plantação de braquiária (<i>Brachiaria decumbens</i>) (a) e (b).....	39
Figura 5 -	Demarcação da área de cultivo de braquiária e representação dos pontos de coleta.....	40
Figura 6 -	Pontos de coleta das amostras de solos com profundidades de 0 a 10 centímetros e de 10 a 20 centímetros.....	40
Figura 7 -	Coleta de solo com auxílio do trado holandês (a) e (b).....	41
Figura 8 -	Amostras coletadas da vegetação – Braquiária (<i>Brachiaria decumbens</i>) (a) e (b).....	42
Figura 9 -	Amostras de solos coletados na profundidade de 0 a 10 centímetros.....	43
Figura 10 -	Amostras de solos coletados na profundidade de 10 a 20 centímetros.....	43
Figura 11 -	Amostras das folhas da braquiária (<i>Brachiaria decumbens</i>) secas e trituradas.....	44
Figura 12 -	Amostras das raízes da braquiária (<i>Brachiaria decumbens</i>) secas e trituradas.....	45

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 -	Quadro sintético dos principais enquadramentos legais relacionados aos impactos ambientais causados pelo processo produtivo.....	28
Tabela 2 -	Valores das concentrações do N, Cr, Fe e Mn do lodo <i>in natura</i> relacionados aos valores máximos permitidos pela legislação (NBR 10004:2004 – anexo G).....	31
Tabela 3 -	Composição química do lodo de curtume: antes e após o processo de compostagem.....	32
Tabela 4 -	Resultados das análises granulométricas do solo (profundidade de 0 a 10 cm e de 10 a 20 cm) na área de cultivo da braquiária (<i>Brachiaria decumbens</i>).....	47
Tabela 5 -	Resultados da quantificação da concentração dos elementos presente no solo coletado com profundidade de 0 a 10 centímetros.....	48
Tabela 6 -	Resultados da quantificação da concentração dos elementos presente no solo coletado com profundidade de 10 a 20 centímetros.....	48
Tabela 7 -	Resultados da quantificação da concentração dos elementos presentes nas folhas de braquiária (<i>Brachiaria decumbens</i>).....	50
Tabela 8 -	Resultados da quantificação da concentração dos elementos presentes nas raízes da braquiária (<i>Brachiaria decumbens</i>).....	51
Tabela 9 -	Estatísticas da distribuição granulométrica (phi) – Teste de Pearson.....	52
Tabela 10	Análise estatística das amostras de solos coletadas no ponto VP6.....	53
-		
Tabela 11	Análise estatística das amostras de solo coletada no ponto VP7.....	54
-		
Tabela 12	Análise estatística da amostra de folhas de braquiária (<i>Brachiaria decumbens</i>) coletada no ponto VP4.....	54
Tabela 13	Análise estatística da amostra de raiz de braquiária (<i>Brachiaria decumbens</i>) coletada no pnto VP7.....	55
Tabela 14	Comparação entre os valores dos resultados das análises químicas dos solos com profundidade de 0 a 10 centímetros e os valores de prevenção e valores de referência de qualidade fornecidos pela Resolução nº 420 (CONAMA) e Decisão de diretoria nº 256/2016/E (CETESB).....	69

Tabela 15	Comparação entre os valores dos resultados das análises químicas dos - solos com profundidade de 10 a 20 centímetros e os valores de prevenção e valores de referência de qualidade fornecidos pela Resolução nº 420 (CONAMA) e Decisão de diretoria nº 256/2016/E (CETESB).....	71
Tabela 16	Comparação entre os valores dos resultados das análises químicas dos - solos com profundidade de 0 a 10 centímetros e os valores de investigação específicos para áreas agrícolas fornecidos pela Resolução nº 420 (CONAMA) e Decisão de diretoria nº 256/2016/E (CETESB).....	72
Tabela 17	Comparação entre os valores dos resultados das análises químicas dos - solos com profundidade de 10 a 20 centímetros e os valores de investigação específicos para áreas agrícolas fornecidos pela Resolução nº 420 (CONAMA) e Decisão de diretoria nº 256/2016/E (CETESB).....	72

LISTAS DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Quantidade de couro curtido inteiro de bovino (unidades): 1º trimestre de 1999 – 1º trimestre de 2020.....	19
Gráfico 2 - Frações granulométricas do solo coletado com profundidade de 0 a 10 centímetros.....	56
Gráfico 3 - Frações granulométricas do solo coletado com profundidade de 10 a 20 centímetros.....	56
Gráfico 4 - Concentrações de alumínio presente nos solos, folhas e raízes após aplicações do composto de lodo de curtume.....	58
Gráfico 5 - Concentrações de cádmio presente nos solos, folhas e raízes após aplicações do composto de lodo de curtume.....	60
Gráfico 6 - Concentrações cromo presente nos solos, folhas e raízes após aplicações do composto de lodo de curtume.....	60
Gráfico 7 - Concentrações de cobre presente nos solos, folhas e raízes após aplicações do composto de lodo de curtume.....	61
Gráfico 8 - Concentrações potássio presente nos solos, folhas e raízes após aplicações do composto de lodo de curtume.....	62
Gráfico 9 - Concentrações de manganês presente nos solos, folhas e raízes após aplicações do composto de lodo de curtume.....	63
Gráfico 10 - Concentrações de sódio presente nos solos, folhas e raízes após aplicações do composto de lodo de curtume.....	64
Gráfico 11 - Concentrações de fósforo presente nos solos, folhas e raízes após aplicações do composto de lodo de curtume.....	65
Gráfico 12 - Concentrações de enxofre presente nos solos, folhas e raízes após aplicações do composto de lodo de curtume.....	66
Gráfico 13 - Concentrações de selênio presente nos solos, folhas e raízes após aplicações do composto de lodo de curtume.....	66
Gráfico 14 - Concentrações de zinco presente nos solos, folhas e raízes após aplicações do composto de lodo de curtume.....	68

LISTAS DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CICB	Centro das Indústrias de Curtume do Brasil
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CTC	Capacidade de troca de cátions
ETE	Estação de tratamento de efluente
FOB	Free on Board
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
GSA	Laboratório de sedimentologia
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICP-OES	Espectrometria de emissão atômica com plasma indutivamente acoplado
LCT	Laboratório de caracterização tecnológica
LTA	Laboratório de tratamento de amostras
NBR	Norma Brasileira
SECEX	Secretaria do Comércio Exterior
USP	Universidade de São Paulo
VPrev	Valor de prevenção
VRQ	Valor de referência de qualidade
VI	Valor de investigação
VP	Ponto de coleta
VPB	Ponto de coleta da amostra de referência

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
2 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	18
2.1 Objetivo Geral	18
2.2 Objetivos específicos.....	18
3 REFERENCIAL TEÓRIO.....	19
3.1 O setor de curtimento de peles no Brasil.....	19
3.2 Processo produtivo do couro.....	21
3.3 Os resíduos gerados na produção do couro.....	25
3.3.1 Lodo de Curtume.....	29
3.4 Composto de lodo de curtume.....	30
3.5 Aplicação do composto de lodo de curtume em áreas agrícolas.....	32
3.6 Legislações que determinam os valores orientadores para controle de qualidade dos solos no Brasil.....	34
3.6.1 Conselho Nacional do Meio Ambiente e a Resolução nº 420.....	34
3.6.2 Companhia Ambiental do Estado de São Paulo e a Decisão de Diretoria nº 256/2016/E.....	36
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
4.1 Área do estudo.....	37
4.2 Procedimento para coleta das amostras.....	39
4.2.1 Coleta das amostras de solo.....	39
4.2.2 Coleta das amostras de vegetação.....	41
4.3 Tratamento das amostras.....	42
4.3.1 Pré-tratamento das amostras de solo.....	42
4.3.2 Tratamento das amostras da vegetação.....	44
4.4. Procedimentos analíticos.....	45
4.4.1 Análise granulométrica.....	45
4.4.2 Caracterização química.....	45
5 RESULTADOS.....	47
5.1 Granulometria por difração a laser.....	47
5.2 Caracterização química do solo.....	47
5.3 Caracterização química das folhas da braquiária (<i>Brachiaria decumbens</i>)...	49

5.4	Caracterização química das raízes da braquiária (<i>Brachiaria decumbens</i>).....	50
5.5	Análises Estatísticas.....	51
5.5.1	Dados estatísticos da análise de granulometria a laser.....	51
5.5.2	Dados estatísticos das análises químicas.....	52
6	DISCUSSÕES.....	56
6.1	Granulometria dos solos.....	56
6.2	Caracterização química dos solos, folhas e raízes.....	58
7	CONCLUSÕES.....	74
	REFERÊNCIAS.....	77

1 INTRODUÇÃO

Dados do Centro das Indústrias de Curtume do Brasil (CICB) (2020) mostram que o país possui o maior rebanho de bovinos comercial do mundo, o setor de curtimento de peles emprega mais de 30 mil trabalhadores e com a exportação de peles e couros para 80 países movimenta mais de 2 bilhões de dólares por ano.

Em relação ao meio ambiente, os curtumes não possuem boa reputação, sendo citados como potencial fonte de poluição, estando sujeitos a fiscalizações do Ministério da Agricultura (MAPA), Ministério do Meio Ambiente (MMA), Secretaria da Agricultura e Abastecimento, Vigilância Sanitária, Secretaria Estadual do Meio Ambiente (SMA), Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), entre outros órgãos federais, estaduais ou municipais que apresentam competência nesse setor (FERRARI, 2015).

O curtume pode ser considerado uma fonte potencial de poluição, porque suas etapas de produção geram quantidades consideráveis de resíduos sólidos, gasosos e líquidos. Os resíduos gerados nas etapas da produção de couro contêm, comumente, metais perigosos, compostos orgânicos, entre outros elementos, que em concentrações elevadas podem ser altamente prejudiciais à saúde e bem-estar das comunidades presentes (DOS SANTOS et al., 2015).

O maior volume de resíduo gerado é o efluente em comparação com os resíduos sólidos e gasosos. Este resíduo líquido é direcionado para estação de tratamento de efluente (ETE) que pertence à planta do curtume. O tratamento físico-químico, biológico ou enzimático, desse efluente na ETE, gera novo resíduo semi sólido denominado como “lodo de curtume”. O lodo de curtume necessita de gerenciamento apropriado porque contém elementos e substâncias potencialmente perigosas. Um dos maiores problemas dos curtumes é a disposição desse lodo (ALIBARDI; COSSU, 2016).

Marques, Moreira e Siqueira (2000), Patel e Patra (2014), Araujo et al. (2020), descrevem que a composição do lodo de curtume pode conter cromo, cobre, cádmio, zinco, alumínio, sódio, nitrogênio, fósforo, surfactantes e compostos orgânicos. A maioria dos compostos presentes nesse lodo possui meia-vida longa e não são biodegradáveis. Diferentes técnicas são utilizadas para oferecer um destino a esse tipo de resíduo, entre as opções estão os aterros industriais, incineração, aplicação na agricultura e outros menos comuns como fabricação de tijolos, por exemplo (JUEL; MIZAN; AHMED, 2017).

Para ser viável a destinação do lodo de curtume na área agrícola foi testada a técnica de compostagem com o intuito de minimizar os possíveis impactos negativos desse resíduo. O

composto de lodo de curtume tem sido estudado e quando aplicado no solo apresentou resultados satisfatórios como, por exemplo, o aumento da quantidade de matéria orgânica no solo, assim como o aumento da concentração de nutrientes (fósforo, potássio e cálcio) que são benéficos para o desenvolvimento da vegetação. Porém, os mesmos estudos também constataram o acúmulo de cromo e outros compostos que podem promover a degradação do solo (MOREIRA; MINCATO; SANTOS, 2013; ALIBARDI; COSSU, 2016; MIRANDA et al., 2018) .

Enfatizado por Araújo (2011), na região oeste do Estado de São Paulo uma indústria, de curtimento de peles bovinas, desenvolveu um projeto para transformar o lodo de curtume em fertilizante orgânico utilizando a técnica de compostagem. Porém, esse composto de lodo de curtume (fertilizante orgânico) está sendo aplicado no solo para auxiliar no cultivo da braquiária (*Brachiaria decumbens*) em área de pastagem que possui a finalidade de alimentar o rebanho de gado de corte.

Diante do exposto, este trabalho teve o propósito de avaliar as possíveis interações do composto de lodo de curtume com o solo e a vegetação da espécie braquiária (*Brachiaria decumbens*), buscando investigar a possibilidade de contaminação e degradação da área de pastagem, a qual está sendo aplicado o presumido fertilizante orgânico.

2 OBJETIVOS DO TRABALHO

2.1 Objetivo geral

Este trabalho teve o objetivo de avaliar as implicações ambientais no uso do composto de lodo de curtume em aplicação agrícola.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar de forma quantitativa os principais elementos químicos (alumínio, cádmio, cromo, cobre, potássio, manganês, sódio, fósforo, enxofre, selênio e zinco) presentes no solo, na raiz e folhas da braquiária (*Brachiaria decumbens*), após a aplicação do composto de lodo de curtume;
- Analisar a granulometria do solo após a aplicação do composto de lodo de curtume;
- Estudar a interação química do composto de lodo de curtume com o solo e a braquiária (*Brachiaria decumbens*);
- Analisar os resultados da caracterização química do solo e comparar com a legislação vigente que visa preservar a qualidade do solo;
- Investigar se há risco de degradação da área de pastagem em que este fertilizante orgânico (composto de lodo de curtume) está sendo aplicado.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 O setor de curtimento de peles no Brasil

Aliada à tecnologia, à pesquisa e aos atributos naturais do couro a indústria curtidora brasileira tornou-se uma das maiores produtoras do mundo, concebendo produtos mais eficientes para os mais exigentes mercados nacionais e internacionais. O couro brasileiro possui forte inserção nos segmentos automotivos, moveleiros e calçadistas. Dados atualizados do Centro das Indústrias de Curtume do Brasil (CICB) (2020) registram 244 indústrias que realizam o processo de curtimento no país.

O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (IBGE, 2020) iniciou a Pesquisa Anual do Couro em 1996, a qual coletou informações em todos os estabelecimentos que realizam o curtimento de peles de várias espécies (bovino, caprino, ovino e etc.). A partir de 1997, o IBGE modificou a metodologia de pesquisa, lançando a Pesquisa Trimestral do Couro, que coleta dados sobre o setor de curtimento exclusivamente de peles bovinas, porém são referidos apenas os estabelecimentos que adquirem no mínimo 5000 unidades de pele cru inteira por ano.

Um dos principais dados coletados pela pesquisa realizada pelo IBGE é o volume de couro produzido por trimestre. O Gráfico 1 apresenta os valores trimestrais da quantidade de peles que foram curtidas desde 1999 até o primeiro trimestre de 2020.

Gráfico 1 – Quantidade de couro curtido inteiro de bovino, no período do 1º trimestre de 1999 ao 1º trimestre de 2020

Fonte: IBGE (2020)

O Brasil produziu mais de 11 milhões de unidades de couro no 4º trimestre de 2006, tendo seu ápice de produção. As unidades de couros produzidos sofrem por oscilações no decorrer dos anos como é representado no Gráfico 1. Nos últimos anos, observa-se queda no número de indústrias de curtimento, principalmente no Estado de São Paulo. Este cenário está em decorrência das retrações e dificuldades da economia em geral, aumento da concorrência e fechamento de alguns mercados (PACHECO, 2005; IBGE, 2020).

