

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
ENGENHARIA AMBIENTAL

ANYELLE MENEGHESSO

Análise comparativa das propriedades físicas e químicas de dois compostos de diferentes origens para serem empregados em solos degradados por contaminação e por erosão

São Carlos

2024

ANYELLE MENEGHESSO

Análise comparativa das propriedades físicas e químicas de dois compostos de diferentes origens para serem empregados em solos degradados por contaminação e por erosão

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheira Ambiental.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos
2024

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

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

M541a Meneghesso, Anyelle
Análise comparativa das propriedades físicas e químicas de dois compostos de diferentes origens para serem empregados em solos degradados por contaminação e por erosão / Anyelle Meneghesso; orientadora Prof. Assoc. Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues. São Carlos, 2024.

Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2024.

1. Composto de torta de filtro de cana-de-açúcar.
2. Composto da fração orgânica.
3. Resíduos sólidos urbanos.
4. Áreas degradadas.
5. Recuperação ambiental.
6. Melhoramento de solos.
- I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

Monografia desenvolvida seguindo as regras de formatação estabelecidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) para trabalhos acadêmicos.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): Anyelle Meneghesso

Data da Defesa: 21/11/2024

Comissão Julgadora:

**Profa. Assoc. Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues
(Orientador(a))**

Ádria Kanome Mori Soares

Mariana Balieiro Rodrigues

Resultado:

Aprovado

Aprovado

Aprovada



Prof. Dr. Marcelo Zaiat

Coordenador da Disciplina 1800091- Trabalho de Graduação

Aos meus pais, Norberto e Daniela.

AGRADECIMENTOS

A Deus, fonte de toda força, motivação, proteção e saúde, por nunca me desamparar.

Aos meus pais, pelo amor incondicional, apoio aos meus sonhos e a oportunidade de viver e concluir esse ciclo.

À Prof^a Dr.^a Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues, por todo o apoio, orientação, paciência, acolhimento, amizade, aprendizados, pela oportunidade de desenvolver este trabalho com uma profissional excepcional e me incentivar à pesquisa.

Ao Programa Unificado de Bolsas da Universidade de São Paulo (PUB-USP) pela bolsa de estudo e auxílio à pesquisa.

A todos os professores da Engenharia Ambiental da EESC-USP, pela certa e constante contribuição com a minha formação.

Aos meus amigos da Ambiental 019: Heinz, Batata, Pepper, Paty, Euro, Acerola, Dan, Pampers, Drei, Jeri, Ju, Mi, XL, Julinha, Smart, Alan, Clara, Hermana, Laura, Suri, Zana, Cique, Hola, Gira, Mila e Paulo. Cada etapa vivida com vocês foi importante para construir quem sou hoje.

Ao eterno Grupo 7 (Piviti, Acerola, Sami e Jeri), por me darem coragem, apoio inesgotável e sempre me lembrarem do amor de Deus.

À Prof.^a Dr.^a Leila Maria Beltramini, Educadora Gislaine Costa dos Santos e colegas de trabalho - Ana Carolina, Gabriela, Letícia e Maria Rita -, pelos aprendizados durante o período que participei do Jardim Medicinal do Espaço Interativo de Ciências da USP/CIBFar.

Aos amigos Beatriz G., Marina M., Rebecca, Beatriz S., Angelina, Larissa, Marina O. e Gustavo pelo apoio, companheirismo e amizade ao longo de todos estes anos.

Aos meus colegas de trabalho, em especial André e Jayana, pelos aprendizados, apoio, paciência e compreensão.

A todos que, de algum modo, fizeram parte da minha trajetória na USP.

Aos funcionários, técnicos e demais colaboradores da Engenharia Ambiental, do Departamento de Geotecnica e da EESC-USP em geral, por tornarem possível nosso acesso seguro, limpo e organizado a tudo que a universidade oferece.

A todos os professores e funcionários que já passaram pela minha vida escolar, em especial à equipe da ETEC Comendador João Rays.

A todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

Pois, sabendo que o Senhor estava comigo, criei coragem.

Ed 7:28

RESUMO

MENEGHESSO, A. **Análise comparativa das propriedades físicas e químicas de dois compostos de diferentes origens para serem empregados em solos degradados por contaminação e por erosão.** 2024. 84 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.

Diante da elevada geração de resíduos sólidos urbanos e produtividade do terceiro setor, associadas ao reduzido percentual de tratamento adequado de resíduos, são necessárias soluções integradas para recuperação e mitigação de impactos ambientais como a degradação do solo por erosão e contaminação e a emissão de gases de efeito estufa (GEEs). Neste cenário, tem-se a utilização de compostos oriundos da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (RSU) e de torta de filtro de cana-de-açúcar como alternativas favoráveis e menos onerosas para o tratamento e recuperação de áreas degradadas por erosão e contaminação, bem como para a disposição e tratamento adequados de resíduos. Com o presente estudo, buscou-se avaliar o potencial de utilização dos compostos na retenção de contaminantes inorgânicos e em solos degradados por processos erosivos para propor soluções com materiais de baixo custo, a partir de ensaios de laboratório e revisão bibliográfica. Neste sentido, ambos compostos apresentaram valores adequados de teor de umidade, pH, ΔpH , Eh, CE, CTC, MO, composição elementar (C, H, N), relação C/N, composição por FRX, área superficial, densidade aparente e capacidade de adsorção para seu emprego na recuperação de solos degradados. Algumas propriedades foram mais elevadas para o composto orgânico de RSU e outras para o composto de torta de cana-de-açúcar, mas os dois apresentaram características que podem melhorar os solos degradados. Ensaios futuros devem ser realizados com estes compostos e com os solos, visando avaliar sua efetividade.

Palavras-chave: Composto de torta de filtro de cana-de-açúcar. Composto da fração orgânica. Resíduos sólidos urbanos. Áreas degradadas. Recuperação ambiental. Melhoramento de solos.

ABSTRACT

MENECHESO, A. **Comparative analysis of the physical and chemical properties of two composts of different origins to be used in soils degraded by contamination and erosion.** 2024. 84 p. Monograph (Graduation Work) – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2024.

In face of the high generation of urban solid waste and the productivity of the third sector, associated with the low percentage of adequate waste treatment, integrated solutions are needed for recovery and mitigation of environmental impacts such as soil degradation by erosion and contamination and the emission of greenhouse gases (GHGs). In this scenario, the use of composts from the organic fraction of municipal solid waste (MSW) and sugarcane filter cake are favorable and less expensive alternatives for the treatment and recovery of areas degraded by erosion and contamination, as well as for the adequate disposal and treatment of waste. The present study sought to evaluate the potential use of composts in the retention of inorganic contaminants and in soils degraded by erosion processes to propose solutions with low-cost materials, based on laboratory tests and literature review. In this regard, both composts presented adequate values of moisture content, pH, ΔpH , Eh, EC, CEC, OM, elemental composition (C, H, N), C/N ratio, XRF composition, surface area, apparent density and adsorption capacity for their use in the recovery of degraded soils. Some properties were higher for the MSW organic compost and others for the sugarcane pressmud compost, but both presented characteristics that can improve degraded soils. Future tests should be carried out with these compounds and soils, in order to evaluate their effectiveness.

Keywords: Sugarcane pressmud compost. Organic fraction compost. Urban solid waste. Degraded areas. Environmental recovery. Soil improvement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama do Fluxo de Materiais na Economia Circular.....	20
Figura 2: Fatores Relacionados à Degradação do Solo.....	25
Figura 3: Isoterma de Adsorção e Solubilidade Máximas.....	29
Figura 4: Mapa de Vulnerabilidade à Erosão no Brasil.....	31
Figura 5: Mapa de Cobertura e Uso da Terra no Brasil.....	31
Figura 6: Origem da Contaminação do Solo Perante Exposição da População Brasileira.....	31
Figura 7: Relação de Áreas Contaminadas e Reabilitadas no Estado de São Paulo.....	32
Figura 8: Homogeneização do Composto de Torta de Filtro de Cana-de-Açúcar.....	35
Figura 9: Homogeneização do Composto da Fração Orgânica de RSU.....	35
Figura 10: Ensaios em Triplicata para Determinação do pH, Eh e CE - (A) Amostras do Composto da Fração Orgânica de RSU; (B) Amostras do Composto de Torta de Filtro de Cana-de-Açúcar.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Lavouras Temporárias de Maior Produção no Brasil.....	16
Tabela 2: Propriedades do Composto de Torta de Filtro de Cana-de-Açúcar.....	22
Tabela 3: Propriedades do Composto da Fração Orgânica de RSU.....	22
Tabela 4: Ensaios e Metodologias Utilizadas na Caracterização dos Compostos.....	34
Tabela 5: Metodologias utilizadas por Lima (2022) e Raimondi (2019) na Caracterização dos Compostos.....	38
Tabela 6: Teor de Umidade dos Compostos Analisados.....	39
Tabela 7: Relação C/N para os Compostos Utilizados nesta Pesquisa.....	45
Tabela 8: Avaliação Econômica sobre os Compostos Utilizados nesta Pesquisa.....	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	–	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	–	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ABREMA	–	Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente
ACRe	–	Áreas Contaminadas em Processo de Remediação
ACRi	–	Áreas Contaminadas com Risco Confirmado
AR	–	Áreas Recuperadas
AS	–	Área Superficial
CE	–	Condutividade Elétrica
CETESB	–	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CNI	–	Confederação Nacional da Indústria
CRA	–	Capacidade de Retenção de Água
CTC	–	Capacidade de Troca Catiônica
DAM	–	Drenagem Ácida de Minas
EESC-USP	–	Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo
Eh	–	Potencial de Oxirredução
Embrapa	–	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPIs	–	Equipamentos de Proteção Individual
E1G	–	Etanol de Primeira Geração
E2G	–	Etanol de Segunda Geração
FRX	–	Fluorescência de Raios-X
GEEs	–	Gases do Efeito Estufa
IBAMA	–	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

IBGE	–	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPEA	–	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IPT	–	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ISWA	–	Associação Internacional de Resíduos Sólidos – <i>International Solid Waste Association</i>
MO	–	Matéria Orgânica
NBR	–	Norma Técnica Brasileira
ONU	–	Organização das Nações Unidas
PAM	–	Produção Agrícola Municipal
pH	–	Potencial Hidrogeniônico
PESN	–	Ponto de Efeito Salino Nulo
Planares	–	Plano Nacional de Resíduos Sólidos
PNRS	–	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PNUMA	–	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
RSU	–	Resíduos Sólidos Urbanos
SHS	–	Departamento de Hidráulica e Saneamento
SINIR	–	Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos
SISSOLO	–	Sistema de Informação de Vigilância em Saúde de Populações Expostas a Solo Contaminado
SNIS	–	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
UNICA	–	União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia
ΔpH	–	Delta pH

LISTA DE SÍMBOLOS

Ag	–	Prata
C	–	Carbono
Ca	–	Cálcio
Cd	–	Cádmio
CH ₄	–	Metano
ClAg	–	Cloreto de Prata
CO ₂	–	Dióxido de Carbono
Cu	–	Cobre
Fe	–	Ferro
H	–	Hidrogênio
Hg	–	Mercúrio
H ₃ PO	–	Ácido Fosfórico
K	–	Potássio
Mg	–	Magnésio
N	–	Nitrogênio
Ni	–	Níquel
°C	–	Graus Celsius
P	–	Fósforo
Pb	–	Chumbo
Zn	–	Zinco

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	7
2. OBJETIVOS.....	11
2.1 Objetivos Gerais.....	11
2.2 Objetivos Específicos.....	11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
3.1 Gestão e Reaproveitamento de Resíduos Sólidos.....	12
3.1.1 Resíduos Sólidos Urbanos (RSU).....	13
3.1.1.1 Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil.....	14
3.1.2 Resíduos da Produção de Cana-de-Açúcar.....	16
3.1.2.1 Geração e Destinação de Resíduos Sucroalcooleiros no Brasil.....	17
3.1.3 Economia Circular.....	18
3.1.3.1 Compostos.....	21
3.1.3.1.1 Fatores para Determinação da Maturidade do Composto.....	22
3.2 Áreas Degradadas.....	24
3.2.1 Degradação do Solo por Contaminação.....	25
3.2.1.1 Resíduos de Mineração.....	26
3.2.1.1.1 Metais Potencialmente Tóxicos.....	27
3.2.1.1.2 Adsorção.....	28
3.2.2 Degradação do Solo por Processos Erosivos.....	29
3.2.3 Panorama Nacional.....	30
3.2.4 Mudanças Climáticas.....	32
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
4.1 Caracterização dos Compostos.....	34
4.1.1 Ensaios Realizados no Laboratório de Geotecnica Ambiental EESC-USP.....	34
4.1.1.1 Teor de Umidade.....	36
4.1.1.2 Parâmetros Físico-Químicos.....	36

4.1.1.2.1 Potencial Hidrogeniônico (pH).....	36
4.1.1.2.2 Potencial de Oxirredução (Eh).....	37
4.1.1.2.3 Condutividade Elétrica.....	37
4.1.2 Resultados Obtidos pela Revisão da Literatura.....	37
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
5.1 Ensaios Realizados no Laboratório de Geotecnia Ambiental EESC-USP.....	39
5.2 Resultados Obtidos pela Revisão da Literatura.....	42
5.2.1 Análises da Composição Química por FRX e Capacidade de Adsorção.....	47
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	50
6.1 Compostos de Torta de Filtro de Cana-de-Açúcar e da Fração Orgânica de RSU.....	50
6.2 Compostos de Diferentes Fontes.....	51
6.3 Avaliação Econômica da Utilização de Compostos na Remoção de MPT e na Recuperação de Solos Degradados por Erosão.....	54
7. CONCLUSÃO.....	56
8. RECOMENDAÇÕES.....	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos maiores geradores de resíduos sólidos no mundo, apresentando uma crescente geração dos chamados Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), referentes à geração doméstica e limpeza urbana, principalmente (IPEA, 2020). A composição gravimétrica destes resíduos indica que a matéria orgânica corresponde à quase metade dos RSU gerados mundialmente (SINIR, 2020; PINHEL, 2018).

De acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) os resíduos orgânicos podem se degradar de forma natural quando são de origem natural, reciclando nutrientes através de processos naturais como os ciclos de carbono e nitrogênio. No entanto, tais resíduos representam um grande problema ambiental quando são de origem antrópica - como restos de alimentos e de resíduos de jardim decorrentes de atividades humanas -, geralmente aliados a um alto volume de geração e disposição inadequada (Embrapa, 2021).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) determina que a fração orgânica dos RSU seja destinada à compostagem, para transformação em adubo, reduzindo o volume acumulado e os impactos ao meio ambiente. No entanto, menos de 1% dos resíduos coletados no país é efetivamente compostado (Panorama SNIS, 2020), sendo que boa parte ainda era destinada a lixões e aterros em 2012, podendo haver a liberação de gases de efeito estufa e chorume resultantes da degradação de tais resíduos (SIQUEIRA, 2016). Ainda em 2022, foi constatado que 38,9% dos RSU coletados no Brasil receberam destinação inadequada, o que corresponde a mais de vinte milhões de toneladas. Como destinação inadequada, incluem-se áreas sem proteção ambiental, como os lixões, aterros controlados e vazadouros (ABREMA, 2023).

Avalia-se que se a quantidade total de gases gerada por todo o resíduo alimentar produzido no mundo fosse agrupada, tal grupo seria o terceiro da lista dos maiores geradores de gases de efeito estufa – como dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4) –, atrás apenas dos Estados Unidos e da China (ISWA, 2022). A compostagem, ao promover a decomposição biológica da matéria orgânica sob condições controladas, transforma o resíduo em adubo ou compostos orgânicos para aplicação agrícola e recuperação de solos degradados (SIQUEIRA, 2016). Por isso, é considerada um processo vantajoso na mitigação de impactos ambientais, redução da geração residual e do volume de resíduos destinados a aterros e lixões, logo, contribuindo como uma solução menos onerosa e mais eficiente (PINHEL, 2018).

Iniciativas como a compostagem estão associadas ao processo de reinserção dos resíduos no ciclo produtivo, contribuindo para um sistema de gestão de resíduos mais

fortalecido e efetivo, baseado principalmente na circularidade. Isso se deve ao fato de que, cada vez mais, o desenvolvimento produtivo mundial atrelado à pressão das reservas de recursos naturais pela demanda por bens de consumo vem evidenciando a necessidade de buscar alternativas e formas inovadoras de produção e consumo, se tratando tanto da busca por melhor qualidade de vida quanto da preservação e uso consciente de recursos naturais. Além disso, a sociedade passa atualmente por desafios em diversas esferas, como as mudanças climáticas, desigualdade social, escassez hídrica, entre tantos outros que estão diretamente relacionados à exploração de recursos para aplicação no modelo econômico linear.

É a partir desta situação que a Economia Circular se apresenta como uma alternativa para este problema. De forma geral, pode-se dizer que esse modelo permite a geração e recuperação de valores de produtos e serviços para todas as partes envolvidas no sistema econômico. Diferente do modelo linear, que se baseia em uma economia de escassez e de curto prazo que foca no processo, o modelo circular foca no valor, com uma visão sistêmica e de longo prazo voltada à restauração do capital natural, gerando impactos socioeconômicos positivos, associados aos fluxos renováveis (CNI, 2018).

No caso do Brasil, a Economia Circular apresenta grande potencial quando se trata da geração de energia renovável - uma das condições chave para tal modelo econômico - a partir da biomassa da cana-de-açúcar, principalmente devido às características climáticas do país, que possui forte tendência à expansão agrícola baseada na exploração dos solos. Nesse sentido, analisando não somente o uso e ocupação do solo, mas também os resíduos gerados ao longo das diferentes etapas dos processos produtivos no setor sucroalcooleiro, cabe direcionar mais atenção a este segmento - de modo a otimizar a gestão de resíduos e mitigar impactos ambientais.

Em suma, a problemática da geração e disposição inadequada de resíduos sólidos associada ao uso intensivo dos solos, evidencia um crescimento também na degradação destes. A degradação do solo se refere à perda de qualidade de seus componentes, que, quando degradados, sofrem redução da capacidade de se recuperar e retornar ao equilíbrio - ultrapassando sua capacidade de resiliência (ZUQUETTE, RODRIGUES, PEJON; 2013) - principalmente devido a ações antrópicas. De modo geral, a degradação promove a perda de funções ambientais do solo, alterando negativamente suas propriedades químicas e físicas (SÁNCHEZ, 1998), o que pode interferir nos ciclos biogeoquímicos e na paisagem, além de gerar riscos à saúde e segurança pública (TAVARES, 2013).

A classificação das áreas degradadas é baseada em fatores como o tipo de uso ou processo sob o qual é submetida, a intensidade da degradação, extensão da área degradada, componentes e propriedades ambientais degradadas e geoindicadores. A partir da avaliação deste conjunto fatorial, a degradação ambiental contempla a perda de biodiversidade, funções ecossistêmicas, proteção contra processos erosivos, alteração da paisagem natural e riscos à saúde e segurança associados às áreas contaminadas (ZUQUETTE, RODRIGUES, PEJON; 2013). Considerando todos estes aspectos, é possível entender a magnitude do prejuízo econômico e socioambiental que acompanha os processos de degradação do solo e seus efeitos sobre o ecossistema.

Entre as atividades antrópicas passíveis de degradação ambiental, as indústrias sucroenergéticas não são as únicas a serem observadas, cabendo ressaltar uma das mais antigas e relevantes ao desenvolvimento econômico brasileiro, que é a atividade de mineração (BOSCOV, 2008). Os resíduos resultantes deste setor representam um problema socioambiental persistente, impactando o meio desde a etapa de prospecção mineral e podendo resultar em casos extremos de contaminação e riscos à saúde pública, devido aos metais potencialmente tóxicos em sua composição (RODRIGUES, 2019).

Sob o cenário de urbanização e industrialização crescentes no Brasil e no mundo, a dispersão de metais potencialmente tóxicos é uma problemática grave que muitas vezes está vinculada à disposição inadequada de resíduos de diferentes origens. Os resíduos de mineração de minerais metálicos não ferrosos podem ser considerados resíduos perigosos industriais, apresentando propriedades, como o risco à saúde pública - devido a suas propriedades físico-químicas, toxicidade e solubilidade em água -, ligadas diretamente aos metais potencialmente tóxicos (SCHALCH et al., 2019). Por isso, a gestão adequada destes resíduos é de fundamental importância.

Além da contaminação por metais potencialmente tóxicos, outra forma de degradação relevante no cenário brasileiro e mundial são os processos erosivos. Com a retirada de material geológico do solo pelos processos erosivos e subsequente o assoreamento de corpos d'água, tem-se por consequência a redução do volume armazenado e da qualidade da água, bem como a alteração da paisagem e de fatores como biodiversidade, condições de consumo ambiental e da vida humana como um todo (ZUQUETTE, RODRIGUES, PEJON; 2013).

