



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

PALOMA GERMANO DUTRA DE OLIVEIRA

**OTIMIZAÇÃO E ACELERAÇÃO DO PROCESSO DE
COMPOSTAGEM EM UM REATOR PILOTO**

JOÃO PESSOA – PB 2024

PALOMA GERMANO DUTRA DE OLIVEIRA

**OTIMIZAÇÃO E ACELERAÇÃO DO PROCESSO DE COMPOSTAGEM EM
UM REATOR PILOTO**

Trabalho Final de Curso ou Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação de Engenharia Química do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba em cumprimento aos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Prof.^a Dra. Vivian Stumpf
Madeira

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

O48o Oliveira, Paloma Germano Dutra de.
OTIMIZAÇÃO E ACELERAÇÃO DO PROCESSO DE COMPOSTAGEM
EM UM REATOR PILOTO / Paloma Germano Dutra de Oliveira.
- João Pessoa, 2024.
62 f. : il.

Orientação: Vivian Stumpf Madeira Madeira.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Resíduo sólido orgânico. 2. Compostagem. 3.
Reator piloto. 4. Bactérias. I. Madeira, Vivian Stumpf
Madeira. II. Título.

UFPB/CT/BSCT

CDU 66.01(043.2)

PALOMA GERMANO DUTRA DE OLIVEIRA

**OTIMIZAÇÃO E ACELERAÇÃO DO PROCESSO DE COMPOSTAGEM EM
UM REATOR PILOTO**

Trabalho Final de Curso apresentado ao Centro de Tecnologia, da Universidade Federal da Paraíba, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Aprovado em 16 de abril de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **VIVIAN STUMPF MADEIRA**
Data: 19/04/2024 11:41:34-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof.^a Dra. Vivian Stumpf Madeira

(Orientadora - UFPB)

Documento assinado digitalmente
 **SHARLINE FLORENTINO DE MELO SANTOS**
Data: 22/04/2024 14:50:33-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof.^a Dra. Sharline Florentino de Melo Santos

(Avaliadora – UFPB)

Documento assinado digitalmente
 **RAIMUNDO KENNEDY VIEIRA**
Data: 19/04/2024 14:09:57-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Raimundo Kennedy Vieira

(Avaliador Externo – UFAM)

*Em memória dos meus avós Francisco
Germano e Maria Neci, vocês são as
estrelas mais lindas desse céu.*

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao Ser Celeste que me concedeu discernimento e coragem para chegar até aqui. Às minhas mães Aparecida Germano e Maria Germano, por todo amor e cuidado, e por me ensinarem que o caminho do bem é sempre o mais lindo; vocês são meu mundo inteiro.

Ao meu pai Gilvan Dutra, por me amar em todas as minhas versões e por me ensinar que somos tão grandes quanto nossos sonhos.

À minha irmã Ana Clara por me inspirar a ser uma pessoa melhor e por me fazer sentir a irmã mais incrível do planeta; obrigada por ser minha maior fã, você será sempre meu raio de sol.

Ao meu irmão e parceiro de graduação Paulo Vítor, eu não sei o que seria dessa jornada sem você; obrigada por enxugar minhas lágrimas e por me inspirar a ver sempre o lado bom da vida; espero ter sempre algo bom para lhe contar.

À minha madrinha Robsmeire, minha prima Rozeane e minha tia Lourdinha, por todas as orações e apoio, e por me proporcionarem um segundo lar nesse mundo; a casa de vocês é um dos meus lugares favoritos da vida.

À minha família, por me ensinar que as pequenas coisas são as mais valiosas e que a simplicidade e a honestidade são tesouros inestimáveis nesta vida.

Aos meus amigos e companheiros de graduação: Jacaraú, Danilo, Beatriz, Layane, Eduarda, Bione, Joice, Isis, Humberto e Jhonatas, obrigado por trilharem este caminho comigo, por não soltarem minha mão e por me incentivarem todas as vezes que eu quis desistir. Eu amo vocês.