Apesar da indústria de curtimento brasileira não ter conseguido quebrar o seu recorde até o momento e o volume da produção estar decaindo, o setor ainda possui grande importância econômica para o país (IBGE, 2020).

O setor de curtimento brasileiro tem papel importante no comércio nacional de exportação. Com base em dados sobre as exportações de couros e peles apresentados pela Secretária do Comércio Exterior (SECEX) do Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços, o Centro das Indústrias de Curtume do Brasil (CICB) (2019) é possível verificar o perfil das exportações do ano de 2019:

- O ano de 2019 encerrou com o total de aproximadamente US\$ 1,15 bilhões;
- Área comercializada de 181,9 milhões em metros quadrados de couros e peles;
- Aumento de 0,1% da área comercializada em relação ao ano de 2018;
- Em termos de comercialização (área total comercializada em m²): couro Wet Blue representa 48,3%; seguido pelo couro acabado (44,2%) e o couro semi acabado-Crust (7,5%);
- Em termos de valor agregado, o couro acabado é mais representativo (59,6% do rendimento anual), seguido do couro Wet Blue (31,3%), o couro semi acabado (8,9%) e a pele salgada (0,2%).

Os países que mais importam couros e peles brasileiras são a China responsável por 25,0% do rendimento valor FOB (US\$), com exceção de Hong Kong que gera 4,8% do valor do rendimento anual, seguido pelos Estados Unidos (17,1%), Itália (16,9%), Vietnã (5,4%) e outros países somando 30,8% (CICB, 2019).

Com base no relatório do perfil das exportações de couros e peles do ano de 2019 apresentado pelo CICB (2019), os Estados brasileiros que mais exportaram foi o Rio Grande do Sul que gerou 26,6% do valor FOB (US\$) anual, seguido por São Paulo (15,9%), Goiás (14,2%), Paraná (12,7%), Bahia (5,8%) e os outros Estados produtores que somam 24,8%.

Referindo-se à exportação de couros e peles por área comercializada em metros quadrados no ano de 2019, os Estados brasileiros com maior volume de exportação foi o Rio

Grande do Sul que produziu 21,4% do volume anual da área comercializada em metros quadrados, seguido por Paraná (16,0%), Goiás (15,3%), São Paulo (13,6%), Bahia (5,3%) e os outros Estados que somam 28,4% (CICB, 2019).

Com base nos dados apresentados pelo CICB (2020) através do relatório de exportação do ano de 2019, os couros e peles produzidos no Estado de São Paulo possuem um valor agregado maior do que os produtos que são exportados pelo Estado do Paraná. O valor agregado está relacionado a procedência e forma de produção dos couros e peles, tornando o processo produtivo da indústria de curtimento um fator com grande relevância para o mercado de exportação.

3.2 Processo produtivo do couro

O couro pode ser produzido a partir de diversas espécies de animais. O Brasil produz couro a partir de peles de animais domésticos como bovino, bufalino, caprino, equino e de avestruz, assim como, a partir de animais da fauna silvestre (jacarés, cobras, rãs, entre outros) criados em cativeiros que devem estar regularizados junto ao órgão ambiental responsável. De forma simplificada o couro é a pele (matéria prima) do animal que passou pelo processo de limpeza, estabilização, curtimento e acabamento, feito isso está apto para ser destinado à confecção de peças de vestuário, calçados, ao setor moveleiro e automotivo, por exemplo. (PACHECO, 2005; FERRARI, 2015; FEAM, 2018).

Ferrari (2015) enfatiza que uma série de fatores influencia diretamente a qualidade do couro, os cuidados são iniciados na criação dos rebanhos, com controle de parasitas, forma de identificação, confinamento e transporte dos animais, sempre pensando na integridade da pele. Peles com muitas marcas (identificação, cicatrizes e machucados) podem perder o valor integral de comércio, essas peles não serão descartadas, mas provavelmente serão vendidas como um produto com qualidade inferior. Após o abate, as formas de manuseio, conservação e armazenamento devem ser feitas de modo eficiente, para obter a qualidade desejada nas peças de couro. (FEAM, 2018; PACHECO, 2005).

O processo de conservação das peles baseia-se no impedimento da degradação por meio dos microrganismos. Um dos métodos de conservação mais utilizado é conhecido como “salga”, as peles são empilhadas e intercaladas com camadas de cloreto de sódio seco, como mostra na Figura 1. Estas são conhecidas como “peles salgadas”, mais comumente utilizadas pelas indústrias de curtimento. Em alguns processos de conservação podem ser adicionados

pesticidas e biocidas para garantir a durabilidade das peles. As peles conhecidas como “peles verdes” são aquelas que vão para as indústrias de curtimento sem o processo de conservação pelo método da salga. (PACHECO, 2005; FERRARI, 2015).

Figura 1 – Peles salgadas de origem bovina

Fonte: FEAM (2018)

Pacheco (2005), Ferrari (2015) e FEAM (2018) descrevem que processo produtivo do couro pode ser dividido em três principais processos industriais sendo denominados de ribeira, curtimento e acabamento:

- Ribeira – É considerado um macro processo. Em suas etapas utilizam-se tanto agentes químicos como agentes físicos/mecânicos. Este processo realiza a limpeza das peles, como por exemplo, retirar o sal e os biocidas utilizados no processo de conservação, as gorduras, pelos, carnes, etc. A ribeira também é responsável por preparar as fibras colágenas das peles para que as próximas etapas de curtimento e acabamento tenham resultados satisfatórios. Neste processo realiza-se a etapa de divisão, onde as peles são separadas em duas camadas:
 - Flor – Camada externa da pele. Apresenta as características da pele, como os poros. Possui maior valor de mercado.
 - Raspa – Camada interna da pele, lado carnal, subjacente à flor.
- Curtimento – O processo de curtimento transforma as peles tratadas na ribeira em couro, tornando-as materiais mais estáveis e imputrescíveis. O processo de curtimento pode ser classificado em:

- Curtimento Mineral – Utiliza cromo (Cr^{+3}) como principal substrato para realizar o processo de curtimento. Segundo Beley (2010) mais de 90% da produção mundial de couro utiliza cromo como curtente.
 - Curtimento Vegetal – Utiliza extratos vegetais como componente principal para realizar o processo de curtimento;
 - Curtimento Sintético – Utiliza compostos sintéticos como resinas ou taninos sintéticos para realizar o processo de curtimento.
 - Curtimento Misto – Utiliza tanto cromo (Cr^{+3}), extratos vegetais ou sintéticos para realizar o processo de curtimento das peles, podem ser utilizados em lotes diferentes ou utilizados na mesma formulação, com o intuito de diminuir a quantidade de cromo utilizado.
- Acabamento – Esse processo é responsável pelas propriedades superficiais dos couros como uniformidade, resistência mecânica, impermeabilidade, coloração, estampas, maciez, entre outras relacionadas à finalização das peças. O acabamento é dividido em três etapas:
- Acabamento molhado – Esta etapa realizada após o curtimento, confere algumas propriedades físicas e mecânicas desejáveis ao couro.
 - Pré-acabamento – Nesta etapa realizam-se as últimas transformações no couro, constituindo suas propriedades finais, como coloração e estampa.
 - Acabamento final – Está é o conjunto das etapas anteriores mais as operações realizadas antes da expedição dos lotes, como prensagem e medição.

Os principais processos produtivos do couro são subdivididos em etapas que podem ser visualizadas no Fluxograma 1.

Os curtumes são classificados a partir da realização completa ou parcial dos três principais processos. A indústria que realiza o processo de curtimento pode ser classificada como:

- Curtume Integrado – Realiza o processo completo de transformação da pele em couro com acabamento;
- Curtume Wet-blue – Realiza o processo industrial de transformação da pele até a etapa de curtimento, tem esse nome devido à coloração azul que o couro curtido em cromo (Cr^{+3}) apresenta;
- Curtume Semi acabado – Sua matéria prima é o couro wet-blue transformando-o em couro semi acabado (conhecido como crust);

- Curtume de Acabamento – Transformam o couro semi acabado (crust) no produto final, realizando apenas as etapas de acabamento. Nesta categoria também pode ser incluídas as indústrias que iniciam sua cadeia produtiva com o couro wet-blue transformando-o em couro acabado.

Fluxograma 1 – Processo simplificado de produção do couro

Fonte: ABNT (2014).

Além das etapas apresentadas no Fluxograma 1, as indústrias de curtimento possuem etapas exclusivas nas suas linhas de produção, como por exemplo rebaixe, divisão, lixamento e gravações de textura nos couros, entre outras. Conforme descrito por dos Santos et al. (2015), a indústria de curtimento é considerada uma atividade com alto fator de impactos negativos ao meio ambiente, por gerar grandes volumes de resíduos sólidos, líquidos e gasosos com características poluentes.

3.3 Os resíduos gerados na produção do couro

O processo produtivo do couro possui uma má reputação por ser conhecido como um fator de alto impacto negativo ao meio ambiente. Segundo dos Santos et al. (2015, apud PACHECO, 2005) o processo convencional de curtimento de peles salgadas possui um rendimento médio de 22,5%. Por exemplo, a partir de uma tonelada de pele salgada são produzidos em média apenas 250kg de couros acabados. Quando se associa esses dados com os potenciais de poluição, a mesma quantidade de pele processada pode gerar 600kg a 1000kg de resíduos sólidos.

As etapas da produção do couro geram quantidades consideráveis de resíduos gasosos, sólidos e principalmente um alto volume de resíduos líquidos, exemplificados no Fluxograma 2. Os resíduos gerados durante as etapas do processo produtivo do couro são considerados fontes de poluição pois há possibilidade de conter, comumente, metais perigosos, compostos orgânicos, compostos inorgânicos, agentes patógenos, entre outros componentes que podem ser prejudiciais à saúde e bem-estar das comunidades presentes (ANGELI; SIGOLO, 2019).

Os resíduos gasosos gerados no processo de curtimento são recorrentes e podem possuir características odoríficas perceptíveis em distâncias consideráveis da área industrial. Nas etapas do processo de produção do couro os resíduos gasosos que são gerados podem causar danos à saúde ocupacional e ambiental. Compostos como a amônia, gás sulfídrico, solventes orgânicos, materiais particulados, entre outros exemplos, estão frequentemente presentes na composição dos resíduos gasosos gerados em curtumes. Alguns dos compostos dos resíduos gasosos podem estar presentes na composição dos resíduos sólidos (FEAM, 2018; PACHECO, 2005).

Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM, 2018) cita que os resíduos sólidos que são gerados nas etapas de produção do couro são: carnaça, recortes e aparas (caleadas e não caleadas), serragem (pó da lixadeira), aparas curtidas, embalagens de produtos químicos, peças de metais, resíduos oriundos das etapas de limpeza de máquinas (túnel de pintura, cortinas e multipontos) entre outros.

Fluxograma 2 – Etapas do processo de curtimento relacionadas com os resíduos que são gerados

Fonte: DOS SANTOS et al. (2015 apud PACHECO,2005)

Os problemas ambientais que podem ser originados por estes resíduos sólidos estão diretamente relacionados com as suas composições químicas. Apesar de serem considerados como potenciais fontes de poluição, dentre estes resíduos sólidos apresentados há a possibilidade de aproveitamento total se for ambientalmente adequado, por exemplo, as aparas (não caleadas e caleadas), raspas não curtidas, recortes e divisão da ribeira, constituem composições valiosas para a fabricação de diversos derivados de colágeno. Em contrapartida os resíduos líquidos possuem características poluentes mais pontuais, sendo considerados um dos maiores responsáveis pelos problemas ambientais relacionados ao processo de curtimento (PACHECO, 2005; FERRARI, 2015; FEAM, 2018).

Belay (2010) considera que os compostos dos efluentes dependem do tipo de processo industrial, em sua composição podem ser encontrados compostos com características físicas, químicas e biológicas que se não tratados de forma eficiente podem causar graves danos ambientais. Dentre os tipos de resíduos gerados nos processos industriais, os efluentes formados durante o processo de curtimento são conhecidos por possuir as maiores taxas de compostos poluentes.

Por anos, diversos pesquisadores consideravam apenas a poluição causada pelos compostos à base de cromo, porém já foi comprovado que devido a modernização dos processos

industriais e à adição da etapa de reciclo de cromo, ocorreu a diminuição da concentração de cromo (Cr^{+3}) presente nos efluentes, porém destacam-se outros componentes como hidróxido de sódio, hidróxido de amônia, compostos tensoativos, bactérias, enzimas, sulfito de sódio, vários compostos ácido, entre outros (DE ARAÚJO et al., 2016; MARTINES et al., 2010; MARTINEZ; CRUVINEL; BARATTO, 2013; MIRANDA et al., 2014).

Estudos recentes de Angeli e Sígolo (2019) consideram que a grande geração de resíduos e a consequente disposição de forma incorreta causam graves danos ambientais. A poluição do solo, água e ar ocasionada pelo manejo inadequado dos resíduos gerados nos processos industriais de modo geral são considerados crimes ambientais previstos em lei, no caso dos curtumes há legislações específicas.

Como exemplificado na Tabela 1, considera-se a etapa de tratamento do efluente como uma fonte potencial de poluição, dentre os aspectos ambientais destaca-se a produção de lodo. Angeli e Sígolo (2019) mencionam que devido à procedência, as características físicas, químicas e biológicas dos lodos gerados nas estações de tratamento dos efluentes do curtume o torna um dos principais resíduos com alto potencial de carga poluidora.

Tabela 1 – Quadro sintético dos principais enquadramentos legais relacionados aos impactos ambientais causados pelo processo produtivo do curtume

Etapa	Poluição	Aspecto Ambiental – Emissão	Impacto Ambiental Potencial	Enquadramento Legal
Conservação e Armazenamento das Peles – “barraca”	1. Ar 2. Hídrica 3. Solo / Resíduos Sólidos	1. NH ₃ e COVs (1) 2. eventuais líquidos eliminados pelas peles 3. sal com matéria orgânica	1. odor – incômodo ao bem estar público. 2. prejuízo à qualidade dos corpos d’água. 3. eventual contaminação do solo e de águas subterrâneas.	Poluição do ar: <ul style="list-style-type: none"> Art. 2º e 3º, Inciso V do Decreto nº 8.468/76 com redação dada pelo Decreto nº 15.425/80 e atualizações (SP); Decretos nºs 50.753/06, 52.469/07, 59.113/13 (SP) Poluição hídrica: <ul style="list-style-type: none"> Art. 18 ou 19-A do Decreto nº 8.468/76 com redação dada pelo Decreto nº 15.425/80 e atualizações (SP); Resolução CONAMA nº 357/2005 (BR); Resolução CONAMA nº 430/2011 (BR); Outras exigências relativas ao serviço municipal de água e esgoto; Exigências relativas à qualidade dos corpos d’água receptores Poluição do solo e de águas subterrâneas / Resíduos sólidos industriais: <ul style="list-style-type: none"> Art. 51 a 55 do Decreto nº 8.468/76 com redação dada pelo Decreto nº 15.425/80 e atualizações (SP); Decisão de Diretoria CETESB nº 145/2010/P, de 11/05/2010; Decisão de Diretoria CETESB nº 388/2010/P, de 21/12/2010; Políticas Nacional e Estadual de Resíduos Sólidos
Ribeira	1. Ar 2. Hídrica 3. Solo / Resíduos Sólidos	1. H ₂ S (1), NH ₃ e COVs 2. banhos residuais de tratamento das peles e águas de lavagens intermediárias – carga orgânica e produtos químicos (sulfeto, sais diversos e outros) 3. pelos, material sólido flotado / sedimentado e/ou retido em peneiras	1. odor – incômodo ao bem estar público. 2. prejuízo à qualidade dos corpos d’água. 3. eventual contaminação do solo e de águas subterrâneas.	
Curtimento	1. Hídrica	1. banho residual de curtimento das peles – carga orgânica e produtos químicos (cromo, taninos, sais diversos e outros)	1. prejuízo à qualidade dos corpos d’água.	
Acabamento	1. Ar 2. Hídrica 3. Solo / Resíduos Sólidos	1. COVs – dos solventes dos produtos aplicados 2. banhos residuais de tratamento dos couros – carga orgânica e produtos químicos (cromo, taninos, corantes, óleos e outros) 3. pó / farelo / serragem de rebaixadeira, recortes de couros	1. odor – incômodo ao bem estar público. 2. prejuízo à qualidade dos corpos d’água. 3. eventual contaminação do solo e de águas subterrâneas.	
Tratamento de Efluentes	1. Ar 2. Hídrica 3. Solo / Resíduos Sólidos	1. H ₂ S e COVs 2. efluentes líquidos tratados – carga orgânica e produtos químicos residuais (sulfeto, sais diversos e outros) 3. lodos (primários, secundários etc.), material flotado / sedimentado e retido em grades e peneiras	1. odor – incômodo ao bem estar público. 2. prejuízo à qualidade dos corpos d’água. 3. eventual contaminação do solo e de águas subterrâneas.	