Neste contexto, conclui-se que os solos são componentes ambientais fundamentais à manutenção dos ecossistemas e à sobrevivência humana e, portanto, a recuperação das áreas degradadas por erosão e contaminação se faz necessária, principalmente sob a perspectiva de soluções integradas que reduzam a disposição inadequada de resíduos enquanto contribuem

com a mitigação de impactos severos ao meio ambiente, saúde e sociedade. Projetos voltados à investigação e análise dos parâmetros que cercam os temas apresentados incentivam a pesquisa e a busca por alternativas aos impactos ambientais associados à degradação do solo, crescimento populacional, tendências de consumo e gestão de resíduos, contribuindo com a construção de uma sociedade mais sustentável e comprometida com a recuperação ambiental e estando dentro dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

O objetivo principal da presente pesquisa foi avaliar a utilização dos compostos de torta de filtro de cana-de-açúcar e da fração orgânica de RSU quanto à identificação de propriedades adequadas para aplicação na recuperação de áreas degradadas por erosão e contaminação, a partir de uma análise comparativa das pesquisas desenvolvidas por Raimondi (2019) e Lima (2022).

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos incluíram:

- Comparar a capacidade de adsorção e as propriedades dos compostos;
- Comparar as propriedades químicas de ambos os compostos que são relevantes para recuperação de solos degradados pela erosão;
- Avaliar os pontos fortes e fracos dos dois compostos quando comparados quanto à capacidade de adsorção e propriedades apresentadas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Gestão e Reaproveitamento de Resíduos Sólidos

De acordo com a Lei nº 11.445/2007, o princípio da universalização deve reger os serviços públicos de saneamento básico, determinando-se ser conferido a toda a população brasileira o direito de possuir acesso aos mesmos (SNIS, 2022). Tal preceito é respaldado pelo direito à vida e a condições adequadas de saúde e bem-estar garantido pela Declaração Universal dos Direitos Humanos (ISWA, 2022). Cabe ressaltar a importância da gestão dos resíduos sólidos e da limpeza urbana na redução dos impactos ambientais e à saúde humana, garantindo melhor qualidade de vida à sociedade.

No entanto, um sistema de gestão de resíduos mais justo ainda é um desafio no Brasil e no mundo. De acordo com a ISWA, qualifica-se a possibilidade de um aumento de 70% na geração global anual de resíduos sólidos urbanos até 2050 (ISWA, 2022). A crescente geração de resíduos representa um dos maiores problemas ambientais da atualidade e, por isso, exige medidas que visem a minimização da geração e disposição final destes resíduos. Neste contexto, é de suma importância a criação de meios mais eficientes de proteção à saúde humana, à natureza e ecossistemas, mitigação de mudanças climáticas e melhoria da qualidade do solo (ISWA, 2022).

Visando o melhor gerenciamento de resíduos sólidos, a norma brasileira ABNT NBR 10.004/2004 estabelece no território nacional a classificação dos resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública. Segundo a norma, consideram-se os resíduos nos estados sólido e semissólido quando resultantes de atividades industriais, domésticas, hospitalares, comerciais, agrícolas, de serviços e de varrição, incluindo lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição (ABNT, 2004).

A partir das diretrizes da norma em questão, a classificação dos resíduos sólidos considera diversos aspectos, como por exemplo, a fonte geradora, o grau de degradabilidade e periculosidade e as condições de umidade. Quanto à periculosidade, consideram-se características físicas, químicas ou infectocontagiosas que o tornam um risco ao meio ambiente e/ou à saúde pública, caso gerenciado de forma inadequada (ABNT, 2004). Sob esse viés, os resíduos são classificados em três classes: Perigosos (I), Não Perigosos e Não Inertes (IIA) e Não Perigoso e Inertes (IIB) (ABNT, 2004).

Os Resíduos Perigosos (Classe I) recebem esta classificação por apresentarem periculosidades que oferecem riscos à saúde pública - aumentando ou provocando

mortalidade e doenças - e ao meio ambiente, caso não tratados adequadamente. Os Resíduos Não Perigosos e Não Inertes (Classe IIA) não apresentam periculosidade, porém possuem propriedades como combustibilidade, biodegradabilidade e solubilidade em água. Já os Resíduos Não Perigosos e Inertes (Classe IIB) não apresentam periculosidade ou constituintes solubilizados e dificilmente se modificam em pouco tempo, pois não sofrem alterações químicas, físicas ou biológicas quando em contato com água (ABNT, 2004).

3.1.1 Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)

Quanto à fonte geradora, um destaque deve ser direcionado aos resíduos sólidos urbanos (RSU), gerados nos ambientes domiciliares, comerciais, de varrição, feiras livres, capina e poda (ABNT, 2004). Esta classificação merece considerável atenção pois o Brasil é um dos países que se encontra entre os maiores geradores de resíduos sólidos no mundo e apresenta uma crescente geração dos RSU (IPEA, 2020). Como possível evidência, observa-se o aumento da geração total de RSU no Brasil de aproximadamente 69,7 milhões de toneladas por ano em 2010 (ABRELPE, 2020) para cerca de 82,5 milhões de toneladas por ano em 2020 (ABRELPE, 2021). Nesse sentido, é válido considerar que desde a promulgação da PNRS em 2010, nota-se que os instrumentos de gestão e gerenciamento legais – como os acordos setoriais e iniciativas de logística reversa – não são tão efetivos no país, em parte por falta de interesse de determinados setores da sociedade (IPEA, 2020).

Ainda que os padrões comportamentais de consumo tenham sofrido impactos ao longo dos anos, como por exemplo, diante do cenário mundial vivido entre 2020 e 2022, com a expansão dos efeitos da pandemia de COVID-19, nota-se uma dificuldade na proposição de soluções integrativas que melhorem a eficiência da gestão e gerenciamento de RSU no país. No período em questão, com o isolamento domiciliar, a transferência de atividades cotidianas externas para as residências modificou padrões comportamentais da geração e consumo, como no caso das embalagens relacionadas a serviços de *delivery*. Além disso, considerando o contexto emergencial de saúde vivido, observou-se um aumento substancial na produção, uso e descarte de equipamentos de proteção individual (EPIs) hospitalares, principalmente máscaras e luvas. Por tais razões, este período foi um relevante responsável pelo aumento da geração de RSU em diferentes setores da economia. Como resultado, somente no período de 2020 a 2021 no Brasil, observou-se um expressivo aumento de 4% na geração de RSU per capita, superior à média nacional anual de crescimento de 1% (ABRELPE, 2021).

Em 2022, houve uma redução em relação à geração observada em 2021, em função do aumento do desemprego - e, consequentemente, redução do poder de compra - pós-pandemia.

Outros fatores, como o retorno da população às atividades fora de casa e casos de manutenção do modelo híbrido de trabalho, realocaram de certa forma a geração residual. No entanto, este valor ainda representava uma geração média diária de 1,04 kg de RSU por habitante, totalizando cerca de 77,1 milhões de toneladas no ano, além de um crescimento superior a 14% na geração de resíduos de saúde (ABREMA, 2023).

Como perspectiva futura, estima-se que em 2050 se observe uma geração municipal global de 3,8 bilhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos por ano, caso não sejam elaboradas e aplicadas ações urgentes e mais efetivas de controle e gerenciamento de resíduos (PNUMA, 2024).

3.1.1.1 Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil

A análise da composição gravimétrica dos RSU indica que a matéria orgânica representa 45,3% dos RSU gerados no país (SINIR, 2020), cenário que não se restringe ao Brasil, visto que a fração orgânica corresponde a cerca de 46% da geração global de resíduos urbanos (PINHEL et al., 2018). Além da matéria orgânica, associada aos resíduos domiciliares, consideram-se também parte da fração orgânica dos RSU os resíduos de poda e capina provenientes da limpeza urbana e atividades de jardinagem (GUERMANDI, 2015).

Diante do cenário de crescente geração de resíduo no país, é determinado pela PNRS que a fração orgânica dos RSU deve ser destinada à compostagem, a fim de ser transformada em adubo, reduzindo o volume acumulado e os impactos ambientais como a liberação de gases do efeito estufa (GEEs) e chorume resultantes da degradação de tais resíduos, quando dispostos inadequadamente em lixões e aterros (SIQUEIRA e ABREU, 2016). A compostagem é o processo pelo qual (sob presença de oxigênio e ambiente favorável em relação à umidade e temperatura) os resíduos orgânicos podem ser reciclados. Neste processo, microrganismos como fungos e bactérias degradam a matéria orgânica, permitindo que as plantas assimilem os nutrientes resultantes (SNIS, 2021).

Enquanto a decomposição de cada tonelada de resíduo orgânico em aterros sanitários sem coleta de gás pode gerar 47 kg de CH₄ e nos aterros com coleta de gás, 33 kg de CH₄, a decomposição através da compostagem gera apenas 3 kg de CH₄ por tonelada de resíduo (ABRELPE, 2020). Deste modo, a compostagem configura um processo aeróbio que contribui para mitigar emissões GEEs, enquanto os aterros envolvem processos anaeróbios e, portanto, geram uma quantidade mais elevada de metano por tonelada de resíduo orgânico, corroborando as mudanças climáticas (AMLINGER; PEYR; CUHLS, 2008; BARTON;

ISSAIAS; STENTIFORD, 2008; VANOTTI; SZOGI; VIVES, 2009; PICKIN; YUEN; HENNINGS, 2002).

Ao promover a decomposição biológica da matéria orgânica, a compostagem transforma o resíduo em adubo ou compostos orgânicos para aplicação agrícola e recuperação de solos degradados (SIQUEIRA e ABREU, 2016). Ainda que este processo seja muito positivo para a redução dos impactos ambientais ao diminuir o volume de material e a sobrecarga de aterros sanitários, desempenhando funções ecológicas importantes e representando uma solução de baixo custo e alto potencial (PINHEL et al., 2018), o processo não é devidamente praticado no Brasil. Apenas 0,5% do total de resíduos coletados no país é efetivamente compostado (SNIS, 2021) e as usinas ou pátios de compostagem representam apenas 1,5% das unidades de processamento de RSU em operação no país (SNIS, 2022).

Tais aspectos reforçam o fato de que a compostagem não é priorizada como estratégia para o tratamento de resíduos e promoção da saúde pública no país. Entre os agentes deste problema, é possível destacar a organização dos sistemas de coletas de resíduos nos municípios brasileiros. Em 2022, por exemplo, mais de 5 milhões de toneladas de RSU não foram coletadas, recebendo destinação inadequada (ABREMA, 2023). No caso específico da fração orgânica, ressalta-se dificuldade da administração pública em separar os resíduos orgânicos dos recicláveis e rejeitos, dificultando também a alteração da disposição final dos mesmos (SIQUEIRA e ABREU, 2016).

O problema subsequente está relacionado à qualidade do resíduo orgânico para a compostagem, visto que, nos casos em que este não é descartado separadamente, dificilmente obtém-se a qualidade necessária para geração de um composto final de qualidade - que possa ser aplicado na agricultura, por exemplo. O composto acaba, nestes casos, sendo gerado com uma carga de impurezas e metais potencialmente tóxicos que - devido ao potencial de contaminação - impede outro destino que não seja a disposição em aterros (SIQUEIRA e ABREU, 2016).

Além disso, fatores como a falta de planejamento técnico, conhecimento da tecnologia e estudos prévios à implementação de usinas de compostagem representam entraves ao funcionamento adequado e manutenção destas, corroborando sua desativação gradativa (SIQUEIRA e ABREU, 2016). Por estas razões, se apresentam cada vez mais necessárias ações e ideias que promovam soluções inovadoras e sustentáveis no campo da compostagem de resíduos orgânicos.

3.1.2 Resíduos da Produção de Cana-de-Açúcar

De acordo com os dados mais recentes da Produção Agrícola Municipal (PAM), divulgados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (Tabela 1), a cana-de-açúcar apresenta-se como a lavoura temporária mais produzida no Brasil, com uma média de aproximadamente 732 milhões de toneladas produzidas de 2020 a 2022 (IBGE, 2023). Este cenário é historicamente viabilizado no país devido ao seu potencial agrícola, associado a condições climáticas e técnicas de plantio favoráveis (RAIMONDI, 2019).

Tabela 1: Lavouras Temporárias de Maior Produção no Brasil.

Produto	Quantidade produzida (Milhões de Toneladas)		
	2020	2021	2022
Cana-de-açúcar	756,07	715,68	724,43
Soja (em grão)	121,82	134,80	120,70
Milho (em grão)	103,99	88,27	109,42

Fonte: Adaptado de IBGE (2023).

Apesar de possível receptor de compostos orgânicos para atividades produtivas, o setor agrícola é considerado um potencial gerador de resíduos, principalmente no que se refere ao setor sucroenergético da agroindústria. Esta situação se deve à elevada geração de bagaço e palha de cana-de-açúcar a cada tonelada utilizada da mesma na produção de etanol (GUEDES et al., 2010).

O Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares) fornece um diagnóstico da geração de resíduos no Brasil e indica que em 2012 observava-se um índice representativo da cana-de-açúcar como 97,57% das culturas geradoras dos principais resíduos agrícolas no país (BRASIL, 2022). De acordo com os dados atuais do observatório da União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia (UNICA), foi observado um aumento na moagem de cana no país de aproximadamente 534 milhões de toneladas na safra 2012/2013 para cerca de 654 milhões de toneladas na safra 2023/2024 (UNICADATA, 2024). Nesse sentido, cabe atenção ao aumento da geração residual proporcional ao aumento produtivo nas atividades sucroalcooleiras, bem como das possibilidades de aproveitamento destes resíduos.

Sob esse viés, diante do cenário global de crescimento populacional e exploração de recursos ambientais, com uma elevada e constante demanda por energia elétrica no cotidiano da sociedade, a biomassa da cana-de-açúcar é uma opção de energia renovável que desponta com seu potencial de geração de energia no Brasil (MAUAD; FERREIRA; TRINDADE, 2017). O próprio etanol produzido a partir da cana pode ser considerado um fator de

importância no cenário ambiental, visto que constitui um biocombustível capaz de reduzir a necessidade e utilização de combustíveis fósseis automotivos (COELHO et al., 2006), contribuindo para a redução das emissões de GEEs e aprimoramento da segurança energética caracterizada por uma menor dependência do petróleo (AYRES; AYRES; 2012).

Ainda assim, a elevada produção de cana e seus derivados requer atenção e desenvolvimento de metodologias que auxiliem cada vez mais na mitigação de impactos ambientais. De modo que, ao buscar oportunidades de melhoria correlacionadas entre as questões ambientais da atualidade, seja possível estruturar unidades produtivas mais sustentáveis e que contribuam para diferentes frentes ambientais.

3.1.2.1 Geração e Destinação de Resíduos Sucroalcooleiros no Brasil

No caso das usinas do setor sucroenergético, após colhida e enviada para as usinas, a cana passa pelos processos de limpeza e moagem para obtenção do caldo a ser utilizado na produção de açúcar e Etanol de Primeira Geração (E1G), gerando como subprodutos o bagaço e a palha (SENNA; ANSANELLI, 2016). Estes são então utilizados nas caldeiras, onde sua queima gera vapor e, consequentemente, energia elétrica para abastecimento próprio da unidade e comercialização externa da energia excedente (MERCANTE, 2021).

Atualmente, grandes produções do ramo estão iniciando a utilização do bagaço e da palha da cana para a produção energética de forma diferenciada (MAUAD; FERREIRA; TRINDADE, 2017). O reaproveitamento destes resíduos gera o Etanol de Segunda Geração (E2G), cuja produção se baseia na conversão da própria biomassa em etanol (COSTA; MACHADO, 2020). O processo intensifica a produção de energia de modo mais eficiente, além de reduzir os impactos ambientais relacionados às emissões de CO₂ e à degradação do solo por conta da vinhaça - subproduto da destilação do caldo na produção do E1G (SANTOS et al., 2012). Ainda que rica em nutrientes, a vinhaça apresenta pH ácido e alta demanda bioquímica de oxigênio (DBO), fazendo com que sua aplicação no solo para fins de fertilização e melhoria exija atenção a uma dosagem limitada e corretamente analisada para evitar potenciais impactos de contaminação ao solo e lençol freático (LIMA et al., 2016).

Entretanto, ainda que esta inovação no setor energético apresente diversos referenciais teóricos e potenciais vantagens no que se refere à mitigação de impactos ambientais, a prática industrial é muito recente e seu custo, muito elevado (COSTA; MACHADO, 2020).

Além dos resíduos apresentados, cabe atenção também ao lodo decantado do processo de clarificação do caldo na fábrica de açúcar que, após passar por processos de carbonatação e sulfitação e ser filtrado recebe a denominação de torta de filtro (FRAVET et al., 2010).

Composta majoritariamente por água e matéria orgânica (KINPARA, 2020), a torta de filtro é um dos resíduos mais gerados no processamento da cana, com uma média de 35 kg gerados de torta a cada tonelada moída de cana (NUNES JÚNIOR, 2008; SANTOS et al., 2011). Ainda assim, de acordo com Raimondi (2019), encontra-se uma situação incipiente de pesquisas mais aprofundadas no Brasil acerca das propriedades da torta, como por exemplo seu potencial adsorptivo.

Atualmente, é possível encontrar estudos sobre a aplicação da torta de filtro como fertilizante no país (RAIMONDI, 2019; KINPARA, 2020; SANTOS, 2023), porém o continente asiático lidera a produção de conteúdo deste segmento (KUMAR et al., 2017; RAJPUT et al., 2022; MUSTAPEN et al., 2024). Esta situação pode ser explicada pelo fato de que a Ásia destaca-se como o continente mais populoso do mundo (ALPINO et al., 2022) e, portanto, o desenvolvimento de pesquisas voltadas à produção mais eficiente de alimentos em vista ao crescente índice populacional pode ser uma necessidade - e desafio - nestas regiões.

Além disso, em virtude do alto potencial agrícola e sucroenergético do Brasil, mantém-se no país um modelo produtivo baseado na reutilização da torta de filtro como fertilizante nas próprias lavouras das unidades industriais. A consolidação desta prática tende a promover um cenário de comodidade e, por isso, pode ser considerada um obstáculo ao desenvolvimento de pesquisas e buscas por novas metodologias diferenciadas na área (RAIMONDI, 2019).

No entanto, por maiores que sejam as áreas de aplicação de torta, sua elevada taxa de geração demanda que novas alternativas continuem sendo exploradas. Não somente para obter resultados efetivos de mitigação de impactos ambientais associados a este resíduo, mas também visando oportunidades de recuperação de ecossistemas a partir das propriedades da torta de filtro de cana-de-açúcar, como por exemplo o fornecimento de nutrientes como fósforo e cálcio ao solo (ROSSETO; DIAS; VITTI, 2008).

3.1.3 Economia Circular

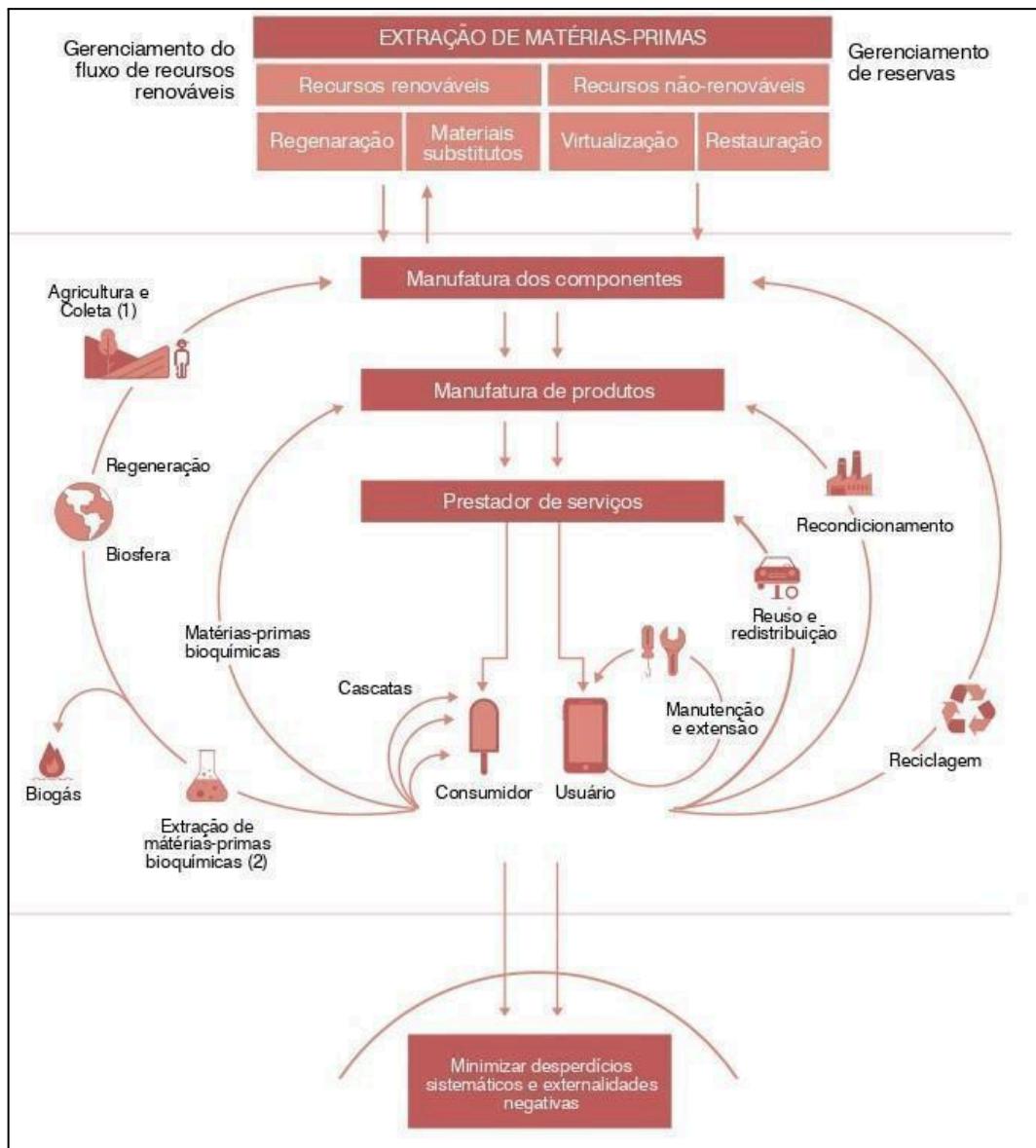
Constituindo uma organização sem fins lucrativos voltada a uma maior celeridade na transição rumo à implementação da Economia Circular na sociedade, a Ellen MacArthur Foundation é uma das principais disseminadoras da Economia Circular no Brasil. Sob tal autoria, este modelo econômico é definido como:

Uma economia circular é um sistema industrial que é restaurador ou regenerativo por intenção e design (...) substitui o conceito de "fim de vida" por restauração, muda para o uso de energia renovável, elimina o uso de produtos químicos tóxicos, que prejudicam a reutilização, e visa a eliminação de resíduos por meio do design superior de materiais, produtos, sistemas e, dentro disso, modelos de negócios (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2013).