À minha amiga Amanda, por ser minha fiel escudeira, mesmo com os vários quilômetros de distância. Você não sabe quantas vezes me salvou nesta caminhada; que sejamos uma da outra até o fim do universo.

Ao meu namorado David pela paciência e cuidado até aqui; você é como um sonho doce e tranquilo. Amo você.

Ao meu parceiro de pesquisa Felipe Júnior, um tesouro encontrado no fim da graduação. Amigo, obrigado pelas risadas e choros no laboratório; ter você tornou tudo mais leve.

Aos meus professores e orientadores, em especial à professora Vivian Stumpf Madeira e à professora Sharline Florentino de Melo Santos, que acreditaram no meu potencial e me fizeram ver beleza na Engenharia Química.

A todos que fazem os laboratórios LACQUA, LABIO e LABEME em especial aos técnicos Thyago, Fabiana e Seu Sebastião que se fizeram sempre presentes nos momentos que precisei de suporte.

Ao INCT Midas, pelo apoio financeiro durante todo o projeto, foi um prazer trabalhar com essa rede de pesquisa incrível.

A todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram, direta ou indiretamente, nesta jornada: este trabalho representa minha gota de esperança em um mundo melhor e mais sustentável. Sou grata a todos que abriram as portas para que eu chegasse até aqui.

RESUMO

Em face da gestão ineficiente dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) pelos municípios brasileiros, uma quantidade expressiva de resíduos é descartada diariamente em locais impróprios, como lixões e aterros controlados. A fração orgânica é a mais significativa entre os RSU. Quando dispostos de maneira incorreta, os resíduos orgânicos sólidos podem causar diversos transtornos, como a contaminação do solo e da água, a proliferação de animais transmissores de doenças e sérios problemas de saúde pública e ambiental. Uma das soluções viáveis para este desafio é a realização da compostagem, processo onde a decomposição da matéria orgânica é feita através de bactérias, fungos e actinomicetos, resultando em um adubo sólido orgânico e um biofertilizante líquido, ambos com potencial para serem utilizados como bioinsumos para as plantas. Diminuir a duração do processo de compostagem e aprimorar a qualidade do produto final são os desafios centrais na produção de compostos orgânicos. O tempo de compostagem é afetado por diversos fatores tanto físico-químicos quanto pela escolha do método. Durante o processo, os microrganismos aeróbicos degradam o material orgânico. A introdução de inoculos aceleradores na degradação do material orgânico resulta em uma alteração na dinâmica do processo de compostagem. Assim, a manipulação desses microrganismos tem um impacto significativo na degradação do material e conseqüentemente na velocidade de reação. Neste trabalho, reatores pilotos foram utilizados em dois testes afim de otimizar o processo de compostagem através da avaliação e otimização de parâmetros como temperatura da reação, pH, umidade, aeração entre outros. No primeiro teste utilizou-se apenas um reator, com aeração constante e sem a adição de inóculos aceleradores. Já no segundo teste foram utilizados dois reatores, um contendo um inóculo desenvolvido em laboratório através da bactéria *Bacillus pumilus* e outro contendo um inóculo comercial. Para a comprovação do desempenho dos equipamentos ao final do processo de compostagem, considerou-se o tempo para a compostagem total e a qualidade do adubo orgânico produzido

Palavras-chave: resíduo sólido orgânico, compostagem, bactérias, reator.