Fonte: FERRARI (2015 apud PACHECO, 2005)

3.3.1 Lodo de curtume

Estudos realizados por Juel et al. (2017) apresentam dados alarmantes sobre a quantidade de lodo gerado nas estações de tratamentos de efluentes dos processos industriais de produção de couro. São gerados em média 100 a 150kg de lodo por tonelada de pele processada. Denominado como lodo de curtume, possui em sua composição, comumente, cromo, sulfatos, sulfitos, sais, proteínas, compostos polifenóis, surfactantes, solventes, tintas, entre outros compostos inorgânicos e orgânicos.

Os lodos de curtumes possuem como principal característica as altas concentrações de metais como cromo, arsênio, níquel, cobalto, cobre, zinco, ferro, cádmio, entre outros. Esses metais, em concentrações elevadas podem ser muito prejudiciais ao meio ambiente por não serem biodegradáveis, possuírem meia vida longa e características de bioacumulação nos sistemas biológicos (MARTINES, 2005; ARAÚJO et al., 2011; DE ARAÚJO et al., 2016; JUEL et al., 2017).

Um dos problemas mais comuns em curtumes relacionados ao gerenciamento dos resíduos é em relação à destinação correta do lodo que é gerado em suas estações de tratamento de efluente. Caso este resíduo sólido não seja manuseado e disposto de forma correta pode acarretar prejuízos à saúde da comunidade e ambiental (MIRANDA et al., 2014; DE ARAÚJO et al., 2016; JUEL et al., 2017;).

A forma mais adequada de dispor esse tipo de resíduo seria o envio para aterros industriais ou incineradores, os quais possuem normas específicas para condicionar e mantê-lo em forma inerte, impossibilitando a contaminação do meio em que se encontra, porém devido aos altos custos de transporte, licenças e taxas, as indústrias junto com pesquisadores procuram soluções alternativas, como a destinação para fabricação de tijolos e cerâmicas, fabricação de biodiesel, ou na substituição de agregados do setor de construção (ALIBARDI; COSSU, 2016; JUEL et al., 2017).

Uma das destinações mais comentadas e avaliadas por pesquisadores nos últimos anos é a aplicação do lodo de curtume no solo com o intuito de aproveitar suas características químicas para auxiliar no desenvolvimento agrícola, porém estudos comprovam que é necessário um pré-tratamento desse lodo antes de ser aplicado no solo. Usualmente utiliza-se o método de compostagem, para minimizar os efeitos dos componentes que podem ser prejudiciais à vegetação e maximizar a viabilidade de transformar o resíduo sólido em possível produto (ARAUJO, 2011; ANGELI; BOINA; SÍGOLO, 2019; BERILLI et al., 2019).

3.4 Composto de lodo de curtume

O método de compostagem tem sido estudado em diversas pesquisas que avaliam o potencial do composto de lodo de curtume, o qual utiliza-se outros componentes como substrato, com a finalidade de auxiliar na fertilização do solo. A principal preocupação relacionada a essas pesquisas são as altas concentrações dos metais presentes no lodo de curtume e seus efeitos no crescimento das plantas e na qualidade do solo. (ALIBARDI; COSSU, 2016)

Em contrapartida pesquisadores como Araújo, (2008), Prado e Cunha (2011) e Araújo et al. (2020) defendem o uso do lodo de curtume no manejo de culturas agrícolas alegando que o resíduo além de fornecer matéria orgânica e nutrientes ao solo, reduziria a dependência de fertilizantes químicos. O resíduo sólido indesejado, o qual antes era uma preocupação, pode ser transformado em insumo agrícola com valor agregado.

Prado e Cunha (2011) salientam que o insumo agrícola à base de lodo de curtume possui propriedades que melhoram as condições do balanço de gás carbônico no solo, o que confere melhor estruturação do solo, tornando-o mais resistente aos processos naturais de erosão. Além dos benefícios já citados, a utilização do composto de lodo de curtume pode auxiliar na melhoria da agregação das partículas, diminuindo a densidade e aumentando a macroporosidade do solo, possibilitando maior capacidade de retenção de água, consequentemente aumentando a capacidade de troca de cátions (CTC) e ser fonte de micros e macronutrientes.

O composto de lodo de curtume possui muitas qualidades, mas as pesquisas não descartam a possibilidade de ocorrer contaminação do meio porque na composição pode conter compostos metálicos potencialmente perigosos, compostos orgânicos tóxicos e/ou patógenos. Sabe-se que a qualidade do lodo gerado depende do tipo de processo de produção e dos insumos químicos que foram utilizados nas etapas, por isso cada planta industrial pode possuir características específicas, gerando seus resíduos com composições diferentes de outras indústrias do mesmo setor (ARAÚJO et al., 2008; MARTINEZ et al., 2013; JOTHILINGAM et al., 2020)

Araújo et al. (2008), analisou o processo de compostagem do lodo de um curtume no interior do Estado de São Paulo, localizado no município de Presidente Prudente, com o intuito de avaliar a disponibilidade e a viabilidade da aplicação no solo desse composto produzido a partir de um resíduo sólido no solo.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) classifica os resíduos sólidos por meio da NBR 10004 (ABNT, 2004), a qual possui o objetivo de gerenciar adequadamente, por

meio da classificação dos resíduos sólido,s quanto aos seus potenciais riscos ao meio ambiente e à saúde pública. O anexo G, da NBR 10004, define a concentração máxima permitida dos elementos no extrato solubilizado do resíduo sólido. A Tabela 2 apresenta os valores estabelecidos na NBR 10004/2004 relacionados com os dados apresentados por Araújo et al. (2008) do lodo *in natura*.

Tabela 2 – Valores das concentrações do N, Cr, Fe e Mn do lodo *in natura* relacionados aos valores máximos permitidos pela NBR 10004/2004

	LODO <i>IN NATURA</i>	NBR 10004
ELEMENTO	(mg.kg⁻¹)	
N	29.100	10.000
Cr	1.800	50
Fe	2.700	30
Mn	5.100	100

Fonte: ARAÚJO et al. (2008); ABNT (2004) (Adaptado)

Entre os elementos que possuem valores de concentração acima dos parâmetros, destaca-se a alta concentração de cromo presente no lodo de curtume por ser considerado um metal potencialmente perigoso. Com base na legislação, os resultados da Tabela 2 indicam que o lodo *in natura* do curtume avaliado por Araújo et al. (2008) não poderia ser disposto diretamente no solo sem um tratamento prévio porque apresenta valores muito maiores do que é permitido pela NBR 10004/2004. Caso esse lodo fosse utilizado na agricultura de forma direta, tal medida poderia gerar graves danos à saúde ambiental.

No entanto, no trabalho apresentado por Araújo et al. (2008) observa-se mudança nas concentrações dos elementos presentes no composto de lodo de curtume. A Tabela 3 indica a diminuição da concentração de cromo, enxofre e cálcio, entre outros, após o processo de compostagem.

Tabela 3 – Composição química do lodo de curtume: antes e após o processo de compostagem

	LODO NATURA	LODO COMPOSTADO
ELEMENTO	(mg.kg⁻¹)	
N	29.100	10.200
P	6.100	5.500
K	1.000	1.200
Ca	128.000	48.500
Mg	10.800	3.800
S	13.000	5.300
Cr	1.800	700
Fe	2.700	5.700
Mn	5.100	7.100

Fonte: ARAÚJO et al. (2008)

A Norma Técnica P4.233, apresentada pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB (1999) , que define os critérios para uso do lodo de curtumes em áreas agrícolas, ressalta que devido às concentrações elevadas de nitrogênio e potencial de neutralização da acidez do solo, a utilização do lodo de curtume como insumo agrícola pode ser uma alternativa para o reaproveitamento desses resíduos.

3.5 Aplicação do composto de lodo de curtume em áreas agrícolas

Nos últimos anos houve quantidade crescente de pesquisas sobre a utilização do composto de lodo de curtume em diversas culturas agrícolas, Araújo (2011) avaliou os efeitos do composto de lodo de curtume aplicado no cultivo de milho e concluiu que a utilização do composto associado à fosforita proporcionou aumento do rendimento da produção. Em contrapartida, a pesquisa realizada por Oliveira et al. (2015) analisou os resultados da aplicação do composto de lodo de curtume em feijão-caupi após aplicações anuais consecutivas no solo por quatro anos. Concluiu que essa prática promoveu aumento na concentração de cromo no solo, consequentemente elevou o teor de cromo nas folhas e nos grãos do feijão-caupi.

Outro estudo realizado por Da Silva et al. (2015), indicou que apesar do aumento das concentrações dos elementos essenciais, a aplicação do lodo de curtume no solo, reduziu o crescimento das plantas de açaizeiro e promoveu o aumento dos teores de elementos potencialmente tóxicos, porém essas elevações nas concentrações não causam problemas ambientais.

Silva et al. (2011) concluiu que o composto de lodo de curtume associado com outros substratos produziu melhor enraizamento e favoreceu o desenvolvimento das mudas de pimenta ornamental e celosia.

Ressalta-se que a caracterização do composto de lodo de curtume é um dos aspectos mais importantes a serem avaliados, considerando que a sua composição pode variar conforme os processos industriais implementados, método de tratamento do efluente e insumos utilizados que influenciam nas características físicas, químicas e biológicas do lodo e do composto (CETESB, 1999; FERRARI, 2015).

Angeli e Sígolo (2019) apresentam um estudo preliminar sobre a utilização do composto de lodo de curtume em área de cultivo de braquiária. Os resultados iniciais da pesquisa indicam que há concentrações nos solos de alguns elementos, principalmente metais potencialmente perigosos.

Estudos também ressaltam a possibilidade de contaminação da plantação devido as características fisiológicas da braquiária (*Brachiaria decumbens*) serem favoráveis para sua utilização em processos de fitorremediação por absorver e acumular metais em suas raízes e folhas (ALMEIDA, 2012; ANGELI; SIGOLO, 2019)

Segundo Teixeira et al. (2006), o lodo de curtume é considerado fonte de nutrientes para a vegetação e condicionadores dos solos, tornando-o alternativa viável na preservação da qualidade ambiental. Conclui-se que a adição do lodo de curtume eleva o pH e os teores de matéria orgânica, cálcio e sódio do solo, comprovando que há benefícios em sua aplicação, porém o mesmo estudo de caso ressalva que altas doses do resíduo pode aumentar a salinidade do solo e a concentração de outros compostos perigosos, gerando consequências negativas em seu uso constante. Logo, torna-se necessário o controle da qualidade do solo, que pode ser por meio da comparação com a legislação vigente que determina os valores orientadores, visando à proteção e garantindo a qualidade para solos e água subterrâneas (TEIXEIRA et al., 2006; FERRARI, 2015; ANGELI; SIGOLO, 2019).

3.6 Legislações que determinam os valores orientadores para controle da qualidade dos solos no Brasil

Conforme enfatizado por Ferreira, Lofrano e Morita (2020), no Brasil destacam-se dois órgãos responsáveis pela regulamentação, orientação e fiscalização dos valores orientadores que visam garantir a qualidade dos solos no Brasil: i) o Conselho Nacional do Meio Ambiente e ii) a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB).

3.6.1 Conselho Nacional do Meio Ambiente e a Resolução nº 420

Em âmbito nacional, no ano de 1981 foi instituído o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) pela Lei 6.938/1981, que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, regulamentada pelo Decreto 99.874/90 (BRASIL, 1981).

Dentre as suas competências do CONAMA destacam-se:

- Estabelecer normas, critérios e padrões relativos ao controle e à manutenção da qualidade do meio ambiente, com vistas ao uso racional dos recursos ambientais, principalmente os hídricos;
- Estabelecer os critérios técnicos para a declaração de áreas críticas, saturadas ou em vias de saturação;
- Estabelecer sistemática de monitoramento, avaliação e cumprimento das normas ambientais;
- Avaliar regularmente a implementação e a execução da política e normas ambientais do País, estabelecendo sistemas de indicadores;
- Recomendar ao órgão ambiental competente a elaboração do Relatório de Qualidade Ambiental, previsto no inciso X do art. 9º da Lei 6.938, de 1981;
- Deliberar, sob a forma de resoluções, proposições, recomendações e moções, visando ao cumprimento dos objetivos da Política Nacional de Meio Ambiente (PNMA).

O Conselho Nacional do Meio Ambiente, dentro de suas competências, considerou que a existência de áreas contaminadas pode tornar-se um sério risco à saúde pública e ao meio ambiente, assim como ressaltou a necessidade de prevenir a contaminação das águas subterrâneas e dos solos que são considerados bens públicos. Com base nessas considerações, houve a necessidade de estabelecer critérios para definição de valores orientados para

prevenção da contaminação dos solos (BRASIL, 2009; FERREIRA; LOFRANO; MORITA, 2020).

O CONAMA (2009), publicou a Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009, que dispõe sobre os valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas (orgânicas e inorgânicas) e estabelece diretrizes para o gerenciamento de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Nesta resolução são utilizadas as seguintes definições:

- Valores Orientadores: são concentrações de substâncias químicas que fornecem orientação sobre a qualidade e as alterações do solo e da água subterrânea;
- Valor de Referência de Qualidade (VRQ): é a concentração de determinada substância que define a qualidade natural do solo, sendo determinado com base em interpretação estatística de análises físico-químicas de amostras de diversos tipos de solos;
- Valor de Prevenção (VP): é a concentração de valor limite de determinada substância no solo, tal que ele seja capaz de sustentar as suas funções principais de acordo com o art. 3º da Resolução nº 420.
- Valor de Investigação (VI): é a concentração de determinada substância no solo ou na água subterrânea acima da qual existem riscos potenciais, diretos ou indiretos, à saúde humana, considerando um cenário de exposição padronizado.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (2009), por exemplo, determina os seguintes valores de prevenção (VP) para os elementos cádmio $1,3 \text{ mg.kg}^{-1}$, cromo 75 mg.kg^{-1} , cobre 60 mg.kg^{-1} , selênio 5 mg.kg^{-1} e zinco 300 mg.kg^{-1} ; os quais são mais restritos do que os valores de investigação (VI) específico para áreas agrícolas.