No Brasil, além da NBR 10.004/2004, a gestão e o gerenciamento de resíduos em território nacional são organizados segundo uma legislação específica. A Lei Federal nº 12.305 de 2 de agosto de 2010, regulamentada pelo Decreto nº 10.936 de 12 de janeiro de 2022, institui a PNRS e estabelece instrumentos e diretrizes para empresas e setores públicos exercerem o gerenciamento adequado dos resíduos gerados. Um aspecto importante da PNRS é o fato de envolver a sociedade como um todo na responsabilidade pela gestão dos resíduos, apresentando o conceito de responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos (BRASIL, 2010).

O ciclo de vida está associado, em termos de engenharia e gestão, às linhas de pensamento que baseiam o modelo de Economia Circular. Este busca equilibrar o fluxo de recursos renováveis envolvidos no processo produtivo, sob uma visão sistêmica e de longo prazo direcionada à regeneração e restauração do capital natural (Figura 1). Um dos principais objetivos deste modelo é gerar impactos econômicos e sociais positivos, associados ao crescimento econômico atrelado aos fluxos renováveis (CNI, 2018).

Figura 1: Diagrama do Fluxo de Materiais na Economia Circular.



Fonte: CNI (2018).

Nesse sentido, o conceito de Economia Circular pode ser efetivamente aplicado tanto no contexto da geração de resíduos sólidos urbanos quanto dos resíduos sucroalcooleiros, de modo a fornecer potencialidades ao solo. Ao compostar a fração orgânica dos RSU, agraga-se valor a este material, retornando-o ao ciclo produtivo a partir da compostagem e utilizando-o como adubo ou fertilizante (CAO et al., 2023; PRIETO, 2019; SRIVASTAVA et al., 2016). Do mesmo modo, para os resíduos de torta de filtro, retorna-se também ao ciclo produtivo ao transformá-los em composto e direcionar o material à aplicação agrícola para melhoria do solo (COSTA, 2023; RAIMONDI, 2019; DIAZ, 2016).

3.1.3.1 Compostos

Estando a compostagem relacionada à transformação da matéria orgânica pela atividade microbiana, ainda que representem alternativas de menor custo para a melhoria da qualidade dos solos e retenção de contaminantes, os compostos orgânicos e de torta de filtro de cana-de-açúcar devem passar por diferentes análises antes de sua aplicação. Existem processos bioquímicos, aeróbios e anaeróbios, associados à compostagem que interferem nas características do composto. Por isso, para avaliar a qualidade final do composto obtido, é necessário realizar ensaios que avaliem também fatores como umidade, aeração, relação carbono/nitrogênio e pH (LIMA, 2017).

Após devidamente avaliado, o composto é definido para aplicação nas misturas de solo, de acordo com diferentes proporções e objetivos pretendidos. A degradação do solo pode ocorrer por diversos fatores, de modo que cada caso requer fontes orgânicas e compostos específicos. No caso em questão, destaca-se a elevada geração no Brasil tanto da fração orgânica de RSU (SINIR, 2020), quanto dos resíduos de cana-de-açúcar associados ao setor sucroenergético (GUEDES et al., 2010) como motivações para a origem dos compostos utilizados. Nesse sentido, propõe-se a análise da interação de cada tipo de composto no solo, de acordo com suas respectivas características, referenciais teóricos e ensaios práticos.

Para o composto de torta de filtro de cana-de-açúcar, Raimondi (2019) descreveu potencial hidrogeniônico (pH) de caráter básico a neutro, que favorece a adsorção e precipitação de metais potencialmente tóxicos e a capacidade de troca catiônica (CTC), apresentando também boa retenção de cátions e potencial de aumento da porosidade do solo. Além disso, observa-se uma associação entre a presença de cargas negativas e a elevada capacidade de retenção de micronutrientes e metais potencialmente tóxicos.

Estudos mais recentes realizados por Lahori et al. (2023) se basearam na utilização do composto de torta de filtro de cana-de-açúcar para avaliar proporções de aplicação em misturas de composto e solos contaminados por rejeitos industriais não tratados e efluentes urbanos. Após irrigação das amostras com água destilada e incubação por 15 dias para estabelecimento das reações químicas entre os componentes, os resultados obtidos pelos autores também indicaram impacto positivo do composto de torta de filtro no crescimento vegetal, a partir do aumento do pH, da biomassa vegetal - em decorrência do elevado teor de matéria orgânica (MO) do composto - e da CTC.

A Tabela 2 apresenta o comparativo entre tais estudos.

Tabela 2: Propriedades do Composto de Torta de Filtro de Cana-de-Açúcar.

Parâmetro	Raimondi, 2019	Lahori et al., 2023
pH	$8,3 \pm 0,1$	$7,4 \pm 0,5$
CTC	$38,0 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$	$84,2 \pm 0,2 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$
MO	50,9%	$41,2 \pm 0,1\%$
CE	$1,07 \pm 0,12 \text{ dS/m}$	$4,32 \pm 0,80 \text{ dS/m}$

Fonte: Raimondi (2019) e Lahori et al. (2023).

No que se refere à fração orgânica dos RSU, Cao et al. (2023) reforçam a viabilidade econômica da compostagem deste grupo de resíduos, destacando a substituição de fertilizantes químicos pelo composto orgânico. O composto orgânico de RSU, de acordo com Lima (2017), assim como o composto de torta de cana-de-açúcar, apresenta características favoráveis à adsorção de cátions metálicos - também associadas à presença de cargas negativas e elevado teor de matéria orgânica.

A Tabela 3 apresenta o comparativo entre os estudos realizados por Guermandi (2015) e Lima (2022) acerca das características dos compostos orgânicos e seu potencial de utilização.

Tabela 3: Propriedades do Composto da Fração Orgânica de RSU.

Parâmetro	Guermandi, 2015	Lima, 2022
pH	7,9 - 8,4	$9,3 \pm 0,0$
CTC	$76,2 - 90,8 \text{ cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$	$110,0 \pm 2,8 \text{ cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$
CE	1,13 - 1,72 dS/m	$8,60 \pm 0,17 \text{ dS/m}$

Fonte: Guermandi (2015) e Lima (2022).

Tais valores permitem uma análise integrada, proposta por Guermandi (2015), sobre a importância destes compostos na aplicação e comercialização de fertilizantes. O estudo em questão indica que não somente o composto é indicado para o solo, como também atende a legislação - na esfera de instruções normativas - brasileira no quesito de fertilizantes. Deste modo, corroborando para a transformação dos resíduos concomitante à melhoria do solo.

3.1.3.1.1 Fatores para Determinação da Maturidade do Composto

Na compostagem, o carbono é disponibilizado para consumo nas atividades metabólicas a partir da emissão de CO₂ decorrente da atividade microbiana (LIMA, 2017) e a relação entre carbono e nitrogênio é considerada um indicador de biodegradabilidade (SOUZA et al., 2020). A falta destes nutrientes é um fator limitante para a atividade

microbiológica que ocorre durante a compostagem, visto que ao carbono e nitrogênio são atribuídas as funções de fornecer energia e viabilizar a síntese celular, respectivamente. Por isso, tanto relações C/N muito elevadas quanto reduzidas limitam o desenvolvimento dos microrganismos, em virtude da redução da quantidade de nitrogênio disponível para o processo (FERNANDES; SILVA, 1999).

Observa-se na literatura que a relação C/N é de cerca de 6,66 para o composto de RSU orgânico (LIMA, 2022) e de 10,00 o composto de torta (RAIMONDI, 2019). Esta faixa de 6 a 10 está relacionada à decomposição do material, ou seja, pode-se dizer que o composto de RSU apresenta maior grau de decomposição em relação ao composto de torta (LIMA, 2017). No entanto, sob a análise de Kiehl (1985), o composto de torta se enquadra na faixa ótima para aplicação como fertilizante, estando mais próximo do limite de 8 a 10 (relação C/N). Neste caso, constata-se a humificação da matéria orgânica - não havendo fatores diretamente impeditivos à sua decomposição - e, portanto, considera-se que o tempo adequado para iniciar o plantio foi atingido.

Para os compostos finais, é interessante avaliar o teor de matéria orgânica, a fim de avaliar a capacidade de adsorção de cátions inorgânicos. Quando se trata da aplicação no solo como fertilizante, observa-se uma melhor absorção de nutrientes quando o resíduo mineral é majoritariamente solúvel. Este resíduo é o resultado da amostra após a compostagem, que transforma a matéria orgânica em sais solúveis que promovem aumento do resíduo mineral solúvel associado ao composto. Deste modo, obtém-se melhores resultados na fertilização e, consequentemente, na absorção de nutrientes pelo solo, tendo em vista que somente os sais minerais solúveis são assimilados pelas plantas (KIEHL, 1985).

A relação C/N é também considerada uma importante métrica para o grau de maturação do composto. Esta associação se deve ao fato de que a transformação do carbono em CO₂ na compostagem faz com que se reduza a disponibilidade de carbono orgânico ao longo do processo, isto é, quanto menor a relação C/N, maior o avanço na decomposição da matéria e consequente transformação do carbono em CO₂ e, portanto, maior a evolução da maturação do composto analisado (BEZ, 2020). Nesse sentido, retorna-se ao conceito da humificação da matéria orgânica, pois com tal avanço da decomposição associada à compostagem, a vida útil de uma parcela dos organismos envolvidos nestas relações chega ao fim, liberando nitrogênio que retorna ao processo para ser utilizado pelo vegetal e/ou demais microrganismos (KIEHL, 1985).

3.2 Áreas Degradadas

Segundo o artigo 3º do Capítulo I da Instrução Normativa IBAMA Nº 14/2024, classifica-se como área degradada uma “área impossibilitada de retornar por uma trajetória natural, a um ecossistema que se assemelhe a um estado previamente conhecido” (IBAMA, 2024, p.1). Diferente das áreas alteradas ou perturbadas - que possuem mecanismos de regeneração natural gradual após impacto ambiental -, as áreas degradadas não conseguem retornar naturalmente ao estado e qualidade anteriores à degradação. Nesse caso, mesmo com o tempo, é necessário investir em intervenções - como recuperação, restauração ou reabilitação - para que a área volte a contribuir com o ecossistema (SAMPAIO et al., 2021).

Sob a perspectiva de Zuquette, Rodrigues e Pejon (2013), considera-se efetivamente como degradação ambiental o cenário em que processos antrópicos promovem um efeito ao comportamento natural do meio que excede a capacidade de resiliência do mesmo, alterando fatores naturais como a produtividade. Tais efeitos geram notável impacto ambiental e socioeconômico, de modo que a própria ONU realiza estudos globais sobre os níveis de degradação dos solos em diferentes países e regiões desde a década de 1990.

Este cenário se deve ao fato de que uma das principais e mais complexas questões que cercam os processos de degradação é a correlação entre seus efeitos, isto é, quando uma das funções do solo é afetada, a tendência é que demais funções também sofram consequências associadas. Como resultado, tem-se uma reação em cadeia que atinge diferentes níveis da composição ambiental do meio, intensificando o impacto causado (ZUQUETTE, RODRIGUES, PEJON; 2013).

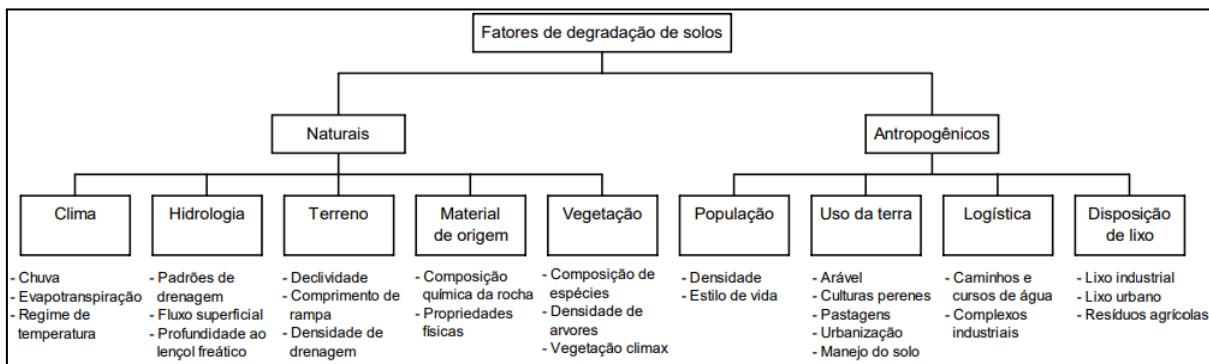
As causas da degradação do solo podem ser naturais, como profundidade, textura e mineralogia do solo (COOPER, 2008). Porém há maior influência humana como intensificador do processo, por conta da ocupação urbana e industrial - e a geração e disposição de resíduos associados -, desmatamento, queimadas e atividades de uso intensivo do solo, como a agropecuária e a mineração.

Um dos maiores pontos de atenção frente às áreas degradadas é sua evolução, pois quanto mais avançada a degradação, mais complexa é sua recuperação. Por isso, é importante que as áreas mais vulneráveis, sob antropização ou logo após a degradação passem por estudos de monitoramento ambiental e análise do solo, visando maior proteção ambiental e prevenção de danos.

Entre os indicadores de análises de solos (condicionantes geológicos e geotécnicos), tem-se a CTC, concentração e mobilidade de contaminantes, porosidade, condutividade

elétrica, granulometria, pH, entre outros. Estes formam o conjunto característico de propriedades de cada solo - auxiliando a determinar sua qualidade - e estão sujeitos à ação de agentes de degradação (Figura 2), responsáveis por alterações no ambiente (COOPER, 2008).

Figura 2: Fatores Relacionados à Degradação do Solo.



Fonte: Cooper, 2008.

Tais fatores podem atuar como condicionantes e/ou deflagradores, ou seja, sob determinadas circunstâncias naturais ou antropogênicas, seus efeitos no solo tendem a ser intensificados. Nesse sentido, considerando os diferentes agentes naturais e antropogênicos causadores da degradação, destacam-se as particularidades das áreas degradadas por contaminação e por processos erosivos - cenários relevantes para o presente estudo.

3.2.1 Degradação do Solo por Contaminação

Como área contaminada, o artigo 3º da Seção III da Lei Estadual nº 13.577/2009 - relacionada à qualidade do solo e gerenciamento das áreas contaminadas no Estado de São Paulo - define:

Área Contaminada: área, terreno, local, instalação, edificação ou benfeitoria que contenha quantidades ou concentrações de matéria em condições que causem ou possam causar danos à saúde humana, ao meio ambiente ou a outro bem a proteger. (SÃO PAULO, 2009, p. 2).

Em complemento, é determinado pelo artigo 3º do Capítulo 2 da Lei Federal nº 12.305/2010 - que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos - que uma área contaminada se refere ao “local onde há contaminação causada pela disposição, regular ou irregular, de quaisquer substâncias ou resíduos” (BRASIL, 2010, p. 1). A análise dos conceitos determinados pela legislação auxiliam na construção do entendimento acerca destas áreas e no desenvolvimento de propostas para sua remediação e reabilitação.

As substâncias contaminantes podem ser encontradas no ambiente sob diferentes formas e locais. Presentes no solo, ar e águas superficiais e subterrâneas, os contaminantes podem se apresentar em forma de gases, líquido, em solução em águas subterrâneas ou mesmo nas formas sólidas e semissólidas. Nesse sentido, o principal atributo de um contaminante é a concentração que o torna tóxico aos humanos (BOSCOV, 2008).

Quando acima de suas respectivas concentrações limite, os contaminantes reduzem a qualidade de águas superficiais e subterrâneas e limitam o uso do solo (CARALINDA, 2022), devido à perda de funções ecossistêmicas decorrente das alterações físico-químicas que tais elementos propagam na natureza. Por isso, existem técnicas de remediação que visam reduzir os teores de contaminantes a níveis seguros (BOSCOV, 2008).

3.2.1.1 Resíduos de Mineração

Ainda que relacionada ao crescimento econômico brasileiro (BOSCOV, 2008), as atividades de mineração impactam o meio ambiente desde as etapas iniciais, gerando resíduos logo no início da pesquisa e prospecção mineral (RODRIGUES, 2019).

Antes mesmo da efetiva implementação dos processos de lavra e beneficiamento, é necessária uma extração prévia de material a fim de pré-determinar a viabilidade econômica, visto que os diferentes tipos de resíduo gerados pela mineração assim os são de acordo com o que é economicamente ou tecnologicamente viável para a mineração. Esta extração prévia faz com que o entorno do corpo mineralizado seja considerado resíduo, de modo que as etapas seguintes agravam a alteração na paisagem e dão início a um impacto ambiental mais intenso. Os resíduos gerados pela mineração incluem estéril, rejeito e escória - referentes, respectivamente, aos processos de extração, beneficiamento e fundição (RODRIGUES, 2019).

A mineração é prejudicial à qualidade dos solos, não somente no início e durante a atividade, mas também com efeitos posteriores (BOSCOV, 2008). Os resíduos provenientes da mineração representam por si um impacto ambiental muito negativo, relacionado à contaminação do solo, quando descartados de forma inadequada, pois neste caso, contêm metais potencialmente tóxicos em sua composição. O problema agrava-se quando se tem sulfeto em contato com a água e o ar, ocorrendo a Drenagem Ácida de Mina (DAM) e oxidação dos sulfetos. O resultado é a redução do pH e a contaminação por metais potencialmente tóxicos (SALOMONS; FORSTNER; MADER, 1995).

3.2.1.1.1 Metais Potencialmente Tóxicos

Com a revolução industrial e o crescimento da demanda pelos produtos industriais, observa-se um aumento da influência antrópica sobre o meio ambiente e, consequentemente, à disseminação dos metais potencialmente tóxicos. Isto porque estes elementos podem ser considerados litogênicos, quando originados de fontes geológicas, ou antropogênicos, quando originados da atividade humana no solo (TAVARES, 2013).

Os metais potencialmente tóxicos constituem um problema que não se restringe somente ao tempo da atividade a que estão vinculados. Um exemplo dessa particularidade é o caso da mineração de galena na região do Vale do Ribeira (SP). Mesmo encerrando suas atividades em 1995, a poluição e contaminação do solo resultantes deste processo seguem causando problemas ao ambiente e à vida da população local. Ainda é possível detectar concentrações de chumbo (Pb) e cádmio (Cd) nos solos e água da região, e até mesmo na população local (KASEMODEL, 2017; SANTOS e ANJOS, 2022).

Apesar de especificações existentes sobre densidade mínima, o que realmente tende a definir um elemento como metal potencialmente tóxico é a toxicidade da substância ao meio ambiente quando presente em concentrações superiores ao limite de tolerância. Por exemplo, em quantidades reduzidas, o Cobre (Cu) e o Zinco (Zn) são considerados micronutrientes para a nutrição vegetal e o Níquel (Ni) auxilia no crescimento de plantas. Ou seja, diversos metais podem ser nutrientes necessários e positivos para o ecossistema (SALOMONS; FORSTNER; MADER, 1995), porém o cenário é diferente quando se trata de concentrações mais elevadas visto as possibilidades de contaminação e perda de funções relevantes do solo.