ABSTRACT

In the face of the inefficient management of Urban Solid Waste (USW) by Brazilian municipalities, a substantial volume of waste is daily disposed of in inappropriate locations, such as open dumps and controlled landfills. Among USW components, the organic fraction predominates. When improperly disposed of, solid organic waste can engender diverse disruptions, including soil and water contamination, the proliferation of disease-transmitting animals, and significant public health and environmental issues. Composting emerges as a viable solution to this challenge, a process whereby organic matter decomposition is facilitated by bacteria, fungi, and actinomycetes, resulting in solid organic compost and liquid biofertilizer, both possessing potential as bio-inputs for plant cultivation. Reducing composting duration and enhancing the quality of the final product represent central challenges in organic compound production. Composting duration is influenced by various physicochemical factors and methodological choices. Throughout the process, aerobic microorganisms degrade organic material. The introduction of accelerator inoculants into organic material degradation induces a modification in the dynamics of the composting process. Thus, manipulation of these microorganisms exerts a significant impact on material degradation and consequently reaction velocity. In this study, pilot-scale reactors were employed in two tests aimed at optimizing the composting process through the assessment and optimization of parameters such as reaction temperature, pH, moisture content, aeration, among others. The first test involved a single reactor with continuous aeration and without the addition of accelerator inoculants. Conversely, the second test utilized two reactors, one containing an inoculum developed in the laboratory using *Bacillus pumilus* bacteria and the other containing a commercial inoculum. To validate equipment performance at the conclusion of the composting process, the time required for total composting and the quality of the produced organic compost were considered.

Keywords: Organic solid waste, composting, bacteria, reactor.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS	13
2.1 Objetivo Geral	13
2.2 Objetivos Específicos	13
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
3.1 Resíduos Sólidos	14
3.1.1 Resíduos sólidos orgânicos.....	14
3.2 Material Orgânico	16
3.3 Compostagem	17
3.4 Fatores que influenciam na compostagem	17
3.5 Métodos de Compostagem	20
3.5.1 Reatores biológicos	21
3.6 Aceleradores de Compostagem	24
3.7 Qualidade e regulamentação dos adubos orgânicos	24
4.0 METODOLOGIA	26
4.1 Reator Piloto Utilizado	27
4.2 Teste 1	28
4.2.1 Acompanhamento do Reator (Teste 1).....	29
4.3 Teste 2	29
4.3.1 Alimentação dos reatores	30
4.3.2 Preparação dos inóculos	31
4.3.3 Acompanhamento dos Reatores	32
4.4 Avaliação da qualidade do adubo	33
4.4.1 Análises de Macronutrientes	33
5.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
5.1 Primeiro Teste – Reator 1	39
5.1.1 Comportamento dos parâmetros físico-químicos.....	39
5.1.2 Melhorias propostas para o processo de compostagem no reator	41
5.2 Segundo Teste – Reatores 2 e 3	41
5.2.1 Preparação dos Inóculos	41
5.2.2 Comportamento dos parâmetros físico-químicos.....	43
5.2.3 Análises de qualidade dos adubos produzidos.	46
5.2.4 Problemas enfrentados e melhorias propostas para o reator.	48