O CONAMA (2009) não possui valores de referência de qualidade (VRQ) na sua resolução, porém estabelece que esses valores devam ser definidos pelas legislações estaduais. No caso do Estado de São Paulo, o responsável pela determinação dos valores orientadores é a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB).

3.6.2 Companhia Ambiental do Estado de São Paulo e a Decisão de Diretoria nº 256/2016/E

A partir do Decreto nº 50.079 em 24 de julho de 1968 foi criado o Centro Tecnológico de Saneamento Básico, vinculado à Secretaria da Saúde. Em agosto de 2009, após a criação de novos regimentos, entrou em vigor a Lei 13.542 de maio de 2009, que expandia suas competências e atribuições, criando assim a nova Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). Esta é uma agência do governo estadual, com os princípios de preservar e recuperar a qualidade do solo, água e ar e é responsável pela fiscalização, monitoramento, controle e licenciamento de atividades geradoras de poluição (CETESB, 2020).

Com o intuito de proteger e garantir a qualidade dos solos e águas subterrâneas, a CETESB (2016) publicou a Decisão de Diretoria nº 256/2016/E, que dispõe sobre os valores orientadores para solos e águas subterrâneas no Estado de São Paulo.

Como indicado na Resolução do CONAMA anteriormente citada, a CETESB criou e estabeleceu valores orientadores de referência de qualidade (VRQ) específicos para o Estado de São Paulo. Para alguns elementos foram mantidos os mesmos valores de prevenção (VP) e investigação (VI) determinados pela Resolução nº 420 estabelecidos pelo CONAMA. Para os demais compostos a CETESB (2016) estabeleceu valores orientadores mais restritivos. Esses valores orientadores tem por objetivo monitorar a qualidade do solo e das águas subterrâneas, por exemplo, evitando ou controlando que possíveis fontes de poluição exerçam atividades que prejudiquem a saúde pública e o meio ambiente.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Área do estudo

A área estudada está localizada na cidade de Presidente Prudente, interior do Estado de São Paulo. O Curtume colaborador iniciou suas atividades no ano 2000, produzindo apenas couros bovinos *wet blue* e ao longo dos anos inseriu novos processos em sua linha de produção, até poder ser classificado como um curtume integrado.

Desde o ano 2004 o curtume realiza o processo completo de beneficiamento das peles, atuando desde a limpeza até o processo de tingimento do couro, gerando um produto final, o qual pode ser enviado diretamente para a linha de produção de estofados automotivos, por exemplo. Com o aumento da linha de produção houve expansão em sua estrutura, atualmente o curtume possui área construída superior a 120 mil m².

A usina de compostagem que pertencente ao curtume colaborador foi inaugurada em 2016. Este curtume gera, em média, 20m³ de lodo por dia. Este lodo é utilizado para a produção do composto orgânico a partir do método de compostagem. O lodo que é produzido no decantador primário, segue para a usina de compostagem, localizada na área do curtume.

O lodo enviado para a usina de compostagem é formado por 78% de matéria sólida e 22% de água, tendo em sua composição 21% de CO₂ e 1,29% de N total. No processo de compostagem do lodo de curtume é adicionado bagaço de cana, com a finalidade de resíduo estruturante, seguindo a proporção de duas partes para uma de lodo. A compostagem é realizada em leiras, com revolvimento mecânico semanal, por um período de 90 dias. A Figura 2 mostra a área da produção do composto de lodo de curtume, pátio de armazenamento e a localização da usina de compostagem na planta industrial do curtume.

O composto orgânico produzido pelo curtume a base de lodo, possui a finalidade de fertilizar o cultivo de braquiária que é designada como fonte de alimentação para o gado de corte. O composto de lodo de curtume estava sendo aplicado de forma constante no solo (seguindo instruções recomendadas pelo agrônomo responsável) e não havia registros anteriores da quantificação dos elementos estudados.

A área da coleta das amostras (22°10'1.04"S de latitude e 51°28'34.66"O de longitude), local onde está sendo cultivado a braquiária (*Brachiaria decumbens*) e disposto o composto de lodo de curtume, está situada próxima a planta do curtume.

Figura 2 – (a e b) Área da produção do composto de lodo de curtume, (c) pátio de armazenamento e (d) localização da usina de compostagem na planta industrial do curtume

Fonte: Imagens editada pelo autor

A Figura 3 exhibe a área que está sendo disposto o composto de lodo do curtume na forma de insumo agrícola.

Figura 3 – Localização da área de estudo a partir do mapa do Estado de São Paulo (a), da área de contorno (b) e das pastagens cultivadas com o composto de lodo de curtume (c)

Fonte: Imagens editadas pelo autor

A Figura 4 mostra a plantação de braquiária fertilizada a base do composto de lodo de curtume.

Figura 4 – Plantação de braquiária (*Brachiaria decumbens*) (a) e (b)

Fonte: Imagens registradas pelo autor

4.2 Procedimento para coletas das amostras

Os pontos de coletas das amostras de solo, folhas e raízes podem ser vistos na figura 4. Foram marcados oito pontos para a coleta de coleta, sendo identificados como VP1, VP2, VP3, VP4, VP5, VP6, VP7 e amostra VPB (amostra de referência). A amostra de referência foi coletada em um local que não havia cultivo da braquiária, indicando que não recebeu fertilização com o composto de lodo de curtume.

A distância entre os pontos de coleta VP1, VP2, VP3, VP4, VP5, VP6, VP7 foi de 50 metros, com exceção do espaçamento entre os pontos VP4 e VP5, onde houve a necessidade de prolongar a distância em mais 2 metros, devido a um desnível no local. O ponto de coleta mais distante é o VPB, que estava há aproximadamente 100 metros de distância do perfil dos pontos de coleta VP1 a VP7.

4.2.1 Coleta das amostras de solo

O perfil dos pontos de coleta apresentado na Figura 5 foi determinado com o intuito de garantir uma amostragem com variação de topografia seguindo o fluxo das águas pluviométricas, as quais tendem a representar a área de cultivo.

Figura 5 – Demarcação da área de cultivo de braquiária e representação dos pontos de coleta

Fonte: Google Earth – modificado pelo autor

Segundo Berton (2000) os cátions metálicos possuem características físico-químicas que induzem a sua retenção na faixa de profundidade próxima a superfície. Visto que seria realizada a análise quantitativa de metais presentes no solo, cujas fontes podem ser antrópicas, foi coletado amostras de solo com até 20 centímetros de profundidade nos pontos apresentados pela Figura 6.

Figura 6 – Pontos de coleta das amostras de solos com profundidades de 0 a 10 centímetros e de 10 a 20 centímetros

Fonte: Imagem editada pelo autor

Borges e Accioly (2009) reforçam que a profundidade de amostragem do solo para culturas perenes, culturas anuais e pastagens é de 0 a 20 centímetros. Para cada ponto destacado foram coletadas 2 amostras de solo com profundidades diferentes, seguindo esse preceito, com o auxílio de um trado holandês, correspondente à Figura 7. A primeira amostra de solo possuía profundidade de 0 a 10 centímetros e a segunda amostra na faixa de 10 a 20 centímetros de profundidade. Todas as amostras de solos foram armazenadas em sacos plásticos individuais.

Figura 7 – Coleta de solo com auxílio do trado holandês (a) e (b)

Fonte: Imagens registradas pelo autor

4.2.2 Coleta das amostras de vegetação

As amostras da vegetação foram coletadas e armazenadas em sacos plásticos, seguindo os pontos marcados na Figura 5, com exceção do ponto de referência (VPB), porque localiza-se em área que não há cultivo.

As amostras de braquiária (*Brachiaria decumbens*) cultivadas no local do estudo, foram retiradas do solo manualmente, de forma cuidadosa para não lesar as folhas e depreciar as raízes. As amostras foram armazenadas em sacos plásticos individuais. A Figura 8 apresenta as amostras de vegetação que foram coletadas.

Figura 8 – Amostras coletadas da vegetação – Braquiária (*Brachiaria decumbens*) (a) e (b)

Fonte: Imagens registradas pelo autor

4.3 Tratamento das amostras

As amostras de solos e braquiárias (*Brachiaria decumbens*) foram encaminhadas para o Laboratório de Tratamento de Amostras (LTA) do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (USP).

4.3.1 Pré-tratamento das amostras de solo

As amostras de solo foram secas em estufa a 60°C por 5 dias, até atingir peso constante. Em seguida, foram quarteadas, garantindo porção homogênea da amostra e foram embaladas em sacos plásticos individuais com suas devidas identificações.

Para a realização da análise granulométrica por difração a laser, o Laboratório de Sedimentologia (GSA), informou que as partículas de solos deveriam ser menores, então foi necessário que as amostras de solos fossem peneiradas em malha de aço inox com abertura de 2mm.

O Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT), que realizou as análises químicas não exigiu que outro tratamento fosse feito nas amostras de solos, com exceção da secagem.

As Figuras 9 e 10 apresentam as amostras de solo dos pontos coletados nas profundidades de 0 a 10 cm e de 10 a 20 cm, respectivamente

Figura 9 – Amostras de solos coletados na profundidade de 0 a 10 centímetros

Fonte: Imagens registradas pelo autor

Figura 10 – Amostras de solos coletados na profundidade de 10 a 20 centímetros

Fonte: Imagens registradas pelo autor

4.3.2 Tratamento das amostras de vegetação

As amostras de braquiária (*Brachiaria decumbens*) foram secas em estufa a 60°C por 10 dias, até atingir peso constante, em seguida as raízes e a folhas foram separadas. As folhas e a raízes foram trituradas e embaladas em sacos plásticos. As Figuras 11 e 12 mostram as amostras vegetais que foram preparadas e nomeadas por seus respectivos pontos de coletas.

Figura 11 – Amostras das folhas da braquiária (*Brachiaria decumbens*) secas e trituradas

Fonte: Imagens registradas pelo autor

Figura 12 – Amostras das raízes da braquiária (*Brachiaria decumbens*) secas e trituradas

Fonte: Imagens registradas pelo autor

4.4 Procedimentos analíticos

Foram realizadas análises para determinar a granulometria das amostras de solo e análises de quantificação química nas amostras de solo, raízes e folhas de braquiária (*Brachiaria decumbens*).

4.4.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica foi realizada no Laboratório de Sedimentologia (GSA) do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. A análise granulométrica foi realizada por meio do granulômetro modelo Malvern Mastersizer 2000. A técnica aplicada para realizar a análise granulométrica por difração de laser, utilizou o acessório Hydro 2000MU (A), com velocidade de bomba 2500 rpm, ultrassom 14%, tempo do ultrassom 1 minuto e água destilada como dispersante. O software “Momento” (em Lotus) calculou os parâmetros estatísticos pelo método analítico dos momentos de Pearson.

Foram analisadas as amostras de solo com 0 a 10 cm de profundidade e 10 a 20 cm de profundidade, porém devido à distância entre pontos de coleta das amostras e por estarem na mesma área de cultivo apenas os pontos VPB, VP1, VP3, VP5 e VP7 foram analisados. Mesmo que não tenha sido realizada a análise granulométrica em todos os pontos, foi possível obter resultados satisfatórios.

4.4.2 Caracterização química

As amostras de solos, raízes e folhas da vegetação previamente preparadas foram enviadas para o Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) – Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica/USP. O LCT possui o Sistema De Gestão (SGQ) focado na certificação da norma ABNT NBR ISO 90001:2015 e no credenciamento no INMETRO pela norma ABNT NBR ISO/IEC 17025:2017, garantindo o comprometimento com a qualidade dos serviços analíticos e assegurando a qualidade dos resultados reportados.

As amostras foram analisadas por meio da técnica de Espectrometria de Emissão Atômica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES), marca Horiba, modelo Ultima Expert, com visão radial e sistema de varredura sequencial.

No laboratório de análises químicas foi realizado um processo de tratamento antes de ser feita a leitura pelo equipamento de ICP-OES, pelo método de digestão multiácida, também conhecida como digestão quatro ácidos.

Pela técnica de ICP-OES foi possível quantificar as concentrações de alumínio (Al), cádmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), potássio (K), manganês (Mn), fósforo (P), enxofre (S), selênio (Se) e zinco (Zn) presente nas amostras de solos, raízes e folhas.

Desafortunadamente, não foi possível realizar triplicatas em todas as amostras coletadas, devido à falta de recursos disponíveis. Porém, com o intuito de assegurar a confiabilidade dos resultados, em determinadas amostras foi viável a aplicação de métodos estatísticos, determinando a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação.

A partir dos resultados do desvio padrão e coeficiente de variação pode-se expressar a precisão analítica, este parâmetro que avalia a proximidade entre várias medidas efetuadas na mesma amostra e pode ser considerada no nível de repetitividade, precisão intermediária e de reprodutividade (BRITO et al., 2003)

A amostra de solo com profundidade de 0 a 10 cm coletada no ponto VP6 e as amostras de solos com profundidades de 10 a 20 cm, coletadas nos pontos VP6 e VP7, foram analisadas em triplicata. Devido à quantidade de material disponível para análise, as folhas coletadas no ponto VP4 e as raízes coletadas no ponto VP7, foram analisadas em duplicata.

5 RESULTADOS

5.1 Granulometria por difração a laser

A Tabela 4 apresenta os resultados das análises granulométricas das amostras de solo coletadas nos pontos VPB, VP1, VP3, VP5 e VP7, a partir dos resultados obtidos. Observa-se que há variação entre as frações de areia, argila e silte presentes nas amostras de solo, mesmo que todas tenham sido coletadas na mesma área.

Tabela 4 – Resultados das análises granulométricas do solo (profundidade de 0 a 10 cm e de 10 a 20 cm) na área de cultivo da braquiária (*Brachiaria decumbens*)

Faixa Granulométrica (%)													
Amostra		Areia						Silte					Argila
		Muito Grossa	Grossa	Média	Fina	Muito Fina	Total	Grosso	Médio	Fino	Muito Fino	Total	
Ponto	Profundidade (cm)	0,25	0,75	1,75	2,75	3,75		4,5	5,5	6,5	7,5		9
VP1	0 a 10	0,036	0,135	9,157	30,556	29,974	69,858	13,536	6,628	4,293	2,419	26,876	3,266
	10 a 20	0,000	0,000	8,609	32,792	31,073	72,474	12,558	5,816	3,996	2,140	24,510	3,016
VP3	0 a 10	0,000	0,126	3,566	13,001	19,114	35,807	19,212	17,673	12,857	6,365	56,106	8,087
	10 a 20	0,000	0,108	3,696	13,606	17,010	34,420	15,541	17,343	14,127	7,640	54,651	10,929
VP5	0 a 10	0,000	0,000	6,280	32,621	33,341	72,242	13,735	6,108	3,611	1,774	25,228	2,530
	10 a 20	0,000	0,000	11,826	39,312	28,875	80,013	8,573	4,897	3,052	1,427	17,950	2,038
VP7	0 a 10	0,000	0,000	7,605	32,968	28,015	68,588	10,361	8,314	5,874	2,771	27,320	4,092
	10 a 20	0,000	0,000	5,568	23,738	20,394	49,701	7,786	12,229	13,016	7,024	40,055	10,244
VPB	0 a 10	0,014	0,501	5,188	11,245	15,224	32,172	22,998	20,903	10,923	5,312	60,136	7,693
	10 a 20	0,000	0,297	4,697	10,891	14,162	30,480	21,382	21,669	12,208	5,863	61,121	8,832

Fonte: Dados experimentais

Conforme apresentado na Tabela 4, as amostras de solo (para ambas as profundidades) dos pontos VP1, VP5 e VP7 possuem porcentagem maior de areia em sua composição, em contrapartida, as amostras de solo dos pontos VP3 e VPB possuem porcentagens de silte e argila maiores quando comparadas com as demais amostras.