Entretanto, a mineração não é a única fonte de contaminação. Os resíduos sólidos, quando dispostos de forma inadequada - como no caso dos lixões -, podem impactar negativamente o solo e viabilizar a contaminação. Um exemplo deste cenário é o caso do “Lixão de Canabrava”, que recebeu diversos tipos de resíduos de Salvador (BA) por aproximadamente trinta anos. Como resultado, observou-se a deposição de 8 milhões de metros cúbicos de resíduo em pouco mais de 60 hectares, o que provocou alterações físico-químicas no solo local. Neste caso, a contaminação ocorre por conta do chorume liberado na decomposição da matéria orgânica dos resíduos. Este é um líquido que apresenta níveis de metais potencialmente tóxicos que promovem a contaminação do solo e lixiviação dos mesmos para o lençol freático e corpos d’água (KUCHARSKI et al., 2011).

Os metais potencialmente tóxicos estão entre os principais exemplos de contaminantes, devido à capacidade de causar sérios riscos e danos não somente ao meio

ambiente, mas também à saúde humana. Neste caso, metais como mercúrio (Hg), Pb e Cd podem desencadear efeitos tóxicos, incluindo danos ao cérebro, rins e pulmões, mutações genéticas, doenças cardiovasculares e até mesmo ação carcinogênica (TELLES, 2022).

Ademais, cabe ressaltar que o comportamento ambiental de um metal potencialmente tóxico não depende apenas da quantidade disponível ou concentração, mas de sua distribuição entre as formas químicas e espécies de ocorrência em sistemas naturais, terrestres e aquáticos. Espécies precipitadas ou adsorvidas, por exemplo, costumam ter mobilidade inferior às formas coloidais ou dissolvidas. Tais análises auxiliam o entendimento do fluxo de metais potencialmente tóxicos no ambiente e contribui para estudos na área (SALOMONS; FORSTNER; MADER, 1995).

3.2.1.1.2 Adsorção

No que tange à contaminação por metais potencialmente tóxicos, tem-se o processo de adsorção como uma opção de reduzir a biodisponibilidade e desacelerar a mobilidade dos mesmos (SALOMONS; FORSTNER; MADER, 1995), o que contribui para projetos de mitigação e tratamento. Estudos realizados acerca do potencial de utilização de compostos para tal finalidade apresentam resultados promissores para a continuidade de pesquisas na área, tanto no que se refere aos compostos orgânicos (ACHIBA et al., 2009; SILVETTI et al., 2016; LIMA et al., 2022) quanto aos de torta de filtro de cana-de-açúcar (SABIR et al., 2013; RAIMONDI et al., 2020; MOHAMAD et al., 2023).

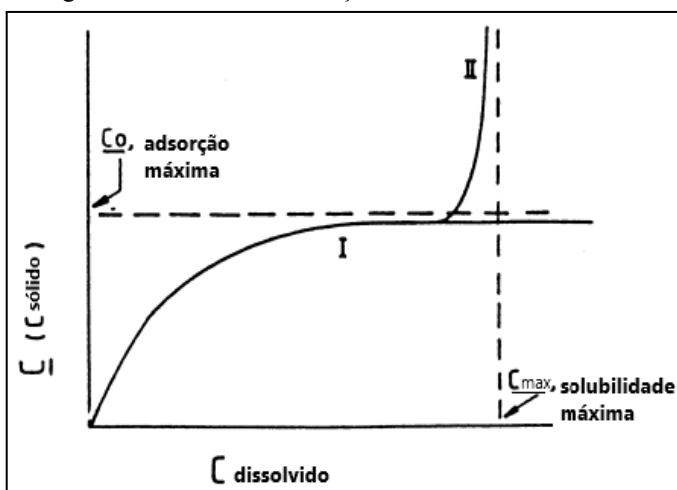
A adsorção ocorre quando o soluto adere à superfície sólida da partícula de solo, ou seja, gerando um acúmulo de determinada substância em uma interface entre duas fases (sólido-líquido, por exemplo). Tal interação é possível, pois o adsorvato - substância em remoção da fase líquida - sofre a ação de forças de atração físicas ou químicas que o direcionam a superfície do adsorvente - fase sólida de acúmulo da substância. Nesta relação, o adsorvato tende a apresentar mais energia livre na solução quando comparado à retenção na superfície sólida. Este é um importante processo no que se refere à qualidade e tratamento da água, logo, uma opção relevante à recuperação de águas contaminadas (BOSCOV, 2008).

Nos solos, a adsorção afeta a distribuição de substâncias entre fases sólido-líquido, seu transporte e as propriedades eletrostáticas de partículas suspensas. Logo, as relações e conexões entre nutrientes, substâncias e solo são afetadas, o que - na contaminação por metais potencialmente tóxicos - auxilia na redução da mobilidade e presença dos mesmos na cadeia alimentar (ZACHARA; WESTALL, 1998; SOARES; CASAGRANDE, 2000).

Para avaliação da adsorção em interface sólido-líquido, utilizam-se as curvas denominadas isotermas de adsorção. Estas se referem à expressão matemática que descreve o equilíbrio entre as concentrações do soluto na solução e na superfície sólida, relacionando sua distribuição e a variação da adsorção - sob temperatura constante - com a concentração de adsorvato na solução (BOSCOV, 2008).

De modo geral, entende-se que uma relação complexa de interações químicas aquosas e heterogêneas controla a mobilidade dos metais potencialmente tóxicos. Conforme Figura 3, a precipitação e adsorção são capazes de desacelerar a disponibilidade e o transporte dos metais, enquanto a solubilidade tende a aumentar com a hidrólise (SALOMONS; FORSTNER; MADER, 1995).

Figura 3: Isotermia de Adsorção e Solubilidade Máximas.



Fonte: Adaptado de Salomons; Forstner; Mader (1995).

3.2.2 Degradação do Solo por Processos Erosivos

A degradação dos solos também ocorre via processos erosivos, causando, em muitos casos, o assoreamento de cursos d'água. No Brasil, a expansão agrícola é um dos maiores causadores deste tipo de problema, tanto quanto ao uso intensivo do solo, como ao desmatamento para a produção (FILIZOLA et al., 2011). A erosão antrópica é uma das principais causas da degradação do solo pelo mundo, associada a fatores como a acidificação e diminuição da matéria orgânica e fertilidade do solo (LAL, 1994).

Os processos erosivos ocorrem pela remoção de camadas superiores da superfície terrestre, de forma lenta quando natural – a partir da remodelação gradual e nivelamento de áreas continentais – ou acelerada quando sob condições naturais excepcionais e intervenção

antrópica. Esta remoção faz com que a camada fertilizada do solo seja perdida e diferentes tipos de materiais geológicos – que possuem também diferentes características geológicas e geotécnicas – sejam expostos, alterando as condições naturais de uso e performance do solo. Com a ação erosiva, tem-se o assoreamento de corpos d’água associado ao transporte de sedimentos, o que contribui para a redução do armazenamento de água e sua qualidade, impactando diretamente nas condições ambientais para biodiversidade e consumo humano, além de contribuir com o surgimento de áreas degradadas (ROTTA; ZUQUETTE, 2015).

O impacto dos processos erosivos ocorre, entre outros fatores, por conta do tempo de formação dos solos. Com o desgaste superficial, desagregação do solo e remoção das partículas do mesmo, o equilíbrio entre formação e perda do solo somente ocorre - de certa forma - quando de origem natural. Nesse caso, as taxas de formação e perda são similares, porém as atividades antrópicas não seguem este modelo, promovendo processos erosivos que geram uma taxa de perda maior que a formação, impossibilitando o desenvolvimento e renovação do solo. Esta perda do solo gera consequências intensas devido ao tempo demais longo necessário até a nova formação (PRESS et al., 2006), na faixa de mil a um milhão de anos (MARTINS; MARTINS; HARDOIM, 2023).

Há décadas, o estado de São Paulo enfrenta alta incidência de erosão e, consequentemente, elevados gastos para o tratamento e recuperação. Porém, a recomendação técnica para cada caso deve seguir investigação e caracterização geológico-geotécnica detalhadas para definir agentes condicionantes e deflagradores do processo (IPT, 1989). Estes estudos podem servir para embasar a proposição de alternativas que resolvem o problema e não necessitam de orçamentos elevados, por exemplo, os compostos.

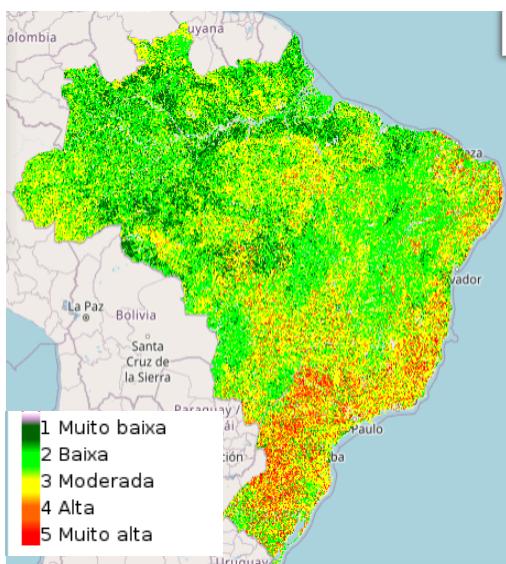
Marques (2019) descreve resultados positivos para a aplicação de composto orgânico como fertilizante e na mitigação de efeitos de metais no solo. Nesse caso, o alto teor de matéria orgânica - associado à presença de macronutrientes - corrobora o desenvolvimento da vegetação e a formação de ligações químicas entre minerais e composto dificulta a lixiviação, além de ser um parâmetro importante para a formação de agregados no solo, o que diminui seu potencial erosivo. Apesar da influência do tipo de solo e propriedades específicas, entende-se que a homogeneização entre solo e composto favorece a fertilidade, enquanto a aplicação superficial do composto no solo favorece áreas sob maior risco de erosão.

3.2.3 Panorama Nacional

No Brasil, observam-se diversos processos de degradação do solo devido ao modelo de desenvolvimento do país, baseado no uso intensivo do solo a fins agrícolas e de mineração

(THEODORO et al., 2021). Como exemplo, comparam-se as Figuras 4 e 5 e nota-se que as áreas de maior vulnerabilidade à erosão no território brasileiro coincidem com as áreas agrícolas, de pastagem e ocupações em áreas florestais.

Figura 4: Mapa de Vulnerabilidade à Erosão no Brasil.



Fonte: Adaptado de Embrapa (2022).

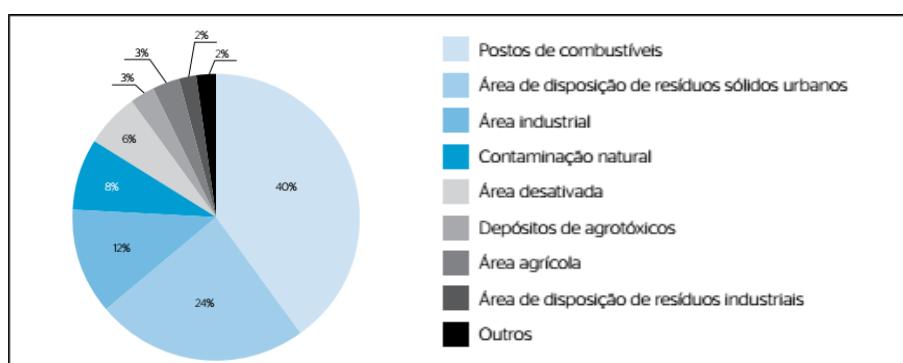
Figura 5: Mapa de Cobertura e Uso da Terra no Brasil.



Fonte: Adaptado de IBGE (2022).

Já no caso das áreas contaminadas, nota-se um padrão diferente do contexto de impacto concentrado na agricultura e seus agrotóxicos no país. Conforme indicado na Figura 6, o último levantamento realizado pelo Sistema de Informação de Vigilância em Saúde de Populações Expostas a Solo Contaminado (SISSOLO) sobre exposição da população às consequências da contaminação indicaram os postos de combustível como a principal fonte de contaminação do solo. No entanto, as áreas industriais e de disposição de RSU - duas das motivações deste estudo - foram identificadas como origem de mais de um terço da contaminação (FERREIRA; LOFRANO; MORITA, 2020).

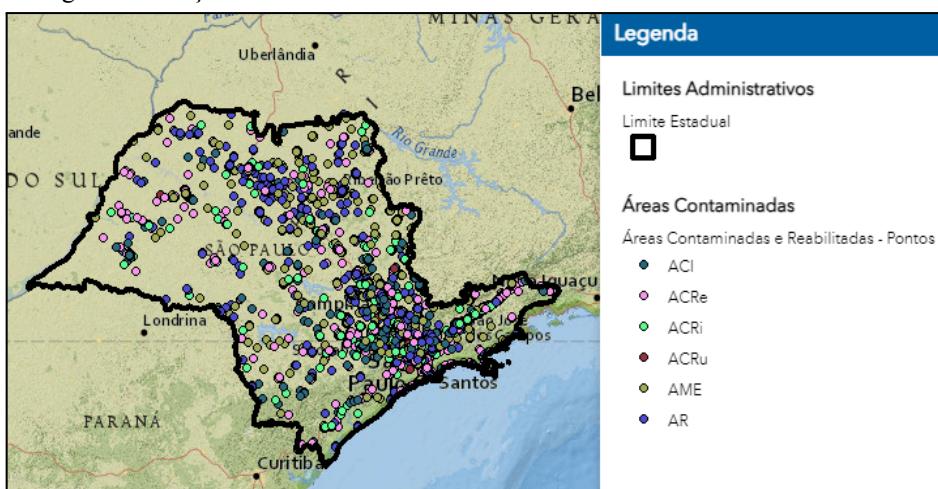
Figura 6: Origem da Contaminação do Solo Perante Exposição da População Brasileira.



Fonte: Ferreira; Lofrano; Morita (2020).

Um recorte específico ao Estado de São Paulo (Figura 7) aponta que a maioria das áreas contaminadas cadastradas são áreas recuperadas (AR), seguidas das áreas contaminadas em processo de remediação (ACRe) e com risco confirmado (ACRi) (CETESB, 2024). Este cenário reforça o potencial do estado para trabalhar em projetos voltados à recuperação e remediação das áreas contaminadas, de modo a devolver funções importantes ao solo da região e servir como base de estudos geológicos e iniciativas para outros estados.

Figura 7: Relação de Áreas Contaminadas e Reabilitadas no Estado de São Paulo.



Fonte: CETESB (2024).

3.2.4 Mudanças Climáticas

A produção econômica mundial gera questionamentos devido ao aumento da poluição causada por atividades produtivas e de relatórios baseados na relação entre economia, aumento populacional e demanda ecossistêmica. O desenvolvimento planetário pautado na pressão de reservas de recursos naturais para suprir a demanda por bens de consumo evidencia a necessidade de buscar alternativas de produção e consumo que enfrentem o avanço das mudanças climáticas e aquecimento global (CNI, 2018).

A preocupação frente às mudanças climáticas tem origem na percepção de padrões climáticos diferentes em relação ao aumento da temperatura global, nível do mar e ocorrência de eventos climáticos extremos, como chuvas extremas e períodos de estiagem. Este cenário é impulsionado pelas emissões GEEs, desmatamento e mudanças no uso e cobertura da terra, sendo a atividade humana - industrial, agrícola, mineradora e demais frentes - responsável pelo agravamento da situação e impactos severos à fauna, flora e funções vitais do meio ambiente (NASCIMENTO, 2024; SAUER, 2024; SANTOS, 2023).

Um estudo realizado no sul da Europa indica que os impactos das mudanças climáticas afetam não somente o meio ambiente, mas também as estruturas socioeconômicas, tendo o solo como principal recurso envolvido. Pois, sob práticas insustentáveis, o solo passa a ter uma menor adaptabilidade a cenários de mudança climática, reduzindo sua capacidade de sequestro de carbono, produção alimentícia e resiliência de ecossistemas e, consequentemente, aumentando o risco de degradação e subsequentes impactos socioeconômicos (CERQUEIRA; ROXO; CALVO-CASES, 2023).

No entanto, conforme citado, o Brasil possui uma tendência maior a ser palco de eventos climáticos extremos em vista da intensa exploração de recursos no país (MONTEIRO et al., 2021). Como exemplo, o caso recente das enchentes que afetaram o Rio Grande do Sul e se tornaram o maior desastre climático do estado. Melgarejo (2024) elenca como principais causas do ocorrido a posição e geografia do Rio Grande do Sul, o desequilíbrio ecossistêmico global associado ao aquecimento global e o uso e ocupação da terra pelo agronegócio em detrimento da remoção da cobertura vegetal local. Com o desequilíbrio advindo das mudanças climáticas, foi observada média histórica de precipitação quase dez vezes maior que o normal e com a supressão de vegetação na região devido às monoculturas, o impacto das chuvas foi ainda maior devido à impermeabilização do solo e assoreamento dos rios.

Como consequência de enchentes e inundações como estas, tem-se a perda de biodiversidade - e, com isso, maior exposição do território a novas enchentes -, alterações no fluxo alimentar aquático e transporte de sedimentos e poluentes. Ou seja, uma nova carga de impactos ao solo que afeta não somente suas funções sociais - de base histórica, arqueológica e de cultivo - como também ecológicas - de produção de biomassa, filtragem e transformação da matéria, proteção de águas subterrâneas, habitat biológico e reserva genética (BLUM; SANTELISES, 1994).

Atualmente, a preocupação ambiental em relação às mudanças climáticas está crescendo entre os diferentes setores da sociedade e muitas empresas e indústrias aderiram à inclusão de setores específicos para o cuidado com o meio ambiente. No entanto, o Brasil apresenta diversos danos ambientais que já foram instaurados no território nacional e outros que continuam a degradar o solo local. Além disso, é necessário considerar o fato de que a agricultura ainda é a fonte principal de cultivo alimentar e de matérias-primas. Por isso, se reforça a necessidade de práticas de tratamento do solo e iniciativas que - além de promover a restauração de suas funções ecossistêmicas - também sejam capazes de alinhar produção e conservação, que é o caso dos compostos orgânicos.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A análise comparativa realizada neste trabalho foi baseada nos resultados de diferentes parâmetros obtidos no composto orgânico e no composto de torta de cana-de-açúcar, de modo que o teor de umidade e parâmetros físico-químicos como pH, ΔpH, Eh e CE foram determinados em laboratório e os demais foram obtidos na literatura (Lima, 2022 e Raimondi, 2019).

Na Tabela 4 são listados os ensaios realizados com os dois compostos e suas respectivas metodologias.

Tabela 4: Ensaios e Metodologias Utilizadas na Caracterização dos Compostos.

Caracterização dos compostos		Referencial teórico	Realização
Ensaio em duplicata	Teor de umidade	KIEHL (2004)	Laboratório de Geotecnia Ambiental do Departamento de Geotecnia EESC - USP
Ensaio em triplicata	Parâmetros físico-químicos (pH, ΔpH, Eh e CE)	KIEHL (2004)	

Fonte: Autora (2024).

4.1 Caracterização dos Compostos

4.1.1 Ensaios Realizados no Laboratório de Geotecnia Ambiental EESC-USP

As amostras dos compostos de cana-de-açúcar e RSU foram inicialmente submetidas ao quarteamento utilizando o método de pilhas alongadas, a fim de obter porções menores e mais homogêneas dos compostos para cada ensaio a ser realizado.

O composto de torta de cana-de-açúcar (Figura 8) foi coletado em Jaboticabal (SP), resultado do processo de compostagem de material formado por torta de filtro, cinza de caldeira e fuligem. O processo aconteceu sob espaço aberto – no formato de pilhas, no pátio de uma usina sucroalcooleira da cidade – e misturas periódicas por cerca de 30 dias até obtenção de material mais estável, com maior concentração de nutrientes e menor teor de umidade (RAIMONDI, 2019).

Figura 8: Homogeneização do Composto de Torta de Filtro de Cana-de-Açúcar.



Fonte: Autora (2024).

O composto da fração orgânica dos RSU (Figura 9) foi gerado no Campus I da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC - USP) no Laboratório de Compostagem do Departamento de Hidráulica e Saneamento (SHS), como resultado do processo de quatro meses de compostagem dos resíduos alimentares provenientes dos restos de frutas, legumes e verduras - não temperados ou cozidos - gerados em alguns restaurantes de São Carlos (SP). O método utilizado foi uma adaptação do modelo de composteira india (windrow) em menor escala sob condições de chuva, radiação solar e vento baseadas na estruturação de uma leira estática convencional em composteira coberta, sendo a estrutura desta formada superiormente por *pallet* e inferiormente por lona plástica - destinada à coleta de lixiviado (LIMA, 2022).

Figura 9: Homogeneização do Composto da Fração Orgânica de RSU.



Fonte: Autora (2024).

4.1.1.1 Teor de Umidade

Após o quarteamento, as amostras dos compostos foram inseridas em sacos de polietileno e acondicionadas para posterior utilização. A primeira etapa foi a análise do teor de umidade, por meio de ensaios em duplicata no Laboratório de Geotecnia Ambiental do Departamento de Geotecnica da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP), seguindo metodologia preconizada por Kiehl (2004); as amostras ficaram na estufa a 110°C até obtenção de peso constante.