5.3 Divulgação Científica.....	51
6.0 CONCLUSÕES.....	53
6.1 Sugestões para trabalhos futuros	54
7.0 REFERÊNCIAS	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Gravimetria dos resíduos sólidos no Brasil.	15
Figura 2: Fases do processo de compostagem.....	18
Figura 3: Umidade no processo de compostagem e no produto acabado.....	19
Figura 4: Comparação entre os métodos de compostagem.	21
Figura 5: Compostagem em reator rotativo, feito com tambor de 250 L.	22
Figura 6: Compostagem em reator feito de caixa de polietileno.....	23
Figura 7: Compostagem em reator facultativo.	23
Figura 8: Fluxograma das atividades realizadas.....	26
Figura 9: Design inicial do reator.....	28
Figura 10: Reator 1 com aeração forçada.....	29
Figura 11: Matéria orgânica úmida alimentada.....	29
Figura 12: Matéria orgânica seca alimentada.....	29
Figura 13: Reatores 2 e 3 após instalação e alimentação.	30
Figura 14: Matéria orgânica utilizada na alimentação dos reatores.	31
Figura 15: Curva de calibração para o Nitrogênio.	36
Figura 16: Tabela de cores para análise de Potássio	38
Figura 17: Tabela de cores para análise de Fósforo.....	38
Figura 18: Comportamento da temperatura ao longo do tempo para o reator.....	40
Figura 19: Bactéria <i>Bacillus pumilus</i> isolada em placas para contagem de colônias.....	42
Figura 20: Inóculo <i>B. pumillus</i> diluído para aplicação no reator.	42
Figura 21: Inóculo <i>B. pumillus</i> e EMBIOTIC diluídos e prontos para aplicação no reator.....	43
Figura 22: Comportamento da temperatura ao longo do tempo para os reatores 2 e 3.	44
Figura 23: Comportamento da temperatura na compostagem em leiras.	45
Figura 24: Comportamento umidade ao longo do tempo para os reatores 2 e 3.	45
Figura 25: Comportamento do pH ao longo do tempo para os reatores 2 e 3.....	46
Figura 26: Adubos produzidos nos reatores 2 e 3.	48
Figura 27: Reator fechado com filtro de carvão.....	49
Figura 28: Vista superior do reator aberto após remoção do eixo de sustentação e aumento do comprimento das hastes de agitação.	49
Figura 29: Furo lateral para remoção de amostras a serem analisadas.....	50
Figura 30: Furo inferior para posicionamento de compressor.....	50
Figura 31: Primeiro reator do teste 3 alimentado.	51
Figura 32: Vídeos e postagens feitas no Instagram do laboratório.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros exigidos para adubos orgânicos Classe A.	25
Tabela 2: Teores de macronutrientes exigidos para adubos orgânicos Classe A.	25
Tabela 3: Dimensões e materiais utilizados para a montagem do reator.....	27
Tabela 4: Procedimento de extração realizado.	33
Tabela 5: Dados de alimentação no Reator 1.	39
Tabela 6: Dados de umidade e pH no Reator 1	40
Tabela 7: Dados de alimentação no Reator 2 e 3.	43
Tabela 8: Resultados das análises de qualidade do adubo orgânico produzido – CLASSE A	47
Tabela 9: Planejamento de alimentação dos reatores.	50

1. INTRODUÇÃO

A gestão e administração ineficiente dos resíduos sólidos urbanos (RSU) por parte dos municípios brasileiros acarreta uma grande quantidade de resíduos sendo depositados diariamente em locais inadequados, como lixões e aterros controlados. O volume de resíduos encaminhados para locais inadequados aumentou de 25 milhões de toneladas por ano em 2010 para pouco mais de 29 milhões de toneladas por ano em 2019, totalizando 40,5% do total com destinação inadequada (ABRELPE, 2020). Entre os RSU, a fração de matéria orgânica é a mais significativa, representando quase metade da massa total dos resíduos. Além dos resíduos oriundos do consumo urbano há também um volume considerável de matéria orgânica sendo descartada a partir de atividades agrícolas, lodos de esgoto e rejeitos industriais.

O descarte inadequado dos resíduos sólidos orgânicos (RSO) pode ocasionar diversos problemas, como a contaminação do solo e da água (superficial ou subterrânea), a proliferação de animais transmissores de doenças, além de sérios problemas de saúde pública e ambiental. Assim, a reciclagem desse material é imprescindível para a segurança e preservação do meio ambiente.

Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos do Brasil instituída pela Lei nº 12.305/2010 e regulamentada pelo Decreto nº 10.936/2022, a reciclagem é o processo de transformação dos resíduos sólidos que envolve a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, à fim de obter-se novos produtos ou insumos (BRASIL, 2010) (BRASIL, 2022).

Os resíduos sólidos orgânicos são transformados através de processos biológicos, podendo ser utilizados para geração de energia ou para obtenção de adubos e fertilizantes orgânicos. Um desses processos é a compostagem, onde a decomposição da matéria orgânica é realizada por bactérias, fungos e actinomicetos, que por meio da degradação aeróbica transformam a matéria orgânica em CO₂, H₂O e compostos inorgânicos. O resultado desta reação é um adubo orgânico (produto sólido estabilizado) e um biofertilizante (produto líquido), ambos com potencial para serem utilizados como bioinsumos para as plantas e condicionadores que melhoram a qualidade do solo.