5.2 Caracterização química do solo

As Tabelas 5 e 6 apresentam os resultados das análises químicas (unidade de medida em mg.kg⁻¹) realizadas para obter as concentrações de alumínio (Al), cádmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), potássio (K), manganês (Mn), fósforo (P), enxofre (S), selênio (Se) e zinco (Zn)

presentes nos solos coletados nos pontos VP1, VP2, VP3, VP4, VP5, VP6, VP7 e VPB (ponto de referência).

Tabela 5 – Resultados da quantificação da concentração dos elementos presentes no solo coletado com profundidade de 0 a 10 centímetros

Solo - profundidade de 0 a 10 cm (mg.kg ⁻¹)									
Elemento	LQ*	VP1	VP2	VP3	VP4	VP5	VP6	VP7	VPB
Al	4	10100	15500	21800	15800	8220	11400	14300	31200
Cd	2	<LQ	<LQ	3	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	2
Cr	3	58	71	83	73	61	100	70	72
Cu	1	9	10	16	8	7	6	10	17
K	8	2460	7800	3250	9160	1340	5430	1690	2940
Mn	1	445	674	482	205	318	180	300	217
Na	5	164	363	211	240	120	113	120	193
P	3	430	201	340	224	220	144	180	200
S	7	790	225	730	325	720	186	670	770
Se	5	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	6	<LQ	12
Zn	1	23	3	20	<LQ	13	<LQ	14	19
* Limite de quantificação									
Concentrações acima dos valores apresentados no ponto de referência (VPB)									

Fonte: Dados experimentais

Tabela 6 – Resultados da quantificação da concentração dos elementos presentes no solo coletado com profundidade de 10 a 20 centímetros

Solo - profundidade de 10 a 20 cm (mg.kg ⁻¹)									
Elemento	LQ*	VP1	VP2	VP3	VP4	VP5	VP6	VP7	VPB
Al	4	10300	18400	24600	27000	6290	12400	30800	37500
Cd	2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Cr	3	70	76	137	181	109	114	137	109
Cu	1	8	10	20	13	7	42	18	17
K	8	5090	9430	6880	14500	2350	3900	4460	8490
Mn	1	393	858	769	398	321	240	306	228
Na	5	250	308	493	506	231	285	548	452
P	3	368	124	279	187	199	158	146	223
S	7	257	153	363	209	200	52	226	336
Se	5	<LQ	<LQ	11	<LQ	12	8	5	12
Zn	1	<LQ	2	<LQ	6	<LQ	4	<LQ	<LQ
* Limite de quantificação									
Concentrações acima dos valores apresentados no ponto de referência (VPB)									

Fonte: Dados experimentais

Nas Tabelas 5 e 6 observa-se que há elevação na concentração dos elementos analisados no solo onde está sendo aplicado diretamente o composto de lodo de curtume como insumo agrícola quando comparado com os valores do ponto de referência (VPB).

Na maioria das amostras de solo analisadas, os metais cromo, manganês, sódio e potássio possuem concentrações com valores acima das concentrações presentes no ponto VPB, porém no restante das amostras, esses metais apresentam valores bem próximos aos valores que excederam as concentrações das amostras coletadas no ponto de referência (VPB).

Nota-se que em todas as amostras coletadas há concentrações, de no mínimo três metais, que estão acima dos valores de referência obtidos no ponto VPB.

As concentrações de cádmio, selênio e zinco em alguns pontos não foram quantificadas, apesar da técnica de ICP-OES ser sensível, esses elementos possuem valores muito baixos presentes nas amostras de solos.

5.3 Caracterização química das folhas da braquiária (*Brachiaria decumbens*)

A Tabela 7 apresenta os resultados das análises que determinaram as concentrações (unidade de medida em mg.kg^{-1}) de alumínio (Al), cádmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), potássio (K), manganês (Mn), fósforo (P), enxofre (S), selênio (Se) e zinco (Zn) presentes nas amostras de folhas da braquiária (*Brachiaria decumbens*) que foram coletadas nos pontos VP1, VP2, VP3, VP4, VP5, VP6 e VP7.

Observa-se na Tabela 7 que em nenhuma amostra das folhas de braquiária analisadas foi possível quantificar as concentrações de cádmio e selênio, apesar da sensibilidade da técnica utilizada esses elementos apresentam baixo teor de concentração nas folhagens, não sendo possível realizar a leitura no aparelho de ICP-OES.

As análises foliares apresentam concentrações com valores de potássio elevados, seguido pelos valores das concentrações de fósforo, enxofre, alumínio, sódio e manganês. Em contrapartida, entre os elementos que foram analisados nas amostras das folhas, as concentrações dos metais cobre, zinco e cromo apresentam as menores concentrações.

Angeli, Boina e Sígolo (2019) quantificaram a concentração de cobre presente no lodo de curtume *in natura*, o qual apresentou valor ($3,926 \text{ mg.L}^{-1}$) acima do valor máximo ($2,0 \text{ mg.L}^{-1}$) para amostras solubilizadas estabelecido pela norma ABNT NBR 10004:2004, que classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e a saúde pública. A

presença de concentrações mais elevadas no lodo de curtume *in natura* pode estar diretamente relacionada aos valores de cobre presente nas folhas da braquiária.

Tabela 7 – Resultados da quantificação da concentração dos elementos presentes nas folhas da braquiária (*Brachiaria decumbens*)

Folhas (mg.kg ⁻¹)								
Elemento	LQ*	VP1	VP2	VP3	VP4	VP5	VP6	VP7
Al	4	960	2840	1300	2240	980	4120	570
Cd	2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Cr	3	10	25	3	30	54	62	18
Cu	1	83	26	146	26	17	17	24
K	8	14800	33600	8340	34500	9160	23700	11900
Mn	1	199	344	805	317	197	124	79
Na	5	536	1339	400	560	443	812	446
P	3	3290	3170	3230	4720	2360	2690	2210
S	7	2010	2230	3560	2030	1410	1780	1820
Se	5	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Zn	1	108	66	133	72	60	40	45
* Limite de quantificação								

Fonte: Dados experimentais

5.4 Caracterização química das raízes da braquiária (*Brachiaria decumbens*)

A Tabela 8 apresenta os resultados das análises de quantificação das concentrações (unidade de medida em mg.kg⁻¹) dos elementos alumínio (Al), cádmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), potássio (K), manganês (Mn), fósforo (P), enxofre (S), selênio (Se) e zinco (Zn) presentes nas amostras das raízes da braquiária (*Brachiaria decumbens*) coletadas nos pontos VP1, VP2, VP3, VP4, VP5, VP6 e VP7.

Assim como nas folhas, observam-se concentrações maiores de potássio, fósforo, alumínio e enxofre nas raízes. A Tabela 8 também apresenta que não foi possível quantificar as concentrações de cádmio para nenhuma amostra e apenas nos pontos VP1, VP4 e VP7 foi possível determinar as concentrações de selênio nas amostras das raízes da braquiária que foram analisadas.

Os metais cromo, cobre e zinco possuem os menores valores de concentrações presentes nas raízes quando comparados com os outros elementos analisados.

Tabela 8 – Resultados da quantificação da concentração dos elementos presentes nas raízes da braquiária (*Brachiaria decumbens*)

Raízes (mg.kg ⁻¹)								
Elemento	LQ*	VP1	VP2	VP3	VP4	VP5	VP6	VP7
Al	4	5800	7480	25000	6150	5400	8910	11900
Cd	2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Cr	3	46	39	58	26	54	106	64
Cu	1	11	13	27	11	10	10	13
K	8	15700	7380	7110	6830	12300	8570	7400
Mn	1	373	627	415	165	276	209	196
Na	5	335	311	738	219	646	217	299
P	3	1060	620	850	770	780	410	440
S	7	880	440	1100	620	710	430	510
Se	5	18	<LQ	<LQ	16	<LQ	<LQ	15
Zn	1	28	16	37	17	15	13	8
* Limite de quantificação								

Fonte: Dados experimentais

5.5 Análises Estatísticas

Para garantir a confiabilidade e qualidade das análises físico-químicas, em algumas amostras foram realizadas análises em duplicata ou triplicata, no caso das análises granulométricas, os cálculos estatísticos foram realizados pelo software padrão utilizado pelo laboratório analítico (GSA).

5.5.1 Dados estatísticos da análise de granulometria a laser

O laboratório de sedimentologia (GSA) calculou estatísticas de distribuição granulométrica (phi) pelo teste de Pearson, com o auxílio do software “Momento” (em Lotus), para verificar a significância dos coeficientes de correlação obtidos nas análises, esses resultados são apresentados na Tabela 9.

A partir dos cálculos estatísticos do desvio padrão apresentados na Tabela 9, nota-se que os valores estão baixos, o que indica pouca variação da média dos resultados, confirmando que os dados obtidos possuem tendência mais homogênea, com valores próximos à média. Os dados

que foram apresentados na Tabela 4, referente as frações de areia, silte e argila presentes no solo, possuem características uniformes.

Tabela 9 – Estatísticas da distribuição granulométrica (phi) – Teste de Pearson

Amostra		Incluindo Material Pelítico				Excluindo Material Pelítico			
Ponto	Profundidade (cm)	Diâmetro médio	Desvio Padrão	Assimetria	Curtose	Diâmetro médio	Desvio Padrão	Assimetria	Curtose
VP1	0 a 10	3,746	1,672	1,46	5,475	2,898	0,696	-0,314	2,454
	10 a 20	3,682	1,61	1,62	6,066	2,917	0,66	-0,168	2,186
VP3	0 a 10	4,999	1,959	0,6	3,085	3,068	0,702	-0,528	2,541
	10 a 20	5,197	2,107	0,477	2,691	3,01	0,696	-0,412	2,431
VP5	0 a 10	3,694	1,502	1,662	6,464	2,984	0,627	-0,173	2,181
	10 a 20	3,38	1,464	1,8	7,014	2,807	0,655	-0,045	2,216
VP7	0 a 10	3,867	1,771	1,386	4,7	2,898	0,633	-0,086	2,185
	10 a 20	4,777	2,23	0,627	2,434	2,898	0,634	-0,105	2,201
VPB	0 a 10	4,951	1,932	0,509	3,308	2,927	0,823	-0,49	2,35
	10 a 20	5,092	1,962	0,4464	3,147	2,938	0,796	-0,446	2,3

Fonte: Dados experimentais

5.5.2 Dados estatísticos das análises químicas

Apesar da eficiência e confiabilidade do laboratório analítico (LCT) ser fidedigna, análises estatísticas referentes às amostras de solos, raízes e folhas foram realizadas em pontos de coletas específicos, devido à carência de recursos não foi possível realizar análises em triplicata em todas as amostras conforme já mencionado anteriormente.

Em relação aos metais, cádmio, selênio e zinco presentes nas amostras de solos, não foi possível aplicar a análise estatística porque as amostras não apresentaram valores suficientes que pudessem ser quantificados.

Nas amostras de solos coletadas no ponto VP6 e a amostra de solo com profundidade de 10 a 20 cm coletada no ponto VP7, foram realizadas análises quantitativas em triplicata, os resultados analíticos e estatísticos estão apresentados nas Tabelas 10 e 11, respectivamente.

Um ponto a ser destacado na Tabela 10 é que as concentrações de cobre presentes no solo 0 a 10 cm de profundidade, apresentaram os mesmos valores obtidos nas 3 análises da mesma amostra, ou seja, esse resultado possui alto grau de precisão.

Já para o solo mais profundo presente no ponto VP6, os resultados das análises estatísticas resultaram em valores elevados do coeficiente de variação em relação às concentrações de sódio e cobre. Os valores de desvio padrão e coeficiente de variação referentes

às concentrações dos demais metais não representam muitas variações, confirmando a homogeneidade das amostras, ou seja, baixa dispersão dos valores.

Tabela 10 – Análise estatística das amostras de solos coletadas no ponto VP6

Ponto de Coleta		VP6											
Elemento	LQ*	Solo 0 - 10			Média	Desvio Padrão	CV (%)	Solo 10 - 20			Média	Desvio Padrão	CV (%)
		(mg.kg ⁻¹)											
Al	4	11400	11700	11900	11666,67	251,66	2,16	12400	13800	13700	13300,00	781,02	5,87
Cd	2	<LQ	<LQ	<LQ	-	-	-	<LQ	<LQ	<LQ	-	-	-
Cr	3	100	111	112	107,67	6,66	6,18	114	116	105	111,67	5,86	5,25
Cu	1	6	6	6	6,00	-	-	42	8	9	19,67	19,35	98,38
K	8	5430	5460	4440	5110,00	580,43	11,36	3900	4640	5780	4773,33	947,07	19,84
Mn	1	180	192	181	184,33	6,66	3,61	240	250	229	239,67	10,50	4,38
Na	5	113	70	106	96,33	23,07	23,95	285	80	68	144,33	121,97	84,50
P	3	144	120	103	122,33	20,60	16,84	158	88	82	109,33	42,25	38,65
S	7	186	165	214	188,33	24,58	13,05	52	139	136	109,00	49,39	45,31
Se	5	6	<LQ	<LQ	-	-	-	8	13	<LQ	-	-	-
Zn	1	<LQ	<LQ	<LQ	-	-	-	4	<LQ	<LQ	-	-	-
CV - Coeficiente de Variação													
* Limite de Quantificação													

Fonte: Dados experimentais

A Tabela 11 apresenta a análise estatística aplicada nos resultados analíticos da amostra de solo coletada no ponto VP7. Nesta amostra, os valores do desvio padrão e do coeficiente de variação não apresentam discrepâncias, representando análises uniformes com baixo grau de dispersão.

Tabela 11 - Análise estatística da amostra de solo coletada no ponto VP7

Ponto de Coleta		VP7					
Elemento	LQ*	Solo 10 - 20		Média	Desvio Padrão	CV (%)	
		(mg.kg ⁻¹)					
Al	4	30800	31400	31700	31300	458,26	1,46
Cd	2	<LQ	<LQ	<LQ	-	-	-
Cr	3	137	105	116	119,33	16,26	13,62
Cu	1	18	13	13	14,67	2,89	19,68
K	8	4460	4320	3990	4256,67	241,32	5,67
Mn	1	306	219	229	251,33	47,61	18,94
Na	5	548	394	412	451,33	84,20	18,66
P	3	146	127	141	138,00	9,85	7,14
S	7	226	245	269	246,67	21,55	8,74
Se	5	5	<LQ	<LQ	-	-	-
Zn	1	<LQ	<LQ	<LQ	-	-	-
CV - Coeficiente de Variação							
* Limite de Quantificação							

Fonte: Dados experimentais

Nas amostras de folhas e raízes foram realizadas análises em duplicata e os resultados estão expostos nas Tabelas a seguir. A Tabela 12 contém os resultados dos cálculos de desvio padrão e coeficiente de variância da amostra de folha da braquiária coletada no ponto VP4.