4.1.1.2 Parâmetros Físico-Químicos

Os parâmetros físico-químicos (pH, ΔpH, Eh e CE) foram determinados por meio de ensaios em triplicata (Figura 10) no Laboratório de Geotecnia Ambiental do Departamento de Geotecnica da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP), seguindo metodologia preconizada por KIEHL (2004).

Figura 10: Ensaios em Triplicata para Determinação do pH, Eh e CE - (A) Amostras do Composto da Fração Orgânica de RSU; (B) Amostras do Composto de Torta de Filtro de Cana-de-Açúcar.



Fonte: Autora (2024).

4.1.1.2.1 Potencial Hidrogeniônico (pH)

Devido ao efeito exercido sobre a adsorção e precipitação de metais potencialmente tóxicos, analisou-se o potencial hidrogeniônico (pH) dos compostos. Para esta medição, utilizou-se a proporção sólido/líquido de 1 para 2,5, considerando - portanto - 10 gramas de

composto para 25 mL de líquido. Como solução, utilizou-se água ultra-pura e KCl, sendo a molaridade da solução de KCl utilizada de 3 mol L⁻¹. O pH em água e em KCl é importante para a determinação do ΔpH (Equação 1). Este parâmetro foi obtido a partir de um pHmetro Digimed DM 21 e eletrodo de vidro.

$$\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{KCl}} - \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} \quad (\text{Equação 1})$$

4.1.1.2.2 Potencial de Oxirredução (Eh)

Além do pH, o potencial de oxirredução (Eh) representa outro importante fator nas relações biológicas e entre os elétrons no solo, proporcionando uma análise da transferência de elétrons entre o contaminante e o composto (LIMA, 2017). A determinação do Eh seguiu os mesmos critérios utilizados em relação ao pH, com base na proporção sólido/líquido de 1 para 2,5, considerando - portanto - 10 gramas de composto para 25 mL de solução aquosa. Este parâmetro foi obtido a partir de um pHmetro Micronal B374 e um eletrodo de anel de platina de referência combinada de Ag/ClAg.

4.1.1.2.3 Condutividade Elétrica

A condutividade elétrica é um dos fatores de análise influenciados pela quantidade de íons na solução (RODRIGUES, 2022) e fornece uma análise quantitativa da capacidade de condução de corrente elétrica dos compostos. Para a determinação deste parâmetro, adotou-se a proporção sólido/líquido 1:1, considerando - portanto - 10 gramas de composto para 10 mL de solução aquosa. Esta análise foi realizada a partir de um condutivímetro Analyser 650 e uma célula condutimétrica Analyser 7A04.

4.1.2 Resultados Obtidos pela Revisão da Literatura

Para maior análise comparativa de resultados e perspectivas atuais e futuras sobre a utilização dos compostos descritos, foram utilizados os resultados obtidos na literatura de referência para a caracterização complementar dos compostos. A Tabela 5 indica as metodologias realizadas por Lima (2022) e Raimondi (2019), respectivamente, para o composto da fração orgânica de RSU e para o composto de torta de filtro de cana-de-açúcar.

Tabela 5: Metodologias utilizadas por Lima (2022) e Raimondi (2019) na Caracterização dos Compostos.

Caracterização dos compostos		Referencial teórico	
		Lima (2022)	Raimondi (2019)
Ensaios em triplicata	Teor de matéria orgânica e resíduo mineral	Kiehl (1985); Lamin et al. (2001); ASTM D2974 - 14	Lamin et al. (2001); MAPA (2013); ASTM D2974/13
	Capacidade de troca catiônica (CTC)	Método de adsorção de azul de metileno - Pejon (1992); MAPA (2013)	MAPA (2013); Saturação com amônio
	Composição elementar do composto (C, H, N) e relações C/N	CHNS/O da PerkinElmer; MAPA (2013)	CHNS/O da PerkinElmer; MAPA (2013)
	Análise em Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X (FRX)	Calibração STD-1 (<i>Standardless</i>) - Guimarães (2007)	Calibração STD-1 (<i>Standardless</i>) - Guimarães (2007)
	Área Superficial (AS)	Método de adsorção de azul de metileno - Pejon (1992); MAPA (2013)	Fissão de Nitrogênio em equipamento Quantachrome NOVA 1000 versão 10.02
Densidade aparente		Autocompactação - MAPA (2007)	Instrução Normativa SDA nº 17, de 21 de maio de 2007 - MAPA (2007)
Capacidade de adsorção - Pb, Zn, Cd		Roy et al. (1992); Zuquette, Silva Jr. e Garcia (2008)	Roy et al. (1992); U.S. EPA 1340 (2017)

Fonte: Autora (2024).

Cabe ressaltar que, apesar de realizados em locais diferentes, os ensaios seguiram a mesma metodologia e foram analisados nos mesmos equipamentos. Sob as mesmas condições de ensaio foi possível, portanto, estabelecer relações passíveis de comparação.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Ensaios Realizados no Laboratório de Geotecnia Ambiental EESC-USP

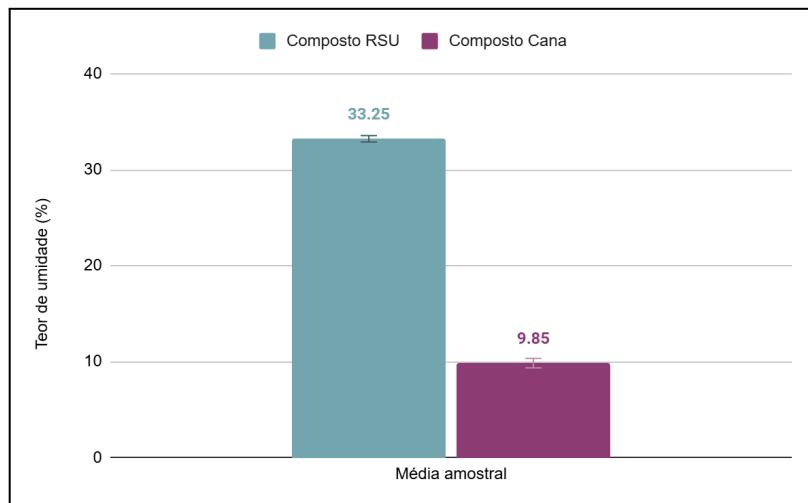
Inicialmente, analisou-se o teor de umidade dos compostos. Conforme apresentado no Gráfico 1, o composto orgânico apresenta teor de umidade maior em relação ao composto de torta de cana-de-açúcar. Este último apresentou um teor de umidade médio de 9,85%, enquanto o composto orgânico, de 33,25% (Tabela 6). Este cenário se deve à composição original de cada tipo de composto (LIMA, 2017).

Tabela 6: Teor de Umidade dos Compostos Analisados.

Amostra	Composto Orgânico	Composto de Torta de Cana
A	38,28%	12,77%
B	28,22%	6,92%
Média	33,25%	9,85%
Desvio padrão	5,03%	2,93%

Fonte: Autora (2024).

Gráfico 1: Comparação entre o Teor de Umidade dos Compostos.



Fonte: Autora, 2024.

Para o composto de torta de filtro de cana-de-açúcar, Raimondi (2019) e Budiyanto (2021) descrevem teor de umidade de, respectivamente 5,0% e 9,38% - valores mais próximos ao encontrado no ensaio realizado no presente trabalho. No entanto, estudos mais recentes realizados por Srivastava e Chakma (2023) indicaram teor de umidade médio de 33,83% para o composto de torta de cana-de-açúcar originado da compostagem em leiras *in*

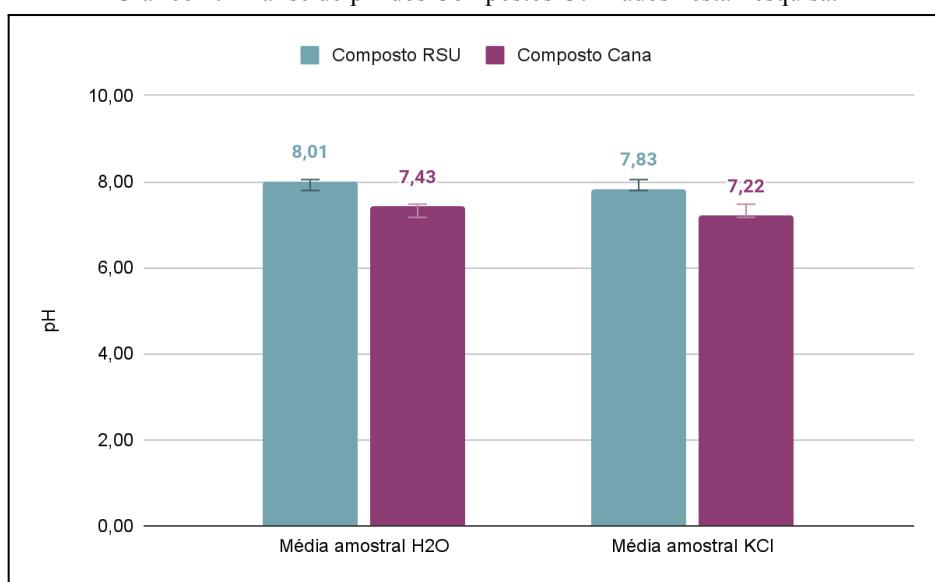
situ de uma das maiores usinas da Índia. Esta diferença se deve ao método de compostagem e material compostado.

Para o composto orgânico, a literatura também indica umidade superior ao composto de torta de filtro de cana-de-açúcar. O teor de umidade descrito por Lima (2022) é de $44,95 \pm 0,32\%$, enquanto para Guermandi (2015) está entre 50 a 70% (variando devido ao tipo de leira e inserção de minhocas). Uma análise mais recente, realizada por Costa (2023), se assemelha ao obtido por Guermandi (2015), apresentando teor de umidade de 66,0 a 75,6 para o composto em questão.

Em relação às propriedades físico-químicas dos compostos analisados, o Gráfico 2 exibe o resultado obtido para as médias amostrais dos dois compostos, que indicam similaridade quanto ao pH, ambos tendendo à alcalinidade (que é um ponto positivo para adsorção de contaminantes e também para o melhoramento de solos degradados por erosão). Com isso, os valores médios de ΔpH se mantiveram na mesma faixa aproximada de -0,20. O resultado do ΔpH indica uma maior presença de cargas negativas de superfície, sendo um indicativo quanto a possível retenção de cátions (RAIMONDI, 2019).

Para o composto de torta de filtro de cana-de-açúcar, o ΔpH encontrado foi de -0,22. Para o mesmo composto, Raimondi (2019) descreve ΔpH de $-2,4 \pm 0,1$. Para o composto de RSU orgânico, Lima (2022) encontrou $-1,0 \pm 0,1$ para o ΔpH . Posteriormente, Coltro et al. (2023) avaliaram o composto orgânico sem ativação e ativado com ácido fosfórico, obtendo ΔpH de, respectivamente, $-1,4 \pm 0,1$ e $-0,81 \pm 0,08$.

Gráfico 2: Análise do pH dos Compostos Utilizados nesta Pesquisa.



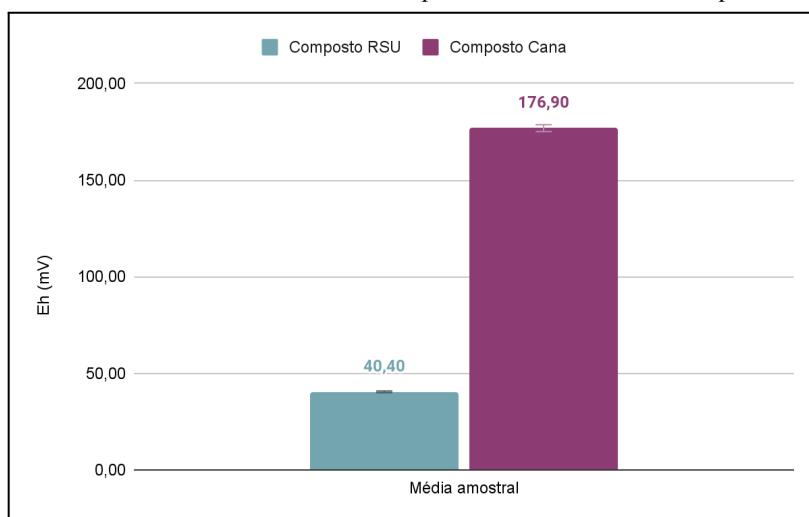
Fonte: Autora (2024).

Os resultados do pH para o composto de torta de filtro de cana-de-açúcar estão próximos à faixa descrita por Lahori et al. (2023) e Raimondi (2019), entre $7,4 \pm 0,5$ e $8,3 \pm 0,1$. Nesse sentido os resultados encontrados neste estudo - de caráter básico a neutro - reforçam os aspectos indicados pelos autores sobre a ação dos compostos em relação à adsorção e precipitação de contaminantes, porosidade do solo e crescimento vegetal, cumprindo assim o papel quanto a este parâmetro para retenção de metais e melhoramento de solos que foram degradados pela erosão.

Já para o composto da fração orgânica de RSU, os resultados para o pH estão próximos à faixa descrita por Guermandi (2015) e Lima (2022), de caráter básico, com variáveis de 7,93 a 9,30. Deste modo, também reforçando o indicativo de favorecimento à adsorção, precipitação, retenção de cátions e crescimento vegetal.

Quanto à transferência de elétrons entre contaminante e composto, o Gráfico 3 indica que o composto derivado da cana-de-açúcar apresentou um potencial de oxirredução médio de +176,90 mV, consideravelmente superior aos +40,40 mV obtido para o composto orgânico. No entanto, ambos são valores positivos, o que indica propriedade oxidante e, consequentemente, possibilidade de atuação positiva sobre os metais potencialmente tóxicos (LIMA, 2017).

Gráfico 3: Análise do Eh dos Compostos Utilizados nesta Pesquisa.



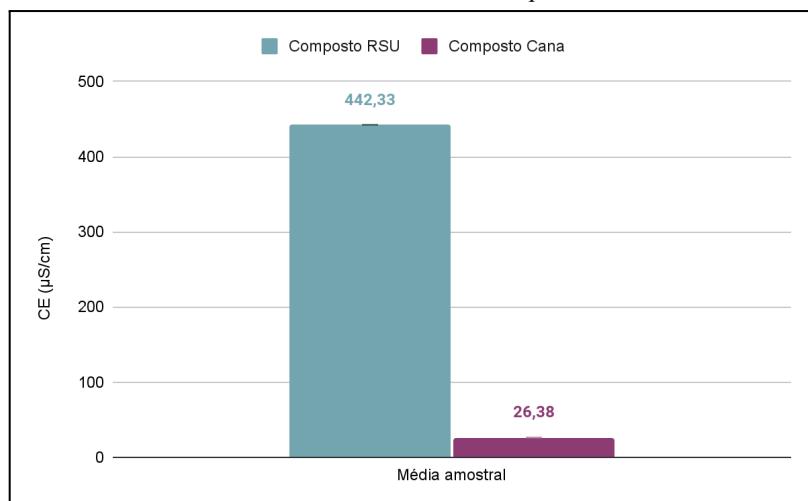
Fonte: Autora (2024).

Raimondi (2019) encontrou Eh médio de $-159,0 \pm 18,0$ mV para o composto de torta de cana-de-açúcar, divergindo do valor positivo obtido no presente trabalho. Para o composto orgânico, o resultado obtido se assemelha ao observado na literatura. Lima (2022) descreve Eh médio de $+69,5 \pm 9,5$ mV e Coltro et al. (2023) obtiveram $+31,4 \pm 9,5$ mV para o composto sem ativação e $+230,4 \pm 7,6$ mV para o composto ativado.

Por fim, o Gráfico 4 indica que o composto orgânico apresentou quantidade consideravelmente superior de sais dissolvidos em comparação ao composto de torta de cana-de-açúcar, vide CE média de 442,33 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para o primeiro e de 26,38 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para o segundo.

Esta diferença também é observada na literatura. Para o composto de torta, Lahori et al. (2023), Srivastava e Chakma (2023) e Raimondi (2019) encontraram valores de condutividade entre 0,45 dS/m e $4,32 \pm 0,8$ dS/m. Já para o composto orgânico, Lima (2022) descreve CE de 665 ± 47 $\mu\text{S}/\text{cm}$, enquanto Coltro et al. (2023) encontraram $4253,0 \pm 115$ $\mu\text{S}/\text{cm}$ para o composto independente e $208,5 \pm 4,9$ $\mu\text{S}/\text{cm}$ para o composto ativado.

Gráfico 4: Análise da Condutividade Elétrica dos Compostos Utilizados nesta Pesquisa.



Fonte: Autora (2024).

5.2 Resultados Obtidos pela Revisão da Literatura

Conforme apresentado inicialmente, foram utilizados os resultados obtidos por Lima (2022) e Raimondi (2019) para a caracterização dos compostos, de modo a viabilizar uma avaliação complementar mais abrangente acerca do potencial de utilização dos mesmos, somados ao que foi obtido no laboratório nesta pesquisa.

O primeiro parâmetro considerado nesta análise foi o teor de matéria orgânica e resíduo mineral, pontos relevantes para fatores como agregação, estruturação e aeração do solo (KIEHL, 2004). Para o composto de torta de cana-de-açúcar, Raimondi (2019) obteve teor de matéria orgânica de 50,9% e resíduo mineral de 44,1% - sendo, deste último, 21,1% da fração solúvel. Em estudo posterior, Raimondi (2022) descreve a proporção de $510,6 \text{ g kg}^{-1}$ de matéria orgânica para o mesmo composto. Já Lima (2022) obteve $418,70 \pm 24,21 \text{ g kg}^{-1}$ para o composto orgânico, com resíduo mineral (teor de cinzas) de $518,30 \pm 24,21 \text{ g kg}^{-1}$.

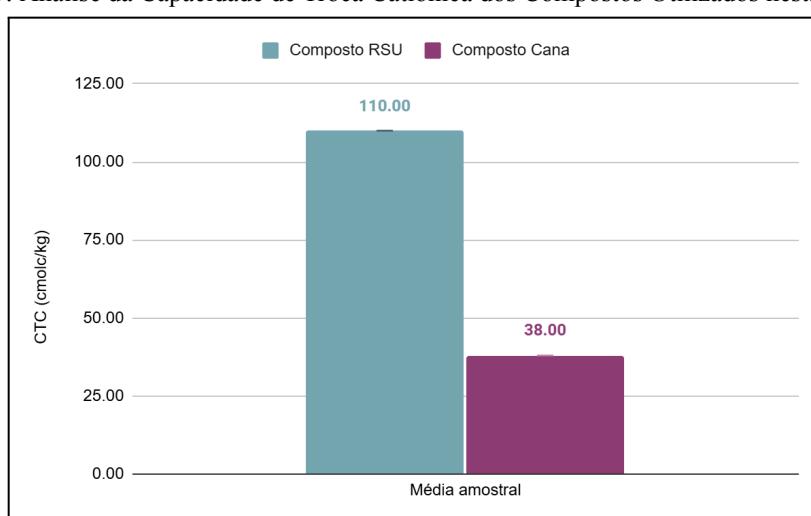
Os resultados condizem com a literatura, que indica potencial dos compostos como fertilizantes devido à agregação do solo proporcionada pelo teor médio de MO. Para o composto de torta de cana-de-açúcar, Kalaivanan e Hattab (2016) também utilizaram o método *windrow* para obtenção do composto, encontrando 40,2% de matéria orgânica. Seguindo esta tendência de teor de matéria orgânica, Lahori et al. (2023) e Kumar et al. (2017) descrevem uma faixa de, aproximadamente, 40% a 50% de matéria orgânica nos próprios estudos sobre o composto de torta de cana-de-açúcar.

Para o composto orgânico, Guermandi (2015) define teores de matéria orgânica - ainda que oscilando durante o período total de análise - entre 73% e 79%. Coltro et al. (2023) obtiveram $74,41 \pm 0,48\%$ de matéria orgânica e $22,17 \pm 0,07\%$ de resíduo mineral total para o composto sem ativação e $81,01 \pm 3,95\%$ de matéria orgânica e $17,47 \pm 3,46\%$ de resíduo mineral total no composto ativado.

De forma geral, nota-se que ambos compostos apresentam alto teor de matéria orgânica, sendo este um fator positivo tanto em relação à adsorção de contaminantes como em solos que não apresentam mais a camada superficial orgânica (que já foi erodida), auxiliando na agregação do solo e na revegetação.

No que se refere à CTC dos compostos, conforme apresentado no Gráfico 5, nota-se maior capacidade do composto de RSU em comparação ao composto de torta de cana-de-açúcar. Para o primeiro, Lima (2022) denota $110 \pm 2,8 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, enquanto para o segundo, Raimondi (2019) descreve $38,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$.

Gráfico 5: Análise da Capacidade de Troca Catiônica dos Compostos Utilizados nesta Pesquisa.