A taxa de compostagem é influenciada pela disponibilidade de nutrientes, composição dos materiais utilizados, temperatura, concentração de oxigênio, umidade, pH e tamanho

de partícula (LÓPEZ-GONZÁLEZ et al., 2015). Todos esses fatores, incluindo o método de compostagem, interferem na limitação principal do processo que é o tempo gasto para se obter um composto orgânico, que pode chegar a mais de 120 dias dependendo das condições fornecidas.

Atualmente, existem várias técnicas de compostagem, desde pequenos sistemas para residências até sistemas maiores, como reatores caseiros e industriais e leiras de compostagem, que ocupam grande espaço e podem ser utilizadas para compostar grandes quantidades de resíduos, como os gerados em restaurantes industriais, condomínios residenciais, agroindústrias dentre outros.

Tendo em vista que a compostagem apresenta um ambiente favorável para o desenvolvimento de uma grande diversidade de microrganismos, a utilização destes surge como uma forma de acelerar o processo. Neste sentido, as bactérias se destacam por realizarem uma rápida colonização e apresentar uma grande biomassa (VILLAR et al. 2016) evidenciando assim sua importância na degradação da matéria orgânica.

A introdução de bactérias decompositoras na compostagem tem como objetivo acelerar a decomposição e aprimorar a qualidade do produto obtido, aumentando assim a disponibilidade de nutrientes. Ao reduzir o tempo necessário da compostagem, é possível aumentar a eficiência do processo e obter um composto de alta qualidade.

Nesse contexto, o presente trabalho propôs a otimização do desempenho de reatores piloto, instalados na Universidade Federal da Paraíba (UFPB), através da inserção do inóculo comercial Embiotic e da bactéria *Bacillus Pumilus* na massa de alimentação dos reatores, bem como do estudo detalhado do desempenho da compostagem nos equipamentos, avaliando parâmetros como temperatura da reação, pH, umidade e qualidade do adubo orgânico produzido.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Otimizar e acelerar o processo de compostagem em reatores pilotos, através do acompanhamento do desempenho dos equipamentos e da introdução de aceleradores biológicos na matéria orgânica alimentada.

2.2 Objetivos Específicos

- Monitorar o processo de compostagem através de medidas da temperatura, pH, umidade e sólidos voláteis.
- Avaliar a influência da utilização do inóculo comercial Embiotic e da bactéria *Bacillus pumilus* como aceleradores de compostagem.
- Avaliar a qualidade do adubo orgânico produzido quanto ao teor de macronutrientes (nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, e magnésio, e determinar a relação carbono/nitrogênio.
- Melhorar o processo de compostagem estudando a influência dos parâmetros: oxigenação forçada da mistura, periodicidade de agitação, tamanho do material sólido alimentado, proporção de resíduo sólido cru: resíduo sólido processado, proporção de resíduo orgânico: material seco.
- Propor melhorias na estrutura do equipamento após testes realizados;

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Resíduos Sólidos

Segundo a Lei 12305/2010 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), resíduo sólido é todo material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido (BRASIL,2020). Estes materiais podem ser classificados quanto a sua origem ou quanto a sua periculosidade. Assim, podemos elencar alguns grupos principais.

- Resíduos sólidos urbano (RSU)s: são provenientes de toda atividade urbana cotidiana, como restos de alimentos, embalagens, papel, papelão, vidro, plástico, entre outros.
- Resíduos sólidos industriais (RSI): são gerados nos processos produtivos e instalações industriais.
- Resíduos sólidos orgânicos (RSO): são todos os dejetos de origem animal ou vegetal descartada pela atividade humana, desde restos de comida, poda de jardinagem, até dejetos de animais oriundos da agroindústria.