Tabela 12 - Análise estatística da amostra de folhas de braquiária (*Brachiaria decumbens*) coletada no ponto VP4

Ponto de coleta		VP4				
Elemento	LQ*	Folha		Média	Desvio Padrão	CV (%)
		(mg.kg ⁻¹)				
Al	4	2240	2330	2285	63,64	2,79
Cd	2	<LQ	<LQ	-	-	-
Cr	3	30	26	28	2,83	10,10
Cu	1	26	22	24	2,83	11,79
K	8	34500	34300	34400	141,42	0,41
Mn	1	317	306	311,5	7,78	2,50
Na	5	560	516	538	31,11	5,78
P	3	4720	4160	4440	395,98	8,92
S	7	2030	1930	1980	70,71	3,57
Se	5	<LQ	<LQ	-	-	-
Zn	1	72	63	67,5	6,36	9,43
CV - Coeficiente de Variação						
* Limite de Quantificação						

Fonte: Dados experimentais

Para os metais, cádmio e selênio, não foi possível aplicar as análises estatísticas porque não foi possível quantificar os valores das concentrações. Em relação aos metais restantes que foram analisados, percebe-se que os valores de desvio padrão e coeficiente de variação apresentam valores satisfatórios, confirmando a homogeneidade e baixa discrepância.

A Tabela 13 apresenta os resultados dos cálculos de desvio padrão e coeficiente de variação realizados nas amostras de raiz coletadas no ponto VP7. Para amostra de raiz não foi possível quantificar as concentrações apenas do elemento cádmio.

Ao contrário dos valores obtidos pelas análises estatísticas das amostras anteriores, para a amostra de raiz obtiveram-se valores de desvio padrão e coeficiente de variação maiores, indicando que a amostra possui perfil analítico mais heterogêneo e com maior dispersão em relação aos valores das concentrações. Porém percebe-se que o coeficiente de variação não ultrapassa 50%, assegurando a qualidade analítica, como se pode observar na Tabela 13.

Tabela 13 - Análise estatística da amostra de raiz de braquiária (*Brachiaria decumbens*) coletada no ponto VP7

Ponto de coleta		VP7				
Elemento	LQ*	Raiz		Média	Desvio Padrão	CV (%)
		(mg.kg ⁻¹)				
Al	4	11900	12800	12350	636,40	5,15
Cd	2	<LQ	<LQ	-	-	-
Cr	3	64	77	70,5	9,19	13,04
Cu	1	13	16	14,5	2,12	14,63
K	8	7400	13500	10450	4313,35	41,28
Mn	1	196	221	208,5	17,68	8,48
Na	5	299	544	421,5	173,24	41,10
P	3	440	750	595	219,20	36,84
S	7	510	920	715	289,91	40,55
Se	5	15	14	14,5	0,71	4,88
Zn	1	8	14	11	4,24	38,57
CV - Coeficiente de Variação						
* Limite de Quantificação						

Fonte: Dados experimentais

De modo geral, os resultados dos cálculos estatísticos apresentaram resultados satisfatórios, confirmando a precisão das análises físico-químicas e indicando a confiabilidade dos resultados apresentados.

6 DISCUSSÕES

6.1 Granulometria dos solos

A partir dos resultados indicados na Tabela 4, que foram obtidos pelas análises de granulometria por difração a laser, os Gráficos 2 e 3 apresentam comparação em porcentagem (%) entre as frações de areia, silte e argila dos solos coletados com profundidade de 0 a 10 cm e 10 a 20 cm.

Gráfico 2 – Frações granulométricas do solo coletado com profundidade de 0 a 10 centímetros

Fonte: Dados experimentais

Gráfico 3 – Frações granulométricas do solo coletado com profundidade de 10 a 20 centímetros

Fonte: Dados experimentais

Conforme descrito por Plaster (2014, p. 70-71), as frações dos solos são divididas em 3 classes:

- Areia - é a maior fração do solo. Composta por minerais de quartzo e outros minerais em quantidades bem menores. Quanto maior a quantidade de areia no solo, cria-se poros maiores, tornando mais propício os processos de infiltração e lixiviação, diminuindo a retenção de água e nutrientes no solo.
- Silte – possui tamanho mediano na fração do solo. Possui habilidade de retenção de água para nutrição das plantas, porém pode gerar processos erosivos por não possuir características de aderência tão fortes quanto as argilas.
- Argila – são as menores frações do solo. Possui características diferentes das frações citadas anteriormente, além de possuir habilidade para reter água e nutrientes, suas características químicas e físicas proporcionam reações entre os compostos presentes nesse solo, facilitando a retenção de metais, por exemplo.

Analisando os Gráficos 2 e 3, observa-se que em ambas as profundidades coletadas os pontos VP1, VP5 e VP7 apresentam a fração maior de areia, seguido pela fração de silte e uma quantidade inferior de argila. Seguindo a teoria de Plaster (2014, p. 70), esses pontos possuem solo mais arenoso, com partículas e poros maiores, favorecendo a circulação da água pelo solo.

Em um solo com características arenosas os elementos tendem a se mobilizar com mais facilidade, seguindo essa premissa há alta probabilidade de processos de lixiviação e percolação ocorrerem ou os elementos químicos serem absorvidos pela vegetação (RUIZ, 2005; BEBÉ et al., 2009).

Os pontos VP3 e VPB (para ambas as profundidades coletadas) possuem a fração de silte superior a fração de areia e fração de argila sendo maior comparadas às frações dos outros pontos. Para muitas finalidades os solos que possuem texturas médias são considerados ideais, no geral, possuem frações médias, grossas e finas em proporções favoráveis para usos variados, por exemplo, podem ser utilizados em construções, fabricação de tijolos e na agricultura (RUIZ, 2005; KITAMURA et al., 2007; PLASTER, 2014, p. 71).

Teoricamente, esse solo possui características que tendem a beneficiar o cultivo nesse solo porque retém água sem excesso, não possuem alta aderência e a probabilidade de ocorrência de lixiviação é menor em relação aos outros pontos com características arenosas (PLASTER, 2014, p. 71; KITAMURA et al., 2007).

Apesar das amostras de solo apresentarem volumes de frações diferentes, estão localizadas na mesma área. Pode-se considerar que o solo estudado está na faixa das frações médias, tornando-o uma área favorável para o cultivo, mas que também apresenta características que favorecem a mobilidade dos compostos químicos pelos horizontes do solo.

6.2 Caracterização química dos solos, folhas e raízes

Utilizando os dados apresentados anteriormente nas Tabelas 5, 6, 7 e 8, os gráficos a seguir fazem comparação entre os valores das concentrações de alumínio (Al), cádmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), potássio (K), manganês (Mn), fósforo (P), enxofre (S), selênio (Se) e zinco (Zn). Relaciona-se os resultados das análises químicas das amostras de solos, raízes, folhas e os pontos de coleta VP1, VP2, VP3, VP4, VP5, VP6, VP7, com exceção do ponto VPB (ponto de referência) que apresenta apenas os resultados das análises do solo.

O primeiro elemento a ser observado no Gráfico 4 é o alumínio para o qual foi possível determinar a sua concentração em todos os pontos de coleta.

Gráfico 4 – Concentrações de alumínio presente nos solos, folhas e raízes após aplicações do composto de lodo de curtume

Fonte: Dados experimentais

De modo geral, o alumínio está mais concentrado na região do solo com profundidade de 0 a 20 centímetros, com exceção do ponto VP5 em que apresenta uma concentração maior

na região superficial do solo e do ponto VP3 em que as raízes possuem um valor maior de alumínio.

As concentrações de alumínio presentes nos solos dos pontos VPB são maiores em comparação aos outros pontos o que indica que parte da concentração desse elemento está sendo absorvida pela braquiária (*Brachiaria decumbens*) que é cultivada no local e sendo distribuída entre suas folhas e raízes.

Considerando que os pontos VP1, VP5 e VP6 apresentam concentrações de alumínio menores em todas as amostras quando comparado aos valores presentes nas amostras dos outros pontos, pode estar relacionado com os resultados das análises de granulometria, onde foi constatado que na região desses pontos apresentam porcentagem maior de areia na composição do solo, o que indica a possibilidade do alumínio ter lixiviado ou percolado com mais facilidade. Em contrapartida os pontos VP3 e VPB apresentam valores que indicam maior concentração de alumínio nas amostras analisadas, porque na região desses pontos o solo possui características que favorecem a retenção da água, consequentemente, as amostras tendem a absorver mais os elementos (PLASTER, 2014, p. 71).

O Gráfico 4 mostra que entre as folhas e as raízes, a concentração de alumínio é predominante nas raízes, no entanto este elemento apresenta tendência de concentrar os maiores volumes nos solos.

O segundo elemento a ser apresentado no Gráfico 5 é o cádmio, porém esse apresentou valores que puderam ser quantificados apenas nas amostras de solo superficial (profundidade de 0 a 10 cm), coletadas nos pontos VP3 e VPB.

O cádmio em comparação com as concentrações de outros elementos, apresenta valores muito baixos, apesar da sensibilidade da técnica de análise (ICP-OES) que foi utilizada, não foi possível quantificar a concentração desse elemento nas outras amostras, mas com base nos resultados das análises, há indícios de que o cádmio está presente nas outras amostras de solos superficiais, porém os valores da concentração são inferiores a 2mg.kg^{-1} .

Gráfico 5 – Concentrações de cádmio presente nos solos, folhas e raízes após aplicações do composto de lodo de curtume

Fonte: Dados experimentais

O Gráfico 6 apresenta os valores das concentrações de cromo presente nas amostras de solos, folhas e raízes. Um dos metais mais polêmicos quando o assunto é resíduos provenientes de curtumes. O cromo nesse estudo, quando comparado com outros elementos que foram analisados, suas concentrações apresentam valores abaixo da média.

Gráfico 6 – Concentrações de cromo presentes nos solos, folhas e raízes após aplicações do composto de lodo de curtume

Fonte: Dados experimentais

No Gráfico 6, observa-se que entre as amostras de solos, raízes e folhas analisadas, o cromo tende a se concentrar mais nos solos, principalmente em profundidade de 10 a 20 centímetros.

As regiões que apresentam um solo com características mais arenosas, próximos aos pontos VP5 e VP7, por exemplo, possuem uma diferença significativa entre as concentrações de cromo das amostras de solos superficiais (0 a 10 cm), folhas e raízes em comparação com as concentrações quantificadas nos solos mais profundos (10 a 20 cm).

Com exceção dos pontos VP1, VP3 e VP7, em que os solos mais profundos apresentam valores com discrepância maior da concentração de cromo presente nas amostras de folhas e raízes, os pontos VP2, VP4, VP5 e VP6, na maioria, apresentam valores que indicam que esse metal, por menor que seja a concentração, está sendo absorvido pela braquiária (*Brachiaria decumbens*) e se depositando de forma semelhante tanto nas raízes quanto nas folhas.

O próximo elemento apresentado no Gráfico 7 é o cobre. Nota-se que na maioria das amostras de folhas possuem concentrações de cobre superiores aos valores das concentrações das demais amostras, com exceção de apenas uma amostra de solo mais profundo (10 a 20 cm) que foi coletada no ponto VP6.

Gráfico 7 – Concentrações de cobre presentes nos solos, folhas e raízes após aplicações do composto de lodo de curtume

Fonte: Dados experimentais

Em 4 pontos de coleta (VP1, VP2, VP3, VP5) as concentrações de cobre nas raízes da braquiária possuem valores de concentração acima dos valores medidos nas amostras de solos que possuíam cobertura por vegetação.

O ponto de referência (VPB) possui as mesmas concentrações de cobre para solo em ambas as profundidades e possuem valores acima das concentrações analisadas nos outros pontos, sendo o ponto VP6 uma exceção.

Ao comparar as concentrações de cobre nas demais amostras, nota-se que esse elemento tende a se depositar na vegetação, o metal está presente nas raízes, mas apresenta as maiores concentrações nas folhas.

No estudo realizado por Martins (2020), foi relatado um surto de intoxicação crônica por cobre em bovinos semiconfinados após suplementação com 50 mg.kg^{-1} em matéria seca, entre os 302 dias de testes, além das doenças ocasionadas, ocorreu a morte de 35 animais. A partir desta experiência e os resultados apresentados no Gráfico 7, presume-se que há possibilidade do consumo dessa braquiária com altas concentrações de cobre prejudicar a saúde dos animais.

O Gráfico 8 está apresentado as concentrações de potássio. Na maioria das amostras de solo coletados na profundidade de 10 a 20 cm, o potássio possui valores de concentrações maiores em relação às amostras de solos superficiais.

Gráfico 8 – Concentrações de potássio presentes nos solos, folhas e raízes após aplicações do composto de lodo de curtume

Fonte: Dados experimentais

A partir do Gráfico 8, considerando todas as amostras analisadas, nota-se que o potássio apresenta o volume maior de concentrações nas folhas e raízes da braquiária analisada, estando mais propenso a se acumular nas folhas.

As concentrações de manganês nas amostras de solos, raízes e folhas são apresentadas no Gráfico 9. Observa-se que o elemento estudado possui algumas variantes, mas tende a alguns padrões singelos como apresentar os maiores valores de concentrações nos solos em geral, tendendo a acumular nas amostras com maior profundidade.

Gráfico 9 – Concentrações de manganês presentes nos solos, folhas e raízes após aplicações do composto de lodo de curtume

Fonte: Dados experimentais

As concentrações de manganês determinadas nas amostras vegetais demonstram que as raízes possuem as maiores concentrações em relação aos valores medidos nas amostras de folhas, na maior parte dos pontos coletados.

Porém os valores das concentrações nas amostras de solos em ambas as profundidades são maiores do que as concentrações presentes nas amostras vegetais. A partir dos resultados das análises granulométricas, observa-se que as amostras presentes nos pontos VP3 e VP4, região caracterizada como uma área menos arenosa, exibe concentrações maiores de manganês nas amostras das folhas da braquiária (*Brachiaria decumbens*) em comparação com as amostras de solos superficiais (0 a 10 cm) e as raízes.

O Gráfico 10 expõe os valores das concentrações do sódio. Inicialmente, é possível observar que as concentrações das amostras de solos com profundidade de 10 a 20 cm apresentam valores superiores, comparados com as amostras de solos superficiais nos pontos coletados, com exceção do ponto VP2. As amostras de raízes ou folhas apresentaram concentrações superiores aos valores de sódio determinados nas amostras de solo em todos os pontos, exceto por uma pequena diferença no ponto VP7.

Gráfico 10 - Concentrações de sódio presentes nos solos, folhas e raízes após aplicações do composto de lodo de curtume

Fonte: Dados experimentais

Nos pontos VP1, VP2, VP4, VP6 e VP7 ao realizar uma comparação entre as concentrações de sódio presentes nas folhas e nas raízes, verificou-se que a concentração predominante está presente nas amostras de folhas da braquiária. Nos pontos VP3 e VP5, o sódio possui maior valor de concentração nas raízes.

No Gráfico 11 está explícita a diferença dos valores das concentrações do fósforo presente nas amostras analisadas. As folhas da braquiária possuem concentrações médias de fósforo até 10 vezes acima dos valores das concentrações desse mesmo elemento presentes nas demais amostras.

As concentrações de fósforo medidas nas amostras de raízes, apesar de não apresentarem valores exorbitantes como nas folhas, possuem concentrações superiores aos valores encontrados nas amostras de solo.

Comparando os valores da concentração de fósforo presente nos solos do ponto de referência (VPB) com as demais amostras de solo, observa-se que não há grandes variações nos valores das concentrações, indicando que o fósforo que é adicionado nessa área está se mobilizando e sendo preferencialmente absorvido pela braquiária (*Brachiaria decumbens*) cultivada.

Gráfico 11 - Concentrações de fósforo presentes nos solos, folhas e raízes após aplicações do composto de lodo de curtume

Fonte: Dados experimentais

Assim como ocorreu com o fósforo, as concentrações de enxofre nas amostras de folhas apresentadas no Gráfico 12, possuem valores elevados quando comparados com as demais amostras de solos e raízes. Neste gráfico está visível que o enxofre possui tendência de se acumular na vegetação, por exemplo, nos pontos VP1, VP2, VP3, VP4 e VP6 os valores das concentrações nas amostras de raízes são maiores do que nas amostras de solos.