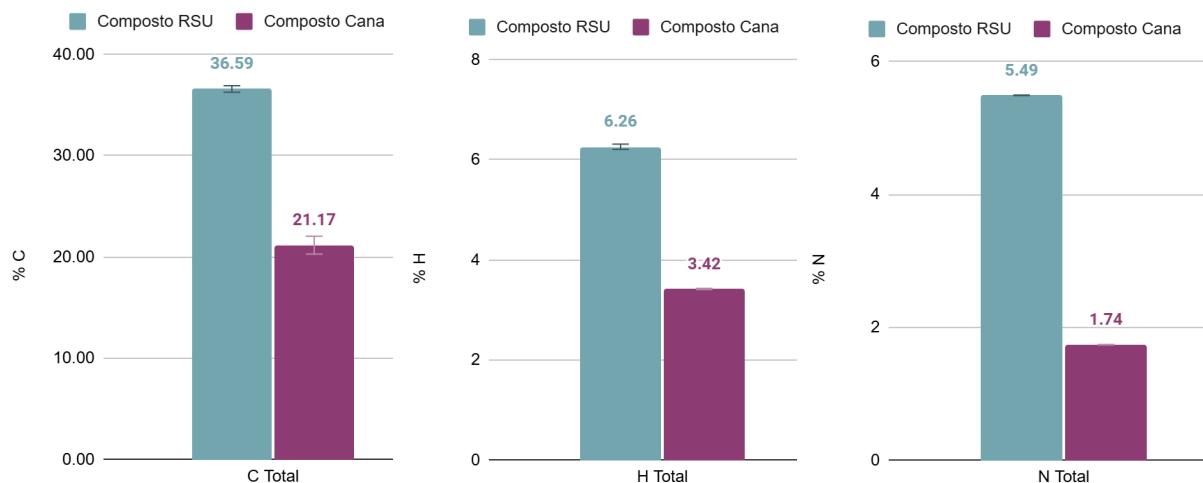


Fonte: Adaptado de Lima (2022) e Raimondi (2019).

Analisando os resultados de CTC obtidos por outros autores, também existem valores mais elevados para o composto de RSU orgânico em relação ao composto de torta de cana-de-açúcar. Para o primeiro, Coltro et al. (2023) obtiveram CTC de $92,0 \pm 9,9 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ para o composto sem ativação. Já para o composto de torta de cana-de-açúcar, Lahori et al. (2023) descrevem $84,2 \pm 2,8 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ e Budiyanto (2021), $37,32 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. A CTC é um fator de extrema importância quando se pensa em adsorção de contaminantes catiônicos e em nutrientes para o solo.

Quanto à composição elementar, o composto de RSU orgânico também indicou maiores proporções em comparação ao de torta de cana-de-açúcar, conforme apresentado no Gráfico 6. Para o primeiro, Lima (2022) denota 36,59% C total, 6,26% H total e 5,49% N total, enquanto para o segundo, Raimondi (2019) descreve 21,17% C total, 3,52% H total e 1,74% N total.

Gráfico 6: Análise da Composição Elementar dos Compostos Utilizados nesta Pesquisa.



Fonte: Adaptado de Lima (2022) e Raimondi (2019).

Deste modo, é descrita a relação C/N média de 6,66 para o composto orgânico e de 10,00 para o composto de torta de cana-de-açúcar. Conforme discutido anteriormente, infere-se que o primeiro composto apresenta maturidade mais avançada em relação ao composto de torta, porém este se adequa mais próximo à faixa ótima definida por Kiehl (1985) para fertilização do solo. Nesse sentido, quanto à maturidade, os dois compostos são adequados para uso em áreas contaminadas e degradadas por erosão, pois a faixa de valor encontrada representa um estado mais avançado de degradação da matéria (RAIMONDI et al., 2020), logo tem-se um composto mais estável, além de estarem dentro das faixas obtidas em outros trabalhos, como indica a Tabela 7.

A Tabela 7 reúne os resultados obtidos para os compostos em estudos de diferentes localidades - divergentes da faixa sugerida por Kiehl (1985), porém inferiores a 20, logo em concordância com a Instrução Normativa nº 61/2020, que define as especificações e exigências referentes aos fertilizantes orgânicos e biofertilizantes no Brasil (BRASIL, 2020).

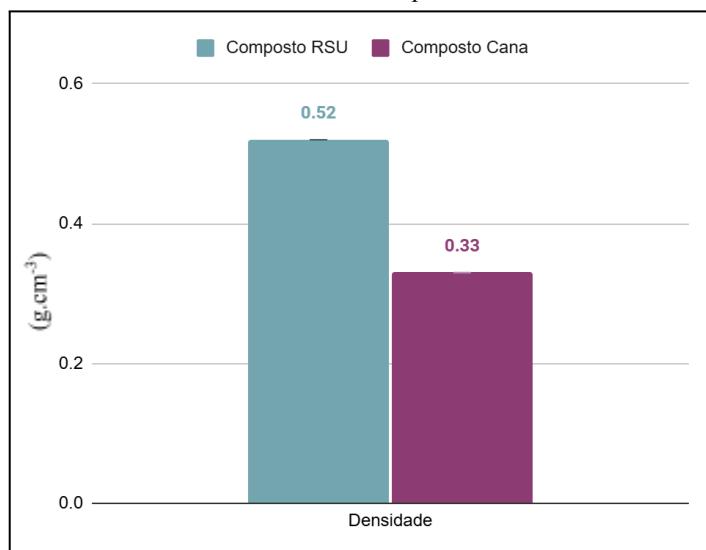
Tabela 7: Relação C/N para os Compostos Utilizados nesta Pesquisa.

Composto de Torta de Cana-de-Açúcar		
Bibliografia	Origem do estudo	C/N
Srivastava e Chakma (2023)	Índia	12,36
Budiyanto (2021)	Indonésia	15,00
Kalaivanan e Hattab (2016)	Índia	14,20
Composto da Fração Orgânica de RSU		
Bibliografia	Origem do estudo	C/N
Silva e Carbonel (2024)	Peru	11,65
Coltro et al. (2023)	Brasil	11,88
Guermandi (2015)	Brasil	12,16 - 12,74

Fonte: Autora (2024).

No caso da densidade aparente de cada composto, os resultados de referência apresentados no Gráfico 7 foram próximos, porém indicam que o composto orgânico de RSU é mais denso que o composto de torta de cana-de-açúcar. Para o primeiro, Lima (2022) denota $0,52 \text{ g cm}^{-3}$, enquanto Raimondi (2019) descreve densidade de $0,33 \text{ g cm}^{-3}$ para o composto de torta de cana-de-açúcar.

Gráfico 7: Análise da Densidade dos Compostos Utilizados nesta Pesquisa.

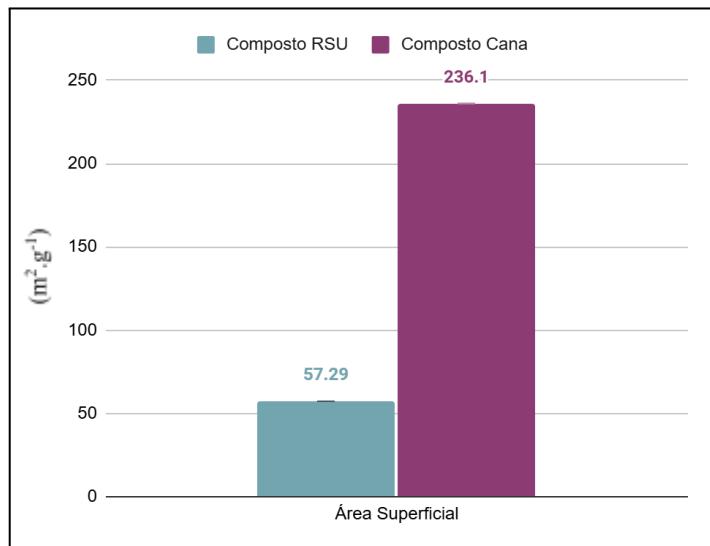


Fonte: Adaptado de Lima (2022) e Raimondi (2019).

Considerando a densidade como a relação entre massa e volume, entende-se que o composto menos denso viabiliza maior porosidade, característica fundamental para melhor aeração do solo, retenção de água e tendência a uma menor velocidade de compactação (RAIMONDI et al., 2020; RODRIGUES, 2019). Sendo estas características positivas para tratar solos impactados pela erosão, reforça-se o potencial de utilização do composto na recuperação de solos degradados e se alinha com a perspectiva buscada no presente trabalho.

Para a área superficial, também destaca-se valor superior para o composto de torta de cana-de-açúcar. Nesse caso, conforme apresentado no Gráfico 8, Raimondi (2019) descreve $236,1 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ para o composto de torta de cana-de-açúcar, cerca de quatro vezes superior à área superficial de $57,29 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ definida por Lima (2022) para o composto de RSU orgânico.

Gráfico 8: Análise da área Superficial dos Compostos Utilizados nesta Pesquisa.



Fonte: Adaptado de Lima (2022) e Raimondi (2019).

Esta relação indica que o composto de torta de cana-de-açúcar apresenta maior potencial no que se refere às propriedades de adsorção, visto que maiores áreas superficiais tendem a facilitar a interação com grupos funcionais na retenção de contaminantes (RODRIGUES, 2022). Além disso, Kiehl (1985) descreve maior retenção de água quando um material apresenta maior superfície específica. Nesse sentido, pode-se inferir que o composto de torta de cana-de-açúcar apresenta, portanto, maior capacidade de retenção de água (CRA) quando comparado ao composto da fração orgânica de RSU. Além disso, o autor também associa maior área superficial a um maior teor de matéria orgânica, que favorece também a CTC e a disponibilidade de nutrientes, como reforçado pela composição dos compostos obtidas pela Análise FRX.

5.2.1 Análises da Composição Química por FRX e Capacidade de Adsorção

Além dos resultados apresentados, foram consideradas também as análises de composição química por Fluorescência de Raios-X (FRX) realizadas pelas autoras, que indicaram que quase 50% da composição química de ambos os compostos é representada por SiO₂. Esta característica pode ser muito importante para o fortalecimento do solo, melhoria de suas qualidades produtivas e disponibilidade hídrica. No estudo de revisão de literatura realizado por Santos et al. (2021) acerca da influência do silício nas plantas, destacam-se os benefícios do silício aos processos químicos do solo, atuando diretamente no desenvolvimento e fisiologia vegetal das plantas e na redução do estresse hídrico associada ao fortalecimento das paredes celulares que o elemento proporciona.

De forma geral, observa-se maior presença de ferro (Fe), cálcio (Ca), fósforo (P), potássio (K) e magnésio (Mg) para o composto de torta de cana-de-açúcar. Ainda que seja uma pequena variação, nota-se que a quantidade de nutrientes é maior para tal composto. A presença dos nutrientes citados favorece a CTC dos compostos (LIMA, 2022), o que por sua vez auxilia na disponibilidade de nutrientes para as plantas e na redução do risco de lavagem dos mesmos (KIEHL, 1985).

Foram encontrados também alguns óxidos em menor escala, como MnO, ClO₂, Na₂O e Cr₃O₃, porém reforça uma possível tendência de maior presença de nutrientes no composto de torta de cana quando comparado ao composto de RSU orgânico. Esta diferença pode ser explicada considerando os processos produtivos sucroalcooleiros até a formação da torta de filtro utilizada para o composto, bem como a composição alimentar dos resíduos urbanos orgânicos empregados na geração deste composto (LIMA, 2022; RAIMONDI, 2019).

Quanto aos metais potencialmente tóxicos, ambos os compostos apresentam pouca quantidade destes elementos em sua composição, o que é um fator muito positivo no que se refere à utilização dos compostos para descontaminação por estes metais, bem como para melhoria de solos erodidos.

Por fim, destaca-se uma das avaliações mais importantes a serem realizadas no que se refere a opções de recuperação de solos degradados e retenção de contaminantes inorgânicos, a capacidade de adsorção. De modo geral, os dois materiais apresentaram alta capacidade de adsorção. Cabe ressaltar que, para fins de avaliação do potencial máximo de remoção, para o composto de torta de cana-de-açúcar foram considerados os valores referentes ao melhor cenário de concentração-remoção nos ensaios de equilíbrio em lote analisados. Esta

consideração foi necessária pois este composto apresentou diferentes percentuais de remoção no estudo de Raimondi (2019) em função da concentração de equilíbrio.

A adsorção de Pb foi diretamente proporcional ao aumento da concentração, apresentando 97,5% sob concentração de 475 mg L⁻¹. Já para o Cd e Zn o cenário foi o oposto, apresentando - respectivamente - 93% sob concentração de 22 mg L⁻¹ e 95% sob concentração de 15 mg L⁻¹. A análise indica que a remoção média para os metais analisados utilizando o composto de torta é de 95,2%. Considerando as condições de pH do ensaio, é possível haver influência positiva na remoção dos metais a partir da precipitação dos mesmos (RAIMONDI, 2019).

Para o composto orgânico de RSU, para o Cd observou-se sorção de 100% nas concentrações de 1, 5, 10, 50, 100 e 300 mg L⁻¹, sofrendo redução nas concentrações de 500 e 1000 mg L⁻¹, deste modo, indicando sorção inversamente proporcional à concentração inicial. O Pb já não foi efetivo como o Cd, pois apresentou variação no percentual de sorção conforme concentração empregada, atingindo sorção máxima de 100% para 1 mg L⁻¹ e menor sorção de 45% para a concentração de 100 mg L⁻¹. Já o Zn apresentou o mesmo comportamento observado para o Cd, de 100% de adsorção até a concentração de 300 mg L⁻¹ (LIMA, 2022).

No geral, em ambos os estudos, a sequência de maior absorção entre os metais analisados é dada por Pb > Cd > Zn, sendo que nas condições mais favoráveis para cada composto, o potencial de remoção se manteve majoritariamente igual ou superior a 90%, indicando alto potencial de utilização de ambos na adsorção dos metais estudados, principalmente quando avaliada a melhor concentração para aplicação prática. Nesse sentido, cabe ressaltar que o ensaio de adsorção está diretamente relacionado às condições aplicadas, configuração adotada, concentrações utilizadas e tempo de equilíbrio igual ou superior a 24 horas.

Além disso, tanto Lima (2022) quanto Raimondi (2019) avaliaram também os compostos quanto à dessorção. Neste processo, utilizando as mesmas concentrações e tempo de agitação, o mesmo volume aplicado de solução contaminante nos ensaios de adsorção é utilizado para a água. Após centrifugação e filtração, os resultados encontrados para ambos os compostos foram adequados para a proposta do trabalho. Para Lima (2022), o composto de RSU orgânico apresentou performance intermediária, com 0,48% de dessorção em água para o Pb, por exemplo, sob concentração de 1000 mg L⁻¹. Já para Raimondi (2019), o composto de torta de cana-de-açúcar apresentou menos de 1,2% de dessorção em água para o Cd, por exemplo, sob todas as condições de concentração analisadas. Estes percentuais reduzidos

constituem mais um indicativo do uso dos compostos para melhoria do solo, pois se refere a uma capacidade reduzida de remobilização de contaminantes para o ambiente sob condições de campo (Lima et al., 2023).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Compostos de Torta de Filtro de Cana-de-Açúcar e da Fração Orgânica de RSU

A caracterização química dos compostos analisados indica tendência alcalina do pH, ambos similares na faixa de 7 a 8, adequado para a adsorção de contaminantes e melhoramento de solos degradados. Quanto à retenção de cátions, o potencial de ambos os compostos decorre do ΔpH negativo associado à presença de cargas negativas na superfície, que auxiliam na neutralização dos ácidos e retenção de cátions.

O caráter básico a neutro do pH dos compostos cumpre a função de retenção de metais e recuperação de solos erodidos. Considera-se, portanto, a influência positiva do pH encontrado no potencial de adsorção e precipitação de contaminantes, porosidade do solo e crescimento vegetal.

O potencial de oxirredução do composto de torta de cana-de-açúcar foi superior ao composto de RSU orgânico, indicando maior transferência de elétrons. No entanto, devido a ambos apresentarem valores positivos, indicam propriedade oxidante, logo, potencial de atuação sobre a retenção dos metais potencialmente tóxicos.

O composto orgânico apresenta maior condutividade elétrica, por conseguinte, maior quantidade de sais dissolvidos em comparação ao composto de torta de cana-de-açúcar. A ativação por ácido fosfórico, nesse caso, pode reduzir a CE do composto, tornando mais propício para a retenção dos metais no processo de adsorção e na precipitação.

O teor de umidade superior descrito na literatura para o composto de RSU orgânico influencia na distribuição dos poros e fluxo de compactação. Nesse sentido, entende-se que os métodos e condições de compostagem podem exercer influência sobre a umidade do composto final, bem como a metodologia utilizada na determinação do teor de umidade.

O teor de matéria orgânica também está associado à compactação e agregação do solo, atuando como proteção à erosão dos solos ao retardar a desestruturação do solo. Os valores de MO atribuído aos compostos, na média de 50%, indica que este percentual - e, em alguns casos, além - é mineralizado a partir das transformações associadas à biodegradação dos componentes bioquímicos que fornecem o carbono e nitrogênio para as atividades microbianas na transformação da matéria orgânica.

Na análise comparativa da literatura, entende-se que o composto de RSU apresenta maior teor de matéria orgânica em relação ao composto de torta de cana-de-açúcar, podendo ser considerado mais eficiente para tratamento de solos com processos erosivos. O composto de RSU também apresentou resultados superiores quanto à CTC, indicando maior quantidade

de íons e, portanto, maior capacidade de retenção de nutrientes. Além disso, por apresentar relação C/N menor que o composto de torta de cana-de-açúcar, tem-se um composto com maior grau de maturidade.

De modo geral, o composto de torta de cana-de-açúcar é mais adequado à faixa ótima definida por Kiehl (1985) para fertilização do solo, porém, na literatura consultada, ambos se enquadram na média de 12 para C/N, dentro do limite máximo de 20, estabelecido pela legislação nacional.

A partir da análise dos resultados obtidos por FRX, tem-se sólida presença do SiO₂ na composição dos compostos, promovendo maior benefício aos processos químicos do solo. No geral, os óxidos de sílica, alumínio e ferro representam de 60 a 75% da composição dos compostos. Entre os óxidos encontrados em menor escala, observa-se maior quantidade de nutrientes no composto de torta de cana-de-açúcar em relação ao composto de RSU, possivelmente explicada pela origem de cada composto.

A maior área superficial foi obtida no composto de torta de cana-de-açúcar, o que indica maior potencial adsorptivo e retenção de contaminantes. Por ser menos denso, este composto também é mais indicado para questões relacionadas à erosão, devido à maior porosidade e consequente aeração do solo, retenção de água e menor velocidade de compactação do solo.

A análise de adsorção se mostrou dependente da concentração de equilíbrio, no caso do composto de torta de filtro de cana-de-açúcar. De modo geral, obteve-se remoção média para os metais analisados de 95,2% utilizando o composto de torta de cana-de-açúcar e de 82,8% com o composto de RSU orgânico, possivelmente influenciado pelas condições de pH do ensaio e precipitação dos metais. O percentual de adsorção dos dois compostos atende e supera 90%, indicando alto potencial de utilização de ambos na adsorção de Cd, Zn e Pb, considerando avaliação da melhor concentração para aplicação prática e baixa performance do composto de RSU na remoção de Zn.

Por fim, cabe ressaltar que a comparação entre os dois compostos foi possível somente pois todos os ensaios seguiram a mesma metodologia e foram analisados nos mesmos equipamentos com as mesmas condições de ensaio.

6.2 Compostos de Diferentes Fontes

Conforme apresentado, a compostagem não é efetivamente praticada no Brasil. Porém, diversas são as fontes de resíduos orgânicos que podem se tornar importantes compostos para

melhoria do solo. Nesse sentido, esta seção pontua alguns dos principais resultados obtidos e potencialidades descritas em diferentes estudos sobre compostos não abordados no trabalho e informações complementares para os já discutidos.

1. Composto de torta de filtro de cana-de-açúcar

- a. Em estudo indiano, apresentou proteção contra doenças das plantas; melhoria do padrão microbiológico; aumento da presença de fungos e bactérias para degradação da matéria orgânica; sequestro de carbono e redução da emissão de gases para a atmosfera. (KUMAR et al., 2017);
- b. Em aplicação específica em culturas de óleo de palma, com composto proveniente de indústria sucroalcooleira da Malásia e avaliação baseada nas interações observadas em diferentes amostras (uma contendo somente solo, a segunda somente composto e as demais contendo diferentes proporções solo/composto), indicando melhores capacidades químicas e maior potencial de melhorias no solo quando utilizadas as combinações de solo e composto em comparação ao solo independente (MUSTAPEN et al., 2024);
- c. Estudo conduzido em fazenda no distrito de Cuddalore (Índia), com base em cultura vegetal de teste em solo argiloso/arenoso; resultou-se no maior potencial produtivo e rendimento de palha aplicando fertilizante inorgânico de NPK quando associado ao composto de torta de cana-de-açúcar, sendo a melhor combinação encontrada para a combinação de 75% da dose recomendada do fertilizante com 15 toneladas de composto de torta (POONKODI et al., 2018).

2. Composto da fração orgânica de RSU

- a. O estudo de Nuñez et al. (2023) traz uma compreensão muito interessante e pouco abordada sobre possíveis impactos negativos associados ao composto de RSU orgânico. Considerando a composição deste tipo de resíduo, constata-se significativa presença de metais potencialmente tóxicos - como Cd e Pb - e como a biomassa fúngica pode apresentar potencial na biorremediação deste composto antes da aplicação no solo. O autor indica que os metais não degradados na compostagem tendem a se concentrar na matéria orgânica mineralizada, de modo que a bioadsorção fúngica seria uma opção na imobilização destes metais e, consequentemente, redução dos mesmos no solo.