A expansão rápida e não planejada das metrópoles brasileiras, em conjunto com o aumento demográfico e o consumo massivo de produtos industrializados e descartáveis, tem resultado em um incremento significativo na quantidade de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Estima-se que o brasileiro tenha gerado uma média de 1,04 kg de RSU por dia em 2022 (ABREMA, 2023). Considerando à população brasileira divulgada pelo Censo Demográfico de 2022, isso resulta em um valor estimado de aproximadamente 77,1 milhões de toneladas de RSU geradas – somente no ano de 2022.

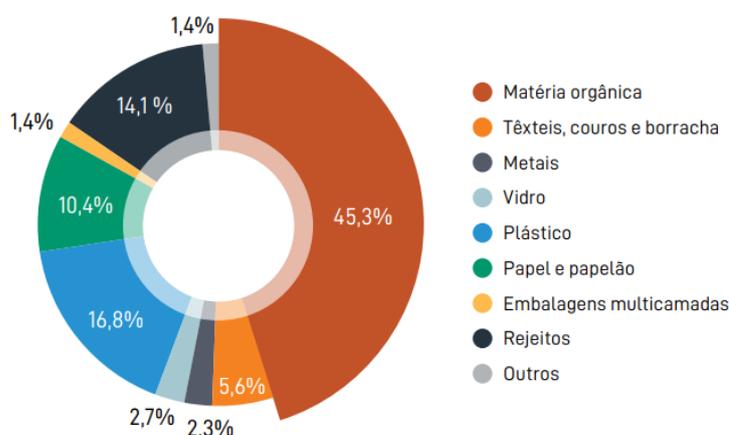
3.1.1 Resíduos sólidos orgânicos

Anualmente, o Brasil gera um volume expressivo de material orgânico. Nas zonas urbanas, a produção de material orgânico geralmente é na forma de resíduos sólidos, lodo de esgoto ou proveniente da manutenção de áreas verdes. Adicionalmente, os setores agropecuário e agroindustrial também são responsáveis pela produção de grandes quantidades de material orgânico.

Segundo o World Resources Institute Brasil (WRI), o país desperdiça 41 mil toneladas de alimentos por ano, destes, cerca de 15% ocorre em restaurantes, algo em torno de 6 mil toneladas. A proporção de desperdício global em restaurantes comerciais do tipo fast food é em torno de 9,55% e em restaurantes que oferecem serviço completo algo em torno de 11,3% de toda a comida preparada. (ABRASEL, 2018)

A fração da matéria orgânica gerada no país é a mais significativa, dentre os RSU, representando 45,3% da massa total. (ABRELPE, 2020). Assim, a figura 1 apresenta a distribuição gravimétrica dos RSU no Brasil em 2020.

Figura 1: Gravimetria dos resíduos sólidos no Brasil.



Fonte: Panorama dos resíduos sólidos no Brasil, 2020

No estado da Paraíba, do quantitativo de resíduos sólidos urbanos produzidos e coletados diariamente, em média 58% (percentagem em peso) corresponde a matéria orgânica fermentável, 28% de materiais potencialmente recicláveis e 14% de rejeitos. São produzidos diariamente algo em torno de 2.737 toneladas de resíduos sólidos urbanos. Deste total, 58% em média corresponde a matéria orgânica o equivalente a 1.532,9 toneladas por dia, que poderia ser aproveitada integralmente em processo aeróbio ou anaeróbio (LEITE et al., 2021).

Ainda segundo a ABRELPE, em 2019, o setor de resíduos respondeu por 4%¹ do total de emissões de gases de efeito estufa no Brasil, o que corresponde a 96 milhões de toneladas de CO₂ emitidas. Ao considerar o ano de 2010 como um referencial, registramos um aumento de 23% nas emissões, com dois terços destas sendo provenientes de atividades de disposição final, incluindo aterros sanitários, aterros controlados e lixões.