Observando apenas as amostras de solos no Gráfico 12, identifica-se que os solos superficiais com 0 a 10 centímetros de profundidade possuem valores de concentração de enxofre maior do que os valores determinados nas amostras de solos mais profundos. Esse padrão é encontrado em todos os pontos analisados.

Gráfico 12 - Concentrações de enxofre presentes nos solos, folhas e raízes após aplicações do composto de lodo de curtume

Fonte: Dados experimentais

O Gráfico 13 apresenta as concentrações de selênio presente nas amostras vegetais e de solos que foram analisadas, porém nas amostras coletadas no ponto VP2 não foi possível quantificar a presença desse elemento e as amostras de folhas não apresentaram concentrações com valores mensuráveis.

Gráfico 13 - Concentrações de selênio presentes nos solos e raízes após aplicações do composto de lodo de curtume

Fonte: Dados experimentais

Apesar de ser um dos elementos analisados que possui a menor taxa de concentração, foi possível determinar que há traços de presença de selênio nas amostras de raízes e solos. O selênio, nas amostras de raízes na quais foi possível ser quantificado, nota-se que os valores da concentração são maiores do que os valores presentes nos solos analisados.

Em comparação com os valores das concentrações de selênio presente nos solos, o ponto de referência (VPB) possui o mesmo valor para ambas as profundidades, porém nos pontos VP3, VP5 e VP7 apenas foi possível quantificar as concentrações nos solos com profundidade de 10 a 20 centímetros. Nos pontos VP1, VP2 e VP4 não foi possível medir o selênio nas amostras de solo.

A técnica (ICP- OES) utilizada para análise quantitativa dos elementos presentes nas amostras coletadas, apesar de ser sensível, não consegue determinar concentrações para selênio que estejam abaixo de 5mg.kg^{-1} . Com base na média dos resultados analíticos que demonstram os valores quantificados de selênio em algumas amostras, indica que há presença de selênio em todas as amostras de solos e raízes, porém com valores abaixo de 5mg.kg^{-1} .

No Gráfico 14, observa-se que em relação às amostras de solos, o zinco tende a apresentar concentrações mais significativas em solos superficiais (0 a 10 cm) e as concentrações de zinco em solos mais profundos (10 a 20 cm) são menores. Este fato pode estar correlacionado com os altos valores das concentrações nas vegetações, possivelmente porque a braquiária esteja absorvendo grande parte do zinco presente nos solos mais profundos, onde há maior incidência de raízes.

Seguindo a tendência dos elementos fósforo e enxofre, o zinco, apresentado no Gráfico 14, também está mais concentrado na vegetação, reforça-se essa teoria, tanto pelo fato, de que as concentrações de zinco presente nas folhagens são superiores as demais amostras, quanto os valores das concentrações presentes nas amostras das raízes estão acima dos valores determinados nas amostras de solos.

Gráfico 14 - Concentrações de selênio presentes nos solos, folhas e raízes após aplicações do composto de lodo de curtume

Fonte: Dados experimentais

Dentre as substâncias químicas, que possuem valores orientadores que controlam a qualidade dos solos pelas legislações brasileiras, nesta pesquisa, foi possível realizar uma análise comparativa com os elementos cádmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), selênio (Se) e zinco (Zn). Para tais comparações, foi utilizado os valores orientadores fornecidos pela CETESB e CONAMA, por meio das seguintes normas vigentes:

- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB por meio da Decisão de Diretoria nº 256/2016/E, de 22 de novembro de 2016 que dispõe os valores orientadores para solos e águas subterrâneas no Estado de São Paulo.
- A Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009, deferida pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA dispõe sobre critérios e valores orientados de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece as diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas.

As Tabelas 14 e 15 apresentam análises comparativas entre as concentrações de cádmio, cromo, cobre, selênio e zinco presentes nos solos e os valores orientadores de prevenção e referência de qualidade para solos definidos pelo CONAMA e CETESB. Os resultados destacados em negrito estão acima dos valores de prevenção orientados pelas legislações

analisadas e os resultados sublinhados estão acima dos valores de referência de qualidade determinados pela CETESB.

Tabela 14 – Comparação entre os valores dos resultados das análises químicas dos solos com profundidade de 0 a 10 centímetros e os valores de prevenção e valores de referência de qualidade fornecidos pela Resolução nº 420 (CONAMA) e Decisão de Diretoria nº 256/2016/E (CETESB)

Solo - profundidade de 0 a 10 cm (mg.kg ⁻¹)										CONAMA	CETESB	
Elemento	LQ*	VP1	VP2	VP3	VP4	VP5	VP6	VP7	VPB	VP _{Prev} ¹	VP _{Prev} ¹	VRQ ²
Cd	2	<LQ	<LQ	<u>3</u>	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<u>2</u>	1,3	1,3	<u><0,5</u>
Cr	3	<u>58</u>	<u>71</u>	<u>83</u>	<u>73</u>	<u>61</u>	<u>100</u>	<u>70</u>	<u>72</u>	75	75	<u>40</u>
Cu	1	9	10	16	8	7	6	10	17	60	60	<u>35</u>
Se	5	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<u>6</u>	<LQ	<u>12</u>	5	1,2	<u>0,25</u>
Zn	1	23	3	20	<LQ	13	<LQ	14	19	300	86	<u>60</u>
* Limite de quantificação												
¹ Valor de prevenção												
² Valor de referência de qualidade												

Fonte: Dados experimentais; CETESB (2006); CONAMA (2009)

Na Tabela 14, observa-se que o cádmio apresentou concentrações nos pontos VP3 e VPB acima dos valores de prevenção e referência de qualidade definidos por ambos os órgãos ambientais. Porém, se considerarmos que o limite de quantificação da técnica utilizada é 2 mg.kg⁻¹ e os resultados analíticos que foram quantificados estão nessa faixa, pode-se considerar que as amostras dos outros pontos deram uma média semelhante, indicando que há a possibilidade de todos os pontos de coleta apresentarem valores de cádmio acima dos limites impostos pelas legislações.

Os valores da concentração de cromo apresentados na Tabela 14, em todos os pontos, estão acima dos valores de referência de qualidade definidos pela CETESB, em alguns pontos pode ser observado valores duas vezes maior do que o valor recomendado. Apesar das concentrações de cromo ultrapassarem os valores de prevenção apenas nos pontos VP3 e VP6, todos os outros pontos de coleta apresentam valores próximos aos que foram definidos pela DD nº 256/2016/E e a Resolução nº 420.

A Tabela 14 descreve os valores das concentrações de selênio presente nas amostras de solos superficiais, que demonstra uma situação semelhante ao ocorrido com o cádmio, apesar de ser possível quantificar apenas as concentrações de selênio nos pontos VP6 e VPB, que apresentaram valores acima dos valores de prevenção e referência de qualidade definidos pelos órgãos ambientais responsáveis, devido ao limite de quantificação ser 5 mg.kg⁻¹ e a média das

amostras analisadas estar na faixa de 6 mg.kg^{-1} , não deve ser descartada a possibilidade de todas as amostras coletadas que não foram possíveis ser quantificadas por esse método (ICP-OES), apresentarem valores acima dos valores de prevenção e referência de qualidade dos solos estabelecidos pela CETESB.

Os elementos, cobre e zinco presentes no solo superficial (profundidade de 0 a 10 cm), em todos os pontos de coletas, apresentaram concentrações com valores muito inferiores aos valores de prevenção e referência de qualidade dos solos estabelecidos pelo CONAMA e pela CETESB.

A Tabela 15 apresenta os valores das concentrações de cádmio, cromo, cobre, selênio e zinco presentes nos solos com profundidade de 10 a 20 centímetros, correlacionados com os valores de orientação determinados pelo CONAMA e CETESB. Esta tabela demonstra que para o cádmio não foi possível realizar tal comparação, porque a técnica utilizada não conseguiu medir a concentração em nenhum dos pontos coletados, porém não devemos descartar a possibilidade desse metal estar presente nessa porção do solo, como ocorreu com o cádmio e o selênio presentes nas amostras solos superficiais.

Na Tabela 15, observa-se que para os solos mais profundos, a concentração de cromo pode chegar a valores até 3 vezes maior do que o valor de referência de qualidade dos solos delimitados pela CETESB. Os pontos VP2, VP3, VP4, VP5, VP6 e VP7 possuem concentrações de cromo acima dos valores de prevenção determinados pelo CONAMA e CETESB, porém o ponto VP1 apresenta a concentração abaixo do delimitado pelas legislações, mas o valor está muito próximo ao limite da recomendação feita pelos órgãos ambientais.

Um ponto destaca-se na análise das concentrações de cromo presentes nos solos com profundidade de 10 a 20 centímetros, o ponto de referência (VPB) além de possuir uma concentração muito acima do valor de referência de qualidade delimitado pela CETESB, também apresenta concentração elevada em relação ao valor de prevenção determinado pela DD 256/2016/E e a Resolução nº 420. Considerando que não há aplicação do composto de lodo de curtume no local em que foi coletado o ponto de referência (VPB), pode indicar que o cromo está se movendo no solo, tornando o acúmulo desse metal em outras áreas passível de contaminação.

As concentrações de selênio na Tabela 15, nos pontos VP3, VP5, VP6 e VP7, apresentam valores acima dos valores de prevenção e referência de qualidade definidos pelo CONAMA e CETESB. Assim como nas amostras de solos superficiais, não deve ser descartada a possibilidade das concentrações de selênio nos outros pontos apresentarem valores acima dos

valores determinados pela CETESB, considerando a sensibilidade da técnica analítica e a faixa dos valores que foram quantificados para esse elemento.

Tabela 15 – Comparação entre os valores dos resultados das análises químicas dos solos com profundidade de 10 a 20 centímetros e os valores de prevenção e valores de referência de qualidade fornecidos pela Resolução nº 420 (CONAMA) e Decisão de Diretoria nº 256/2016/E (CETESB)

Solo - profundidade de 10 a 20 cm (mg.kg ⁻¹)										CONAMA	CETESB	
Elemento	LQ*	VP1	VP2	VP3	VP4	VP5	VP6	VP7	VPB	VPrev ¹	VPrev ¹	VRQ ²
Cd	2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,3	1,3	<u><0,5</u>
Cr	3	<u>70</u>	76	<u>137</u>	<u>181</u>	<u>109</u>	<u>114</u>	<u>137</u>	<u>109</u>	75	75	<u>40</u>
Cu	1	8	10	20	13	7	42	18	17	60	60	<u>35</u>
Se	5	<LQ	<LQ	<u>11</u>	<LQ	<u>12</u>	<u>8</u>	<u>5</u>	<u>12</u>	5	1,2	<u>0,25</u>
Zn	1	<LQ	2	<LQ	6	<LQ	4	<LQ	<LQ	300	86	<u>60</u>
* Limite de quantificação												
¹ Valor de prevenção												
² Valor de referência de qualidade												

Fonte: Dados experimentais; CETESB (2006); CONAMA (2009)

As concentrações de cobre e zinco apresentaram valores muito abaixo dos valores orientadores determinados pelas legislações vigentes, descarta-se a possibilidade de contaminação/poluição do solo por esses elementos.

A Decisão de Diretoria nº 256/2016/E e a Resolução nº 420 publicadas pela CETESB e CONAMA, respectivamente, indicam os valores orientadores de investigação específicas para áreas agrícolas, residenciais e industriais. Os valores para as áreas agrícolas possuem os critérios mais restritivos entre os valores orientadores para áreas com utilidades definidas.

Os valores orientadores para áreas agrícolas em comparação com os valores de prevenção e referência de qualidade, apresentam critérios mais abrangentes, considerando a necessidade da utilização de insumos, porém ainda possuem os critérios necessários para controlar e evitar a poluição/contaminação do solo (CETESB, 2006; CONAMA, 2009).

A Tabela 16 apresenta a correlação entre os valores das concentrações de cádmio, cromo, cobre, selênio e zinco presentes nos solos superficiais e os valores de investigação para áreas agrícolas determinados pelos órgãos ambientais, com exceção do elemento selênio que não possui valor orientador determinado pelo CONAMA.

Tabela 16 - Comparação entre os valores dos resultados das análises químicas dos solos com profundidade de 0 a 10 centímetros e os valores de investigação específicos para áreas agrícolas fornecidos pela Resolução nº 420 (CONAMA) e Decisão de Diretoria nº 256/2016/E (CETESB)

Solo - profundidade de 0 a 10 cm (mg.kg ⁻¹)										CONAMA	CETESB
Elemento	LQ*	VP1	VP2	VP3	VP4	VP5	VP6	VP7	VPB	VI - Agrícola ¹	VI - Agrícola ¹
Cd	2	<LQ	<LQ	3	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	2	3	3,6
Cr	3	58	71	83	73	61	100	70	72	150	150
Cu	1	9	10	16	8	7	6	10	17	200	760
Se	5	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	6	<LQ	12	-	24
Zn	1	23	3	20	<LQ	13	<LQ	14	19	450	1900
* Limite de quantificação											
¹ Valor de Investigação para áreas agrícolas											

Fonte: Dados experimentais; CETESB (2006); CONAMA (2009)

Na Tabela 16, observa-se que, em todos os pontos de coleta, as concentrações nas amostras de solos superficiais de cádmio, cromo, cobre, selênio e zinco apresentam valores muito abaixo dos valores de investigação para áreas agrícolas determinados pelo CONAMA e CETESB.

A Tabela 17 apresenta comparações entre os valores de investigação para áreas agrícolas definidos pelos órgãos ambientais vigentes e os valores das concentrações de cádmio, cromo, cobre, selênio e zinco presentes nos solos foram coletadas na profundidade de 10 a 20 centímetros.

Tabela 17 - Comparação entre os valores dos resultados das análises químicas dos solos com profundidade de 10 a 20 centímetros e os valores de investigação específicos para áreas agrícolas fornecidos pela Resolução nº 420 (CONAMA) e Decisão de Diretoria nº 256/2016/E (CETESB)

Solo - profundidade de 10 a 20 cm (mg.kg ⁻¹)										CONAMA	CETESB
Elemento	LQ*	VP1	VP2	VP3	VP4	VP5	VP6	VP7	VPB	VI - Agrícola ¹	VI - Agrícola ¹
Cd	2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	3	3,6
Cr	3	70	76	137	181	109	114	137	109	150	150
Cu	1	8	10	20	13	7	42	18	17	200	760
Se	5	<LQ	<LQ	11	<LQ	12	8	5	12	-	24
Zn	1	<LQ	2	<LQ	6	<LQ	4	<LQ	<LQ	450	1900
* Limite de quantificação											
¹ Valor de Investigação para áreas agrícolas											

Fonte: Dados experimentais; CETESB (2006); CONAMA (2009)

Assim como no estudo desenvolvido por Da Silva et al. (2015), que após o uso do composto de lodo de curtume aumentou os valores das concentrações de metais no solo, mas não a níveis que poderiam causar danos ambientais, as concentrações de cádmio, selênio e zinco demonstradas na Tabela 17, estão abaixo, dos valores orientadores específicos para áreas agrícolas que foram determinados pela CETESB e CONAMA, com exceção do cromo (Cr), que além de apresentar no ponto VP4 a concentração acima dos valores de investigação indicados pelos órgãos ambientais, também apresenta na maior parte dos outros pontos de coleta, em solos mais profundos, concentrações próximas aos valores máximos definidos pelas legislações.