O estudo indicou que algumas das bactérias e fungos avaliados foram capazes de absorver 50-80% de Cu, sendo que uma das cepas fúngicas removeu cerca de 84,6% de Cu₂ (sob condições de pH na faixa de 5 a 8), mais de 40% de Pb e mais de 20% de Cd. Tais resultados indicam potencial aplicabilidade na melhoria de solos.

3. Composto de resíduos agrícolas e agroindustriais

- a. Estudo baseado em composto combinado misto (palha de arroz e mostarda, milheto perolado e esterco de gado), obtendo melhor grau de maturidade do composto quando a razão C/N é inferior a 15 e a perda de matéria orgânica maior que 42%. Houve aumento da degradação da matéria orgânica (a partir da maior disponibilidade de matéria biodegradável a ser consumida pelos microrganismos), com redução gradual da relação C/N até estabilização. Notou-se possível influência do composto na melhoria da atividade biológica no solo e reações de nitrificação (RAJ e ANTIL, 2011);
- b. Composto formado pela mistura de bagaço de laranja de indústria de suco de laranja de São Carlos (SP) e torta de filtro originada em usina sucroalcooleira em Ibaté (SP) com esterco bovino coletado em propriedade rural em São Carlos (SP), indicou aporte da matéria orgânica humificada, com diferenças características entre os efeitos em latossolo e vertissolo. Recomendada a utilização do composto como alternativa aos fertilizantes minerais devido a propriedades encontradas como: pH entre 7 e 9, indicando neutralidade próxima à alcalinidade; maturidade do composto atingida em cerca de 90 dias por meio da relação C/N inferior a 8,14 e aumento da proporção de micro e macronutrientes no solo (PIGATIN, 2017);
- c. Avaliação da estabilidade de compostos em relação aos limites determinados pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento utilizando composto formado por lodo de flotador, invólucro de embutidos, resíduo de incubatório, cinza remanescente de caldeira e resíduos de poda. Estudo realizado no Brasil, no município de Cascavel (PR). Como resultado, relação C/N média de 12,5, pH alcalino na faixa de 7 a 8, CTC média de aproximadamente 60 cmol_c kg⁻¹ e composto considerado apto no geral para melhoria agrícola sob atendimento da legislação (CHIARELOTTO, 2018).

4. Biocarvão de resíduos orgânicos

- a. Caracterização de biocarvão resultante da pirólise de casca de arroz a 350°C. O ensaio realizado considerou tanto a caracterização físico-química quanto o potencial de adsorção, ambas consideradas satisfatórias de modo geral para o melhoramento de solos. Apresentando relação C/N de 75,64, pH neutro a alcalino, ΔpH negativo, baixa adsorção de Cd (< 35%) e alta adsorção de Pb próxima à remoção total, é reforçado o potencial do biocarvão em questão na retenção de cátions e adsorção de MPT (RODRIGUES, 2022);
- b. O biocarvão é resultado da pirólise de biomassa e considerado uma substância carbonácea, apresentando qualidades ao solo como nutrientes e porosidade elevada. O estudo realizado por Xu et al. (2023) indicou que os grupos funcionais na superfície do material favorecem a CTC e o potencial de adsorção. O trabalho indicou ainda que a adição de biocarvão a compostos orgânicos promove, entre outros benefícios, a mineralização de matéria orgânica, melhoria da maturidade e humificação do solo e redução de emissões de amônia e GEEs. Deste modo, tem-se uma alternativa consolidada para a remediação de contaminantes e recuperação do solo (XU et al., 2023).

6.3 Avaliação Econômica da Utilização de Compostos na Remoção de MPT e na Recuperação de Solos Degradados por Erosão

Em seu trabalho sobre a sorção e viabilidade econômica de materiais orgânicos na adsorção de Zn, Lima, Ferreira da Silva e Rodrigues (2024) descrevem diferentes níveis de sorção de Zn para diferentes materiais empregados. Entre o biocarvão, a turfa e o composto da fração orgânica de RSU, o biocarvão foi o que apresentou maior capacidade de sorção, seguido pelo composto de RSU orgânico - respectivamente, 53,494 mg g⁻¹ e 37,569 mg g⁻¹. A turfa representou o menor potencial de adsorção, com 5,842 mg g⁻¹, porém, um dos menores custos de produção relativos. Nesse sentido, é muito interessante avaliar a viabilidade econômica dos materiais associada ao seu potencial de melhoramento de solos, a fim de buscar a melhor opção custo-benefício para cada proposta.

No presente trabalho, avaliadas as propriedades físicas, químicas e adsorptivas dos compostos de torta de filtro de cana-de-açúcar e da fração orgânica dos RSU, cabe ressaltar seu custo produtivo e a comparação destes em relação aos demais compostos e fertilizantes

orgânicos. A Tabela 8 indica os custos apresentados por Raimondi (2022) e Lima, Ferreira da Silva e Rodrigues (2024) para os compostos em questão.

Tabela 8: Avaliação Econômica sobre os Compostos Utilizados nesta Pesquisa.

Bibliografia	Composto	US\$/kg
Raimondi (2022)	Torta de filtro de cana-de-açúcar	0,01 - 0,06
Meyer-Kohlstock; Schmitz; Kraft (2024)	Fração orgânica de RSU	0,003 - 0,02

Fonte: Raimondi (2022) e Meyer-Kohlstock; Schmitz; Kraft (2024).

Com a avaliação dos autores sobre os diferentes custos associados aos compostos, nota-se razoável diferença entre os compostos do estudo e os demais. Na literatura analisada por Raimondi (2022), tem-se 0,03 a 0,05 US\$/kg para a turfa, 0,09 a 18,00 US\$/kg para o biocarvão, 0,05 US\$/kg para a casca de arroz e, o mais oneroso entre as análises - ainda que muito utilizado como bioissorvente -, 0,34 a 22,00 US\$/kg para o carvão ativado.

Já na comparação bibliográfica de Lima, Ferreira da Silva e Rodrigues (2024), tem-se 0,02 a 0,04 US\$/kg para a turfa, 0,09 a 8,85 US\$/kg para o biocarvão e 0,56 US\$/kg para o biocarvão de casca de arroz.

Deste modo, é possível realizar uma avaliação mais acentuada acerca do potencial de utilização dos compostos e seu custo de produção, reforçando uma das propostas deste estudo sobre a implementação de técnicas menos onerosas para recuperação de solos e evidenciando o destaque aos compostos de torta de filtro de cana-de-açúcar e da fração orgânica dos RSU, vide alto potencial na melhoria de solos associada ao baixo custo.

7. CONCLUSÃO

O trabalho cumpriu com a proposta de avaliar a utilização de compostos de torta de filtro de cana-de-açúcar e da fração orgânica de RSU quanto às suas propriedades na retenção de contaminantes inorgânicos e em solos degradados por processos erosivos.

Com a comparação dos resultados dos diferentes parâmetros avaliados - determinados em laboratório e segundo a literatura de referência - conclui-se que os compostos são opções de custo-benefício positivo, visto que auxiliam na mitigação de impactos ambientais distintos - destinação de resíduos e degradação do solo - e são menos onerosos quando comparados a outras técnicas de recuperação de solos degradados.

De modo geral, os estudos nesta área mostram, atualmente, um potencial relevante sobre ambos os compostos abordados no presente relatório, no qual os ensaios realizados indicam potencial adequado dos compostos na retenção de contaminantes inorgânicos e melhoria de solos degradados por processos erosivos quanto ao teor de umidade, matéria orgânica, porcentagem de adsorção e demais fatores condizentes com a literatura e legislação.

Foi observado maior teor de umidade no composto orgânico em relação ao composto de torta de cana-de-açúcar, enquanto ambos apresentaram pH básico e ΔpH negativo, o que denota capacidade de retenção de cátions e um obstáculo à acidificação do meio, ideal para a proposta em questão. Os valores encontrados para o pH e ΔpH foram semelhantes às análises obtidas na literatura, reforçando a aplicabilidade dos compostos para melhoria das condições do solo.

O composto derivado da cana-de-açúcar apresentou potencial de oxirredução superior ao orgânico, sendo ambos considerados oxidantes devido ao caráter positivo e, portanto, adequados para a imobilização dos metais potencialmente tóxicos. Entretanto, a condutividade elétrica do composto orgânico foi maior que o de torta de cana-de-açúcar, apresentando mais sais dissolvidos, logo, maior capacidade de conduzir corrente elétrica em solução aquosa.

Considerando o alinhamento das características dos compostos - discutidas ao longo deste trabalho - com efeitos positivos na fertilização e melhoria dos solos, associado à crescente geração de resíduos sólidos urbanos, danos ambientais associados à degradação no território brasileiro e a agricultura como fonte principal de cultivo alimentar e de matérias-primas no país, reafirma-se a relevância dessa pesquisa como uma via promissora para a consolidação de práticas de tratamento do solo, trabalhos futuros e iniciativas que -

além de promover a restauração de suas funções ecossistêmicas - também sejam capazes de alinhar produção e conservação, que é o caso dos compostos orgânicos.

No caso dos dois compostos, todos apresentam pontos positivos para serem empregados na recuperação de solos degradados. Como trabalhos futuros, seria importante testar estes compostos com solos para a avaliação de sua efetiva melhoria

8. RECOMENDAÇÕES

Ainda que incipientes, as pesquisas na área da utilização de compostos de distintas fontes na recuperação de solos degradados representam uma excelente alternativa para o desenvolvimento de soluções integradas para diferentes questões ambientais da atualidade. Por isso, este campo merece atenção e estudos mais aprofundados que tratem da caracterização e aplicação de compostos sob diferentes condições e cenários.

Nesse sentido, propõem-se recomendações para pesquisas futuras acerca do tema:

1. Ensaios com vasos sob diferentes proporções de solo e composto para avaliação da capacidade de adsorção e sobre processos erosivos;
2. Estudos avaliativos e de monitoramento sobre os possíveis efeitos da aplicação dos compostos a longo prazo e impactos ambientais associados;
3. Análises complementares sobre o potencial de adsorção considerando diferentes modelos matemáticos;
4. Análises mais aprofundadas considerando metais além dos estudados nesta pesquisa (Cd, Pb e Zn), visando obter um panorama mais abrangente sobre qual iniciativa se aplica melhor a cada tipo de metal envolvido nos processos de contaminação;
5. Avaliação específica e mais aprofundada sobre o teor de matéria orgânica e porosidade em análises multidisciplinares de erosão - diferentes tipos de solo, condições climáticas e proporções de composto;
6. Estudos direcionados à avaliação do composto em diferentes tipos de solos e diferentes tipos de resíduos, avaliando o comportamento dos compostos em diferentes cenários geológicos e químicos;
7. Caracterização de compostos e ensaios de adsorção utilizando compostos independentes e ativados com diferentes nutrientes e concentrações;
8. Ensaios multidisciplinares comparativos isolados e associados envolvendo os compostos e demais técnicas de recuperação de áreas degradadas - como *Pump and treat*, fitorremediação e biorremediação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHIBA, W. B.; GABTENI, N.; LAKHDAR, A.; LAING, G. D.; VERLOO, M.; JEDIDI, N.; GALALI, T. **Effects of 5-year application of municipal solid waste compost on the distribution and mobility of heavy metals in a Tunisian calcareous soil.** Agriculture, Ecosystems & Environment, Volume 130, 2009. p. 156-163, ISSN 0167-8809. DOI: 10.1016/j.agee.2009.01.001.

ALPINO, T. M. A.; MAZOTO, M.L.; BARROS, D. C.; FREITAS, C.M.. **Os impactos das mudanças climáticas na Segurança Alimentar e Nutricional: uma revisão da literatura.** Ciência & Saúde Coletiva, v. 27, n. 1, p. 273–286, jan. 2022.

AMLINGER, F.; PEYR, S.; CUHLS, C.. **Green house gas emissions from composting and mechanical biological treatment.** Waste Management & Research, v. 26, p. 47-60, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022.** 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2021.** 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 10004: Resíduos Sólidos - Classificação.** Rio de Janeiro - RJ, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE - ABREMA. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023.** 2023.

ASSOCIAÇÃO INTERNACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS/INTERNATIONAL SOLID WASTE ASSOCIATION - ISWA. **O Futuro do Setor da Gestão de Resíduos: Tendências, Oportunidades e Desafios para a Década.** 2022.

BARTON, J. R.; ISSAIAS, I.; STENTIFORD, E. I. **Carbon – making the right choice for waste management in developing countries.** Waste Management, v. 28, p. 690-698, 2008.

BEZ, R. F. Avaliação da Técnica de Compostagem como uma Solução Alternativa para a Recuperação de Resíduos Sólidos Orgânicos da Malacocultura Gerados em Florianópolis. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Química da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis - SC, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/218579>.

BLUM, W. E. H.; SANTELISES, A. A.. A concept of sustainability and resilience based on soil functions: the role of the ISSS in promoting sustainable land use. In: Greenland, D.J. and Szabolcs, I. (Eds.). Soil Resilience and Sustainable Land Use. CAB International, Wallingford, p. 535-542. 1994.

BOSCOV, M. E. G. Geotecnia Ambiental. São Paulo: Oficina de Textos. 2008.

BRASIL. Plano Nacional de Resíduos Sólidos - Planares. Brasília - DF: Ministério do Meio Ambiente (MMA), Secretaria da Qualidade Ambiental. 2022. 209 p. Disponível em: <https://portal-api.sinir.gov.br/wp-content/uploads/2022/07/Planares-B.pdf>.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA. Instrução Normativa nº 61, de 08 de julho de 2020. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2020.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA. Manual de Métodos Oficiais para Fertilizantes Minerais, Orgânicos e Corretivos. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2017.

BRASIL. Lei N° 12.305 de 02 de agosto de 2010 - Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). 2010.

BUDIYANTO, G.. The effect of combination of sugarcane pressmud compost and potassium fertilizer on vegetative growth of corn in coastal sandy soil. Food Research, 5, 202. p 289-296. DOI: 10.26656/fr.2017.5(3).630.

CAO, X.; WILLIAMS, P. N.; ZHAN, Y.; COUGHLIN, S. A.; MCGRATH, J. W.; CHIN, J. P.; XU, Y.. Municipal solid waste compost: Global trends and biogeochemical cycling. Soil & Environmental Health. Volume 1, Issue 4, 2023. ISSN 2949-9194. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949919423000389>.

CARALINDA, I.F.S. Análise de Risco para a Saúde Humana Devido à Contaminação de Solos com Metais Pesados - Caso de Estudo. 2022. 101. (Order No. 29335517) - Universidade de Lisboa (Portugal), Portugal, 2022.

CERQUEIRA, H.; ROXO, M.; CALVO-CASES, A.. (2023). Burying the carbon to dig up the future: Reviewing the role of Geography in valuing soil carbon ecosystem services. Cuadernos de Investigación Geográfica. 50. 10.18172/cig.5767.

CETESB. ÁREAS CONTAMINADAS E REABILITADAS NO ESTADO DE SÃO PAULO. Infraestrutura Meio Ambiente. Mapa de informações geoespecializadas, Áreas Contaminadas - Público. 2022. Disponível em: <https://mapas.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/portal/apps/webappviewer/index.html?id=77da778c122c4ccda8a8d6babce61b6b>

CETESB. Manual de gerenciamento de áreas contaminadas. 2.ed. São Paulo, 2001. 389 p.

CHIARELOTTO, M.. Redução do tempo de compostagem de resíduos agroindustriais: efeito nos parâmetros de controle e na qualidade do composto final. 2018. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2018.

COELHO, S. T.; GOLDEMBERG, J.; LUCON, O.; GUARDABASSI, P.. Brazilian sugarcane ethanol: lessons learned. Energy for Sustainable Development, Volume 10, Issue 2. 2006. P. 26-39, ISSN 0973-0826, [https://doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60529-3](https://doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60529-3).

COLTRO, G. M. et al.. ATIVAÇÃO DE COMPOSTO ORGÂNICO COM ÁCIDO FOSFÓRICO E OS EFEITOS NA ADSORÇÃO DE Pb E Cd. Química Nova, v. 46, n. 9, p. 846–853, 2023.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA - CNI. Economia circular: oportunidades e desafios para a indústria brasileira. Brasília : CNI, 2018. 64 p.

COOPER, MIGUEL. Degradação e Recuperação de Solos. Departamento de Ciência do Solo, ESALQ - USP. Piracicaba, 2008. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1680322/mod_folder/content/0/APOSTILA-Degr%20e%20Recup%20de%20Solos%202008.pdf

COSTA, H. J. M.. Análise de Reaproveitamento da Torta de Filtro como Benefício Econômico no Setor Sucroenergético. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Agronômica) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2023. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/6756c1b2-f277-483d-89ea-f2b022d1c75c/content>

COSTA, J. S.. Comparação entre as técnicas de compostagem e vermicompostagem em composteira unifamiliar de baixo custo. 2024. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2023.

COSTA, J. C.; MACHADO, L. G.. Estudo do mercado do Etanol de Segunda Geração no Brasil. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/9007b8f9-e4f5-4226-9c4e99bfeced06b0/LuisGustavodeLimaMachado%20PQI20.pdf>.

CRUZ, M. A.; CASANOVA, R. F.; BOSCARDIN, D.; ZANCHET, A.. Análise da viabilidade do uso de resíduos de cana-de-açúcar para produção de aglomerantes sustentáveis. Matéria (Rio de Janeiro), v. 26, n. 4, p. e13113, 2021.

DIAZ, P.. (2016). **Consequences of Compost Press Mud as Fertilizers.** DJ International Journal of Advances in Microbiology & Microbiological Research. 1. 28-32. 10.18831/djmicro.org/2016011005.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Towards the circular economy Vol. 1: an economic and business rationale for an accelerated transition** (2013).

EMPRESA BRASILEIRA DE AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Mapa de vulnerabilidade dos solos à erosão hídrica do Brasil. Ativo Cartográfico. Embrapa Solos, 2022. Disponível em: <https://geoinfo.dados.embrapa.br/catalogue/#/dataset/2997>.

EMPRESA BRASILEIRA DE AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Resíduos Orgânicos. Embrapa Hortalícias. Agosto, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/hortalica-nao-e-so-salada/secoes/residuos-organicos>.

FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P.. **Manual prático para compostagem de biossólidos.** Rio de Janeiro: PROSAB-FINEP, 1999.

FERREIRA, F. M.; LOFRANO, F. C.; MORITA, D. M.. **Remediação de áreas contaminadas: uma avaliação crítica da legislação brasileira.** Artigo técnico. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522020168968>.

FILIZOLA, H. F.; ALMEIDA FILHO, G. S. de; CANIL. K.; SOUZA, M. D. de; GOMES, M. A. F.. **Controle dos processos erosivos lineares (ravinhas e voçorocas) em áreas de solos arenosos.** Jaguariúna, SP: Embrapa Meio Ambiente, 2011. Circular Técnica, 22. 7 p. ISSN 1516-4683.

GUEDES, C. L. B.; ADÃO, D. C.; QUESSADA, T. P.; BORSATO, D.; GALÃO, O. F.; DI MAURO, E.; PÉREZ, J. M. M.; ROCHA, J. D.. **Avaliação de biocombustível derivado do bio-óleo obtido por pirólise rápida de biomassa lignocelulósica como aditivo para gasolina.** Química Nova, v. 33, n. 4, p. 781–786, 2010.

GUERMANDI, J. I.. **Avaliação dos parâmetros físicos, químicos e microbiológicos dos fertilizantes orgânicos produzidos pelas técnicas de compostagem e vermicompostagem da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos coletada em estabelecimentos alimentícios de São Carlos/SP.** Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos (EESC). Universidade de São Paulo (USP). 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Monitoramento da cobertura e uso da terra do Brasil.** IBGE, Coordenação de Meio Ambiente. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. 39 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Produção Agrícola Municipal (PAM).** 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html>

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO - IBRAM. **Infográfico Mineração em Números 1S23.** Portal da Mineração, Publicações IBRAM. 2023. Disponível em: <https://ibram.org.br/publicacoes/?txtSearch=&checkbox-section%5B%5D=1236>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA - IPEA. **Resíduos sólidos urbanos no Brasil: desafios tecnológicos, políticos e econômicos.** 09 de

junho de 2020. Disponível em:
<https://www.ipea.gov.br/cts/pt/central-de-conteudo/artigos/artigos/217-residuos-solidos-urbanos-no-brasil-desafios-tecnologicos-politicos-e-economicos>.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS - IBAMA. Ministério do Meio Ambiente - MMA. Instrução Normativa nº 14, de 01 de julho de 2024. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2024.

INSTITUTO DE TECNOLOGIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. **Controle de Erosão: bases conceituais e técnicas, diretrizes para o planejamento urbano e regional, orientação para o controle de boçorocas urbanas**. Secretaria de Energia e Saneamento. Departamento de Águas e Energia Elétrica - DAEE/IPT. São Paulo - SP, 1989.

KALAIVANAN, D., HATTAB, K. O.. Recycling of sugarcane industries byproducts for preparation of enriched pressmud compost and its influence on growth and yield of rice (*Oryza sativa* L.). *Int J Recycl Org Waste Agricult* 5, 263–272 (2016). <https://doi.org/10.1007/s40093-016-0136-4>

KASEMODEL, M. C.. **Avaliação integrada da contaminação por metais potencialmente tóxicos em área de disposição de resíduo de mineração de chumbo: Adrianópolis (PR)**. 2017. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-05122017-094900/>.

KIEHL, E. J. **Manual de compostagem: maturação e qualidade do composto**. 4.ed. Piracicaba, 2004. 173p.

KIEHL, E. J. **Fertilizantes orgânicos**. Piracicaba: Editora Agronômica “Ceres” Ltda. 1985. 492 p.

KINPARA, D. I.. Aspectos econômicos de fertilizantes organominerais obtidos a partir de cama de frango e de torta de filtro de cana-de-açúcar no Brasil. Planaltina, DF : Embrapa Cerrados, 2020. 25 p. ISSN 1517-5111.

KUCHARSKI, S. C. R. P.; BARBOSA, R. M.; NUNES, F. C.; BRITO, F. J. O.; SILVA, E. F.. **Avaliação dos níveis de metais pesados em solos e sedimentos do grupo Barreiras sob depósitos de resíduos sólidos urbanos – caso de Canabrava – Salvador - Bahia**. Rio de Janeiro : Embrapa Solos, 2011. 57 p. - ISSN 1678- 0892 ; 199.

KUMAR, S.; MEENA, R. S.; JINGER, D.; JATAV, H. S.; BANJARA, T. **Use of pressmud compost for improving crop productivity and soil health.** International Journal of Chemical Studies, v. 5, n. 2, p. 384-389, 2017.

LAL, R.. **Methods and guidelines for assessing sustainable use of soil and water resources in the tropics.** Columbus: Ohio State University, Department of Agronomy, 1994. 78 p. (SMSS Technical Monograph, 21).

LAHORI, A.; RIAZ, S. A.; AFZAL, A.; MIERZWA-HERSZTEK, M.; BANO, S.; MUHAMMAD, M.; SALEEM, I.; SOOMRO, W. (2023). **Alone and Combined Application of Press Mud Compost and Fuller Earth for Abating Pb and Cd and Enhance Sorghum Growth in Polluted Soils.** Trends in Ecological and Indoor Environmental Engineering. DOI 10.62622/TEIEE.023.1.1.07-15.

LIMA, J. Z.; FERREIRA DA SILVA, E. A.; RODRIGUES, V. G. S.. **Sorption and economic viability of peat, compost and biochar for zinc-contaminated site.** Environmental Geotechnics, Volume 11, Issue 6. 2024. P. 459-470, ISSN 2051-803X. <https://doi.org/10.1680/jenge.22.00046>.

LIMA, J. Z.; NAUERTH, I. M. R.; SILVA, E. F.; PEJON, O. J. P.; RODRIGUES, V. G. S.. **Competitive sorption and desorption of cadmium, lead, and zinc onto peat, compost, and biochar.** Journal of Environmental Management, Volume 344, 2023. 118515, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118515>.

LIMA, J. Z. **Avaliação da sorção e pós-sorção de contaminantes provenientes de resíduos de mineração: turfa, composto e biocarvão.** Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos (EESC). Universidade de São Paulo (USP). 2022.

LIMA, J. Z.; SILVA, E. F.; PATINHA, C.; DURÃES, N.; VIEIRA, E. M.; RODRIGUES, V. G. S.. **Sorption of arsenic by composts and biochars derived from the organic fraction of municipal solid wastes: Kinetic, isotherm and oral bioaccessibility study.** Environmental Research, Volume 204, Part A, 2022. ISSN 0013-9351. DOI: 10.1016/j.envres.2021.111988.

LIMA, J. Z. **Caracterização geológica-geotécnica e estudo da adsorção de Pb, Zn e Cd por turfa e compostos orgânicos.** Tese de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos (EESC). Universidade de São Paulo (USP). 2017.

LIMA, F.; DOS SANTOS JUNIOR, A. C.; MARTINS, L. C.; SARROUH, B.; LOFRANO, R. C. Z.. **Revisão sobre a toxicidade e impactos ambientais relacionados à vinhaça, efluente da indústria sucroalcooleira.** Cadernos UniFOA, Volta Redonda, v. 11, n. 32, p. 27–34, 2016. DOI: 10.47385/cadunifoa.v11.n32.465.

MARTINS, E. de S.; MARTINS, E. S.; HARDOIM, P. R.. **Princípios geoquímicos, mineralógicos e biológicos do manejo de remineralizadores de solos.** Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v. 44, n. 321, p. 26-39, 2023.

MARQUES, R. L. **Caracterização de composto orgânico proveniente da compostagem de resíduos sólidos orgânicos e análise de seu emprego em solos degradados do município de Nazareno (MG).** Monografia de Graduação (Engenharia Ambiental). Escola de Engenharia de São Carlos (EESC). Universidade de São Paulo (USP). 2019.

MAUAD, F. F.; FERREIRA, L. C.; TRINDADE, T. C. G.. **Energia renovável no Brasil: análise das principais fontes energéticas renováveis brasileiras.** Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos, 2017. Disponível em: www.livrosabertos.abcd.usp.br/portaldelivrosUSP/catalog/book/168.

MELGAREJO, L.. **Rio Grande do Sul: capitalismo do desastre ou Agroecologia?.** Revista Brasileira de Agroecologia, v. 19, n. 2, p. 120-130, 2024.

MERCANTE, A. L. P.. **Geração de bioeletricidade, através do bagaço e da palha da cana-de-açúcar.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Agronômica) – Universidade Federal de São Carlos, Araras, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/13790>.

MEYER-KOHLSTOCK, D.; SCHMITZ, T.; KRAFT, E.. **Organic Waste for Compost and Biochar in the EU: Mobilizing the Potential.** Resources, 2015. 4. 457. 10.3390/resources4030457.

MOHAMAD, M. & OSMAN, N.; RAHIM, M. K. I. A.; ABUSTAN, I.; Zainol, M. R. R. M. A.; SAMUDING, K.; ZAKARIA, S. N. F.; ABU, F.. **Suitability of pressmud as an adsorption material in wastewater treatment and as a booster in soil fertility and productivity.** IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2023. DOI: 10.1088/1755-1315/1143/1/012001.

MONTEIRO, A.; YAMAMOTO, A; SILVA, P.; REBOITA, M.. **Conhecer a complexidade do sistema climático para entender as mudanças climáticas.** 2021. Terra e Didatica. V. 17. e02106. 10.20396/td.v17i00.8663763.

MUSTAPEN, R. N.; MOHAMAD, M.; NOORDIN, A.; KAFI, M. A.; RAZALLI, M. R.; ISMAIL, H.; ZAKARIA, S. N. F.; CHELLAMUTHU, V. (2024). **Potentiality of Pressmud Application in Soil for Palm Oil Plantation Productivity.** PaperASIA, 40(1b), 31–38. [https://doi.org/10.59953/paperasia.v40i1\(b\).59](https://doi.org/10.59953/paperasia.v40i1(b).59).

NASCIMENTO, J. P. S.. **Eventos extremos: o impacto da crise climática nas migrações no Brasil.** 2024. 32 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geografia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2024.

NIGAM, P. S.; SINGH, A.. **Production of liquid biofuels from renewable resources.** Progress in Energy and Combustion Science - Volume 37, Issue 1. 2011. P. 52-68. ISSN 0360-1285. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2010.01.003>.

NUNES JÚNIOR, D. **Torta de filtro: De resíduo a produto nobre.** Idea News, n. 92. P. 22-30, 2008.

NUÑEZ, W. E.; SOTOMAYOR, D. A. ; BALLARDO, C. V. ; HERRERA, E.. **Potencial de la biomasa fúngica: producción y mecanismos de biorremediación de metales pesados del compost de residuos sólidos orgánicos municipales.** Scientia Agropecuaria, [S. l.], v. 14, n. 1, p. 79-91, 2023. DOI: 10.17268/sci.agropecu.2023.008. Disponível em: <https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/scientiaagrop/article/view/4684>.

PICKIN, J. G.; YUEN, S. T. S. HENNINGS, H.. **Waste management options to reduce greenhouse gas emissions from paper in Australia.** Atmospheric Environment, v. 36, p.741-752, 2002.

PINHEL, J. R.; LEÃO, A. L.; MARCOS, A. S. N.; CESARINO, I. (2018) “**Ciclo Limpo”: Análise da viabilidade de um modelo de gerenciamento descentralizado de resíduos orgânicos.** Revista Brasileira de Planejamento e Desenvolvimento, 7(3), p. 390-404.

PIGATIN, L. B. F.. **Estudo químico e espectroscópico da dinâmica da vermicompostagem de resíduos agroindustriais para manejo sustentável em agricultura orgânica.** 2017. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/75/75135/tde-05072017-143344/>.

POONKODI, P.; ANGAYARKANN, A.; VIJAYAKUMAR, R.; BALAKUMAR, A.. **EFFECT OF INORGANIC FERTILIZERS AND PRESSMUD COMPOST ON SOIL PROPERTIES, YIELD AND QUALITY OF BHENDI.** 2018. Journal of Ecobiotechnology. 05-08. 10.25081/jebt.2018.v10.3562.

PRESS, F.; GROTZINGER, J.; SIEVER, R.; JORDAN, T. H.. **Para Entender a Terra.** Tradução: MENEGAT, R. (coord.). 4^a edição. Porto Alegre: Bookman, 2006.

PRIETO, P. M. C.. **Aproveitamento de resíduos sólidos orgânicos mediante a técnica da compostagem para utilização em áreas degradadas.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019. Disponível em: https://bdta.abcd.usp.br/directbitstream/a2bc6c7f-1d8d-45dd-84b8-332d0d4c30ab/Prieto_Paula_TCE.pdf. Acesso em: 24 jun. 2024.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE - PNUMA. O mundo deve superar a era do desperdício e transformar o lixo em recurso, segundo relatório da ONU. United Nations Environment Programme (2024). Global Waste Management Outlook 2024: Beyond an age of waste – Turning rubbish into a resource. Nairobi. Disponível em: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/44939>

RAIMONDI, I. M.; VIEIRA, E. M.; VAZ, L. A. A.; RODRIGUES, V. G. S. (2022). **Comparison of sugarcane pressmud with traditional low-cost materials for adsorption of lead and zinc in mining areas.** International Journal of Environmental Science and Technology. 19. 10.1007/s13762-021-03420-0.

RAIMONDI, I. M.; RODRIGUES, V. G. S.; LIMA, J. Z.; MARQUES, J. P.; VAZ, L. A. A.. **The Potential Use of Pressmud as Reactive Material for Cd²⁺ Removal: Adsorption Equilibrium, Kinetics, Desorption, and Bioaccessibility.** Water Air Soil Pollut, 231 - 365 (2020). DOI: 10.1007/s11270-020-04746-0.

RAIMONDI, I. M.. **Turfa, composto de torta de cana-de-açúcar e zeólitas como sorventes de Pb, Cd e Zn: Equilíbrio em lote, cinética, dessorção e bioacessibilidade.** Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos (EESC). Universidade de São Paulo (USP). 2019.

RAJ, D.; ANTIL, R. S.. **Evaluation of maturity and stability parameters of composts prepared from agro-industrial wastes.** Bioresource Technology. Volume 102, Issue 3 (2011). p. 2868-2873, ISSN 0960-8524, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.10.077>.

RAJPUT, A.; MEMON, M.; MEMON, K. S.; SIAL, T. A.; HADI, A; LAGHARI, B.. **INTEGRATED NUTRIENT MANAGEMENT IN BANANA: COMPARATIVE ROLE OF FYM AND COMPOSTED PRESSMUD FOR THE IMPROVEMENT OF SOIL PROPERTIES.** 2022.

RODRIGUES, M. B.. **Caracterização do biocarvão oriundo da pirólise da casca de arroz a 350°C e ensaio de adsorção com cádmio (Cd) e chumbo (Pb).** Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP). São Carlos, 2022.

RODRIGUES, V. G. S.. Resíduos de Mineração. In: SCHALCH, V.; LEITE, W. C. A.; CASTRO, M. C. A. A.; CÓRDOBA, R. E.; CASTRO, M. A. S. (Orgs.). **Resíduos Sólidos: Conceitos, Gestão e Gerenciamento.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2019.

ROSSETTO, R.; DIAS, F. L. F.; VITTI, A. C. **Problemas nutricionais dos solos nas novas fronteiras canavieiras.** Idea News, Ribeirão Preto, v. 8, n. 94, p. 78-90, 2008.

ROTTA, C. M. S.; ZUQUETTE, L. V.. Processos Erosivos. In: ZUQUETTE, L. V. (Org.). **Geotecnia Ambiental.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

SABIR, M.; HANAFI, M.; AZIZ, T.; AHMAD, H. R.; ZIA-UR-REHMAN, M.; ULLAH, S.; MURTAZA, G.; HAKEEM, K. R.. **Comparative Effect of Activated Carbon, Pressmud and Poultry Manure on Immobilization and Concentration of Metals in Maize (*Zea mays*) Grown on Contaminated Soil.** International Journal of Agriculture and Biology, 2013. 559–564. ISSN Online: 1814–9596.

SALOMONS, W.; FORSTNER, U.; MADER, P. **Heavy metals: problems and solutions.** Environmental Science. 1995. DOI: 10.1007/978-3-642-79316-5.

SAMPAIO, A. B.; RIBEIRO, K. T.; VIEIRA, D. M.; SILVA, D. C. B.. **Guia de restauração ecológica para gestores de unidades de conservação.** 1. ed. Brasília, DF: Instituto Chico Mendes - ICMBio, 2021.

SÁNCHEZ, L. E. A desativação de empreendimentos industriais: um estudo sobre o passivo ambiental. São Paulo, 1998. 178p. Tese (Livre-Docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

SANTOS, V. Z. C.. Percepção das mudanças climáticas e estratégias de adaptação na agricultura familiar orgânica e convencional do Rio Grande do Sul. 2023. 159 f., il. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Sustentável) — Universidade de Brasília, Brasília, 2023.

SANTOS, A. S. dos .; ANJOS, J. Ângelo S. A. dos. Evolução da contaminação do solo por metais tóxicos: o caso da Plumbeum Mineração e Metalurgia Ltda, Santo Amaro, Bahia, Brasil. Geologia USP. Série Científica, [S. l.], v. 22, n. 1, p. 109-123, 2022.

DOI: 10.11606/issn.2316-9095.v22-181799. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/guspse/article/view/196168>.

SANTOS, L; SILVA, G.; ABRANCHES, M; ROCHA, J.; SILVA, S.; RIBEIRO, M.; GOMES, V.; SEVERO, P.; BRILHANTE, C.; SOUSA, F.. O papel do silício nas plantas. Research, Society and Development. 2021. 10. e3810716247. 10.33448/rsd-v10i7.16247.

SANTOS, F. A.; QUEIRÓZ, J. H.; COLODETTE, J. L.; FERNANDES, S. A.; GUIMARÃES, V. M.; REZENDE, S. T.. Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. Química Nova, v. 35, n. 5, p.1004 - 1010, 2012.

SANTOS, D. H.; SILVA, M. A.; TIRITAN, C. S.; FOLONI, J. S. S.; ECHE, F. R. Qualidade tecnológica da cana-de-açúcar sob adubação com torta de filtro enriquecida com fosfato solúvel. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.15, p.443-449, 2011.

SÃO PAULO (Estado). Lei Estadual nº 13.577, de 08 de julho de 2009. Dispõe sobre diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e gerenciamento de áreas contaminadas e dá outras providências. **Diário Oficial do Estado de São Paulo**, São Paulo, 2009.

SAUER, S.. Questão eco-agrária: extrativismo agrário, mudanças climáticas e desmatamento no Brasil. Revista NERA, v. 27, n. 2, p. e10185, 2024.

SCHALCH, V.; LEITE, W. C. A.; CASTRO, M. C. A. A.; CÓRDOBA, R. E.; CASTRO, M. A. S. (Orgs.). **Resíduos Sólidos: Conceitos, Gestão e Gerenciamento.** Elsevier Editora Ltda. Rio de Janeiro - RJ, 2019.

SENNA, P.; ANSANELLI, S. (2016). **ETANOL DE PRIMEIRA OU DE SEGUNDA GERAÇÃO? UMA COMPARAÇÃO ENTRE OS CICLOS PRODUTIVOS.** 1497-1510. 10.5151/engpro-1enei-083.

SILVA, J. A. L.; CARBONEL, J. A. V.. Caracterización del proceso de compostaje y compost de residuos sólidos orgánicos domiciliarios del distrito de Pueblo nuevo en Ferreñafe, 2022. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. Trabalho de Conclusão de Curso. 2024.

SILVETTI, M.; DEMURTAS, D.; GARAU, G.; DEIANA, S.; CASTALDI, P. **Sorption of Pb, Cu, Cd, and Zn by Municipal Solid Waste Composts: Metal Retention and Desorption Mechanisms.** CLEAN - Soil, Air, Water. 2016. DOI: 10.1002/clen.201600253.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE A GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS - SINIR. Resíduos Sólidos Urbanos. 2020. Disponível em: <https://sinir.gov.br/informacoes/tipos-de-residuos/residuos-solidos-urbanos/>.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE O SANEAMENTO - SNIS. Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos. 2022. Disponível em: http://antigo.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/rs/2020/DIAGNOSTICO_TEMATICO_INFRAESTRURA_PARA_OS_SERVICOS_RS_SNIS_2022.pdf.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE O SANEAMENTO - SNIS. Panorama do Saneamento Básico no Brasil. 2021. Disponível em: http://antigo.snis.gov.br/downloads/panorama/PANORAMA_DO_SANEAMENTO_BASICO_NO_BRASIL_SNIS_2021.pdf.

SIQUEIRA, T.M.O.; ABREU, M.J. (2016) **Fechando o ciclo dos resíduos orgânicos: Compostagem inserida na vida urbana.** Ciência e Cultura, 68(4). DOI: 10.21800/2317-66602016000400013.

SOARES, M. R.; CASAGRANDE, J. C.. Adsorção e modelos. In: RIBEIRO, M. R.; NASCIMENTO, C. W. A.; RIBEIRO FILHO, M. R.; CANTALICE, J. R. B.. Tópicos em ciência do solo. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, MG, 2000.

SOUZA, L. A.; CARMO, D.; SILVA, F.; PAIVA, W.. **Análise dos principais parâmetros que influenciam a compostagem de resíduos sólidos urbanos**. 2020. 194-212. DOI 10.5281/zenodo.3970186.

SRIVASTAVA, A. N., CHAKMA, S.. **Assessment of in situ stabilization and heavy metal toxicity reduction of sugar mill pressmud through pilot scale composting**. Environ Monit Assess 195, 951 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11564-4>

SRIVASTAVA, V., DE ARAUJO, A. S. F., VAISH, B. *et al.* **Biological response of using municipal solid waste compost in agriculture as fertilizer supplement**. Rev Environ Sci Biotechnol 15, 677–696 (2016). <https://doi.org/10.1007/s11157-016-9407-9>

TAVARES, S. R. L. **Remediação de solos e águas contaminadas por metais pesados: Conceitos básicos e fundamentos**. Rio de Janeiro, RJ: 2013. 147 p.

THEODORO, S. H.; MEDEIROS, F. P.; IANNIRUBERTO, M.; JACOBSON, T. K. B.. **Soil remineralization and recovery of degraded areas: An experience in the tropical region**. Journal of South American Earth Sciences, Volume 107. 2021. 103014, ISSN 0895-9811. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103014>.

UNICADATA – OBSERVATÓRIO DA CANA E BIOENERGIA. União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia (ÚNICA). **Histórico de moagem e produção de açúcar e etanol. Área e Produção.** 2024. Disponível em: <https://unicadata.com.br/listagem.php?idMn=4>.

VANOTTI, M. B.; SZOGI, A. A.; VIVES, C. A.. **Greenhouse gas emission reduction and environmental quality improvement from implementation of aerobic waste treatment systems in swine farms**. Waste Management, v. 28, p. 759–766, 2008.

ZACHARA, J. M.; WESTALL, J. C; Chemical Modeling of Ions Adsorption in Soils. In: SPARKS, D. L.; **Soil physical chemistry**, CRC Press, 1998.

ZUQUETTE, L. V.; RODRIGUES; V. G. S.; PEJON, O. J.. Recuperação de Áreas Degradadas. In: CALIJURI, M. C.; CUNHA, D. G. F. (Eds.). **Engenharia Ambiental: Conceitos, Tecnologia e Gestão**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013. p. 589 - 619.

XU, M.; SUN, H.; CHEN, E.; YANG, M.; WU, C.; SUN, X.; WANG, Q.. **From waste to wealth: Innovations in organic solid waste composting**. Environmental Research, Volume 229, 2023. ISSN 0013-9351. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115977>.