7 CONCLUSÕES

Com base nos resultados provenientes de estudos anteriores, após o processo de compostagem do lodo proveniente de curtume, as concentrações iniciais de alguns elementos que estavam presentes no lodo *in natura* diminuíram, como os valores de cromo e enxofre. A justificativa mais plausível é que ocorreu a diluição da concentração em relação ao aumento da massa total do composto causado pela adição do bagaço da cana.

O aumento da concentração de alguns elementos como potássio, ferro e manganês, pode estar relacionado com a composição química do bagaço da cana de açúcar que foi adicionado no processo da compostagem, entretanto não há a possibilidade de confirmar essa hipótese porque o curtume colaborador afirmou que os detalhes do processo de compostagem e composição do bagaço da cana de açúcar são enquadrados como “segredo industrial”.

As análises granulométricas dos solos apresentam valores numéricos correlacionados com a textura do solo. Foi possível identificar que em alguns pontos de coleta o solo apresentou frações maiores de areia, em outros a porcentagem predominante foi de silte.

Apesar das amostras de solos analisadas apresentarem perfis granulométricos com algumas diferenças entre as frações predominantes em relação a cada ponto de coleta, os pontos coletados pertencem à mesma área de cultivo de braquiária, portanto possuem características semelhantes.

De modo geral, conclui-se que a área analisada possui solo com características que proporcionam a retenção da água de forma equilibrada; as frações de solos possuem partículas com tamanho médio, o que permite tanto a mobilidade das substâncias nos horizontes dos solos por meio dos processos de percolação e lixiviação, quanto a absorção dos compostos pela vegetação; o solo possui dureza e grau de compactação adequados para a realização do cultivo da braquiária.

As análises químicas realizadas nas amostras de braquiária, coletadas nos pontos VP1, VP2, VP3, VP4, VP5, VP6 e VP7 apontaram a predominância das concentrações de cobre, potássio, sódio, enxofre, fósforo, selênio e zinco na vegetação.

Os valores das concentrações de potássio, sódio, fósforo, enxofre e zinco, em comparação, entre as amostras de solo e as amostras da braquiária, estes elementos apresentaram os maiores valores nas amostras de folhas e amostras de raízes, indicando que há absorção preferencial desses elementos pela vegetação presente.

As concentrações de cobre analisadas nas amostras de solos, raízes e folhas, apontou que há um acúmulo preferencial desse metal nas folhas da braquiária, seguido pelo acúmulo nos solos mais profundos (com 10 a 20 centímetros).

O selênio apresentou características distintas do cobre. Os maiores valores da concentração de selênio foram identificados nas raízes, seguido pelos valores da concentração presente nas amostras de solos superficiais (com 0 a 10 centímetros).

A partir das análises químicas quantitativas nos pontos VP1, VP2, VP3, VP4, VP5, VP6, VP7 e VPB foi possível observar que o cádmio possui a tendência de acumular nos solos superficiais, com profundidade de 0 a 10 centímetros. Já nos solos mais profundos, com 10 a 20 centímetros, os metais alumínio, cromo e manganês apresentaram as maiores concentrações.

Entre os 11 elementos que foram analisados (Al, Cd, Cr, Cu, K, Mn, Na, P, Se, S e Zn), apenas o alumínio e o selênio apresentaram concentrações presentes nas amostras de solos (ambas as profundidades) com valores abaixo das concentrações medidas nos solos coletados no ponto de referência (VPB). A partir desses resultados analíticos, observa-se que as características químicas do solo onde há cultivo de braquiária está sendo alterada.

A análise comparativa com os valores de prevenção e valores de referência de qualidade para solos publicados pelo CONAMA e CETESB, indicam que as concentrações de cádmio e selênio apresentam, em alguns pontos de coleta, valores acima dos valores orientadores determinados pela DD 256/2016/E e Resolução nº 420.

Em todos os pontos de coleta, as concentrações de cromo possuem valores acima dos valores de referência de qualidade. Em comparação com os valores de prevenção, o cromo apresenta, em dois pontos coletados, valores acima dos valores orientadores, porém as outras amostras de solos apresentam concentrações próximas ao valor de prevenção estabelecido pela CETESB e CONAMA.

Partindo da premissa que há constatação de alteração da composição química do solo estudado, pode-se dizer que a aplicação do lodo de curtume nessa área está alterando as características originais desse solo.

O valor da concentração de cromo no ponto de referência (VPB) no solo coletado com profundidade de 10 a 20 centímetros está acima dos valores da concentração nos pontos VP1 e VP2, os quais recebem aplicação direta do composto de lodo de curtume, o que enfatiza a probabilidade da mobilidade do cromo para outras áreas, indicando tanto a possibilidade de acumulação desse metal na área utilizada para cultivo, como a possibilidade de em outras áreas passíveis gerar contaminação por cromo.

Porém, quando comparado com os valores orientadores específicos para áreas agrícolas estabelecidos pelos mesmos órgãos ambientais, os metais cádmio, cobre, selênio e zinco apresentam concentrações com valores abaixo dos valores orientadores, tendo exceção as concentrações de cromo, apesar de apenas uma amostra conter concentração acima do valor determinado pela legislação, as outras amostras possuem concentrações próximas ao valor orientador.

Considerando que o composto de lodo de curtume está sendo aplicado no solo de uma área com fins agrícolas, as concentrações dos metais determinadas no solo dessa área apresentam valores aceitáveis pelas legislações vigentes DD nº 256/2016/E e a Resolução nº 420, publicadas pela CETESB e CONAMA, respectivamente, que prezam pela qualidade dos solos. Neste contexto, um controle analítico periódico desta área, principalmente em relação às concentrações de cromo no solo, seria necessário para evitar os riscos de contaminação.

Com base nas discussões, metais como cromo, alumínio, manganês e cádmio, possuem a tendência de acumular nos solos, mesmo não apresentando risco direto pela absorção da vegetação, pelas características do solo, há possibilidade de lixiviação e percolação até as águas subterrâneas.

Em relação à qualidade da vegetação que está sendo cultivada na área de disposição do composto de lodo de curtume, a braquiária (*Brachiaria decumbens*), as concentrações de cobre quantificadas nas folhas dessa vegetação utilizada como fonte de alimento para o processo de engorda do gado de corte visando rápida engorda, comparadas com outros estudos, indica que o consumo dessas folhas de braquiária pode transladar elementos como o cobre para os animais que são alocados nessa área, podendo ocasionar distúrbios na saúde animal, consequentemente, ao consumir os produtos derivados desses animais a saúde humana pode ser impactada.

Para uma avaliação confirmatória sobre os riscos à saúde humana, animal e ambiental, sugere-se que seja realizada investigação mais detalhada da área (solo e vegetação), do composto de lodo de curtume e da rotina dos animais que se alimentam do cultivo de braquiária (*Brachiaria decumbens*) no local.

REFERÊNCIAS

- ALIBARDI, L.; COSSU, R. Pre-treatment of tannery sludge for sustainable landfilling. **Waste Management**, v. 52, p. 202–211, 1 jun. 2016.
- ALMEIDA, R. F. DE. Plantas Acumuladoras De Metais Pesados No Solo – Uma Revisão. **Revista de Biotecnologia & Ciência**, v. 2, n. 1, p. 28–46, 2012.
- ANGELI, J. T. S. K; BOINA, L. O; SÍGOLO, J. B. Disponibilidade de cobre em lodo de curtume: Potencial contaminante químico do solo. **COLLOQUIUM VITAE**, v. 11, n. 2, p. 01–04, 1 ago. 2019.
- ANGELI, J. T. S. K; SIGOLO, J. B. Composto de Lodo de curtume em aplicação agrícola: Implicações ambientais. Foz do Iguaçu: [s.n.]. Disponível em: <<http://www.ibeas.org.br/conresol/conresol2019/V-056.pdf>>. Acesso em: 26 ago. 2020.
- ARAÚJO, A. S. A. et al. Fitorremediação de solos contaminados com arsênio (AS) utilizando braquiária. **Ciencia e Agrotecnologia**, v. 35, n. 1, p. 84–91, jan. 2011.
- ARAUJO, A. S. F. et al. Long-term effect of composted tannery sludge on soil chemical and biological parameters. **Environmental Science and Pollution Research**, p. 1–8, 22 jul. 2020.
- ARAUJO, F. F. Disponibilização de fósforo, correção do solo, teores foliares e rendimento de milho após a incorporação de fosfatos e lodo de curtume natural e compostado. **Acta Scientiarum - Agronomy**, v. 33, n. 2, p. 355–360, 2011.
- ARAÚJO, F. F. et al. Desenvolvimento do milho e fertilidade do solo após aplicação de lodo de curtume e fosforita. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 5, p. 507–511, out. 2008.
- BEBE, F. V. et al. Avaliação de solos sob diferentes períodos de aplicação com vinhaça. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, Campina Grande, v. 13, n. 6, p. 781–787, Dec. 2009.
- BELAY, A. A. Impacts of Chromium from Tannery Effluent and Evaluation of Alternative Treatment Options. **Journal of Environmental Protection**, v. 01, n. 01, p. 53–58, 31 mar. 2010.
- BERILLI, S. S. et al. Use of Tannery Sludge and Urban Compost as a Substrate for Sweet Pepper Seedlings. **Journal of Experimental Agriculture International**, v. 34, n. 4, p. 01–09, 2019.
- BORGES, A. L.; ACCIOLY, A. M. A. **Amostragem de Solo para Recomendação de Calagem e Adubação**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.cnpmf.embrapa.br>. Acesso em: 4 jan. 2021.
- CENTRO DAS INDUSTRIAS DE CURTUMS DO BRASIL (CICB). Exportações Brasileira de couros e peles. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://cicb.org.br/storage/files/repositories/phpyx41FX-total-exp-dez19-vr.pdf>>. Acesso em: 2 set. 2020.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Lodos de curtumes - critérios para o uso em áreas agrícolas e procedimentos para apresentação de projetos: manual técnico**. [s.l: s.n.].

DA SILVA, G. R. et al. Uso do lodo de curtume na produção de plantas de açaizeiro em fase inicial de desenvolvimento. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 10, n. 4, p. 506–511, 2015.

DE ARAÚJO, A. S. F. et al. Propriedades do solo e produtividade do feijão-caupi após seis anos de aplicações consecutivas de lodo de curtume compostado. **Acta Scientiarum - Agronomy**, v. 38, n. 3, p. 407–413, 2016.

MARQUES, T. C. L. L.; MOREIRA, F. M.; SIQUEIRA, J. O. Crescimento e teor de metais de mudas de espécies arbóreas cultivadas em solo contaminado com metais pesados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 1, p. 121–132, 2000.

DOS SANTOS, G. et al. Análise do Nível de Sustentabilidade de um Curtume a partir do Estudo do Sistema de Gestão Ambiental – SGA. **Sistemas & Gestão**, v. 10, n. 2, p. 298–314, 30 jun. 2015.

KITAMURA, A. E. et al. Relação entre a variabilidade espacial das frações granulométricas do solo e a produtividade do feijoeiro sob plantio direto. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 31, n. 2, p. 361–369, Apr. 2007.

FERRARI, W. A. **Guia Técnico Ambiental de Curtumes**. São Paulo: [s.n.]. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/tecnologia-ambiental/pro->>. Acesso em: 30 ago. 2020.

FERREIRA, R. M.; LOFRANO, F. C.; MORITA, D. M. Remediation of contaminated sites: A critical analysis of Brazilian legislation. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 25, n. 1, p. 115–125, 1 jan. 2020.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (FEAM). **Guia Técnico Ambiental do Setor de Curtumes**. Belo Horizonte: [s.n.].

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEORAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/21122-primeiros-resultados-1couro.html?=&t=series-historicas>>. Acesso em: 1 set. 2020.

OLIVEIRA, J. M. L.; ARAUJO, A. S.; MELO, J. W. Cromio Na Matéria Orgânica Do Solo E Feijão-Caupi, Após Quatro Aplicações Anuais Consecutivas De Lodo De Curtume Compostado. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, 2015.

JUEL, M. A. I.; MIZAN, A.; AHMED, T. Sustainable use of tannery sludge in brick manufacturing in Bangladesh. **Waste Management**, v. 60, 2017.

M. JOTHILINGAM, P. PRATHEEBA, G. J. Options for Utilization of Tannery Sludge. **International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering**, v. 9, n. 6, p. 699–703, 2020.

MARTINES, A. M. Impacto do lodo de curtume nos atributos biológicos e químicos do solo. 2005. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.
doi:10.11606/D.11.2005.tde-02082005-132525

MARTINES, A. M. et al. Ammonia volatilization in soil treated with tannery sludge. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 12, p. 4690–4696, 1 jun. 2010.

MARTINEZ, M. S.; CRUVINEL, D. F. C.; BARATTO, D. M. Avaliação da fitorremediação de solos contaminados com metais pelo capim braquiária e mostarda da Índia. **Revista DAE**, v. 61, n. 191, p. 30–37, 2013.

MARTINS, K. P. F. et al. Chronic copper poisoning in beef cattle in the state of Mato Grosso, Brazil. **Pesquisa Veterinaria Brasileira**, v. 40, n. 9, p. 651–661, 1 set. 2020.

BRITO, N. et al. Validação de métodos analíticos: Estratégia e discussão. **Pesticidas: R.Ecotoxicol. e Meio Ambiente**, Curitiba, v. 13, jan./dez. 2003 129 Pesticidas: R.Ecotoxicol. e Meio Ambiente, Curitiba, v. 13, p. 129-146

MIRANDA, A. R. L. et al. Growth and nodulation of cowpea after 5 years of consecutive composted tannery sludge amendment. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 12, n. 4, p. 1175–1179, 2014.

MIRANDA, A. R. L. et al. Less abundant bacterial groups are more affected than the most abundant groups in composted tannery sludge-treated soil. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, 2018.

MOREIRA, R. S.; MINCATO, R. L.; SANTOS, B. R. Disponibilidade de metais pesados e fertilidade de um Latossolo Vermelho distrófico após aplicação de lodo de esgoto. **Ciencia e Agrotecnologia**, v. 37, n. 6, p. 512–520, nov. 2013.

PACHECO, J. W. F. **Curtimes**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.passeidireto.com/arquivo/38942114/curtimes-cetesb>>. Acesso em: 2 set. 2020.

PATEL, A.; PATRA, D. D. Influence of heavy metal rich tannery sludge on soil enzymes vis-à-vis growth of *Tagetes minuta*, an essential oil bearing crop. **Chemosphere**, v. 112, p. 323–332, 2014.

PRADO, A. K.; CUNHA, E. T. Efeito da Aplicação de Lodo de Esgoto e Curtume nas Características Físico-Químicas do Solo e na Absorção de Nitrogênio por Feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.). **Exatas Tecnol.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://revista.pgsskroton.com/index.php/exatas/article/view/523>>. Acesso em: 3 set. 2020.

RUIZ, H. A. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (Silte + Argila). **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 29, n. 2, p. 297-300, Apr. 2005.

SILVA, J. D. D. C. et al. Emergência e crescimento inicial de plântulas de pimenta ornamental e celosia em substrato à base de composto de lodo de curtume. **Ciencia Rural**, v. 41, n. 3, p. 412–417, mar. 2011.

TEIXEIRA, K. R. G. et al. Efeito da adição de lodo de curtume na fertilidade do solo, nodulação e rendimento de matéria seca do Caupi. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 30, n. 6, p. 1071–1076, dez. 2006.