Conforme a análise gravimétrica exposta anteriormente, pouco mais de 36 milhões de toneladas de sobras de alimentos e resíduos de poda são predominantemente destinados à disposição final, tornando-se assim uma fonte de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). Segundo as análises das emissões brasileiras de gases de efeito estufa feito pelo SEEG (Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa) em 2020, processos como a digestão anaeróbica evitam emissões numa proporção de 2,3 kg de CH₄ por tonelada a partir da digestão anaeróbica e 3 kg de CH₄ por tonelada através da compostagem.

Apesar desses dados otimistas sobre os processos de degradação controlada da matéria orgânica, menos de 2% dos resíduos orgânicos são compostados no Brasil, o que em 2019 representou 300 mil toneladas de resíduos orgânicos reciclados. A maior parte ainda segue sendo disponibilizada para a coleta convencional e vai para aterros sanitários ou lixões (MOREIRA e PROENÇA, 2021).

3.2 Material Orgânico

Os materiais orgânicos são fontes de carbono e nutrientes para diversos organismos, resultando em sua decomposição e transformação em compostos estáveis, favorecendo o aumento da disponibilidade de nutrientes (KIEHL, 1985). Este processo é complexo devido à diversidade de compostos presentes nos materiais, que incluem tanto elementos prontamente acessíveis aos microrganismos quanto polímeros orgânicos que requerem degradação enzimática antes de serem assimilados (JURADO et al., 2015). O ritmo e a eficácia da degradação variam de acordo com as características do material, podendo ocorrer de forma rápida ou lenta.

Materiais com alto teor de carbono lábil e maior concentração de nutrientes tendem a degradar-se mais rapidamente do que aqueles ricos em compostos lignocelulósicos, devido à resistência à degradação da lignina. Compostos ligninolíticos e celulolíticos são destacados devido à sua presença comum no ambiente terrestre. A celulose é mais suscetível à decomposição do que a lignina, sendo esta última mais resistente. A proporção entre esses compostos pode influenciar significativamente a velocidade de degradação orgânica (BIANCHI, 2011; SANTOS JÚNIOR, 2018).

Compreender as características dos materiais orgânicos é crucial para determinar a melhor abordagem de manejo, visando prevenir impactos ambientais adversos. A

disposição inadequada desses materiais pode causar danos significativos ao meio ambiente. Utilizá-los como fertilizantes sem tratamento adequado não é recomendável, pois o calor gerado durante a decomposição pode prejudicar o sistema radicular das plantas, e os nutrientes essenciais podem não estar disponíveis de maneira eficaz. (BALDOTTO; BALDOTTO, 2014).

A compostagem é uma alternativa vantajosa para o tratamento dos materiais orgânicos, pois reduz o volume de resíduos e produz fertilizantes orgânicos. No entanto, o processo pode levar até 120 dias ou mais, dependendo da composição do material, e se realizado de forma inadequada, pode resultar em perdas de nutrientes e comprometer a qualidade do composto (LIAO et al., 2017).

3.3 Compostagem

A prática de compostagem remonta a tempos antigos, porém, seu estudo científico teve início a partir de 1920, impulsionado pelas pesquisas do fitopatologista britânico Albert Howard, realizado em Indore, Índia. Howard investigou uma técnica empírica empregada pelos habitantes locais para a produção de fertilizantes (CASTILHOS JUNIOR et al., 2006).

Atualmente, a maioria dos estudiosos define compostagem como um processo exotérmico de biooxidação aeróbica de um substrato orgânico heterogêneo, resultando na emissão de dióxido de carbono e água, liberação de elementos minerais e formação de matéria orgânica estável (substâncias húmicas - SH). (CASTILHOS JUNIOR et al., 2006).

O composto resultante melhora as características físicas, químicas e biológicas do solo, o que aumenta a eficiência dos adubos minerais, reduz o uso de fertilizantes químicos, prolonga a vida útil do solo, permitindo uma produção maior, por mais tempo e com melhor qualidade (OLIVEIRA; AQUINO; CASTRO NETO, 2005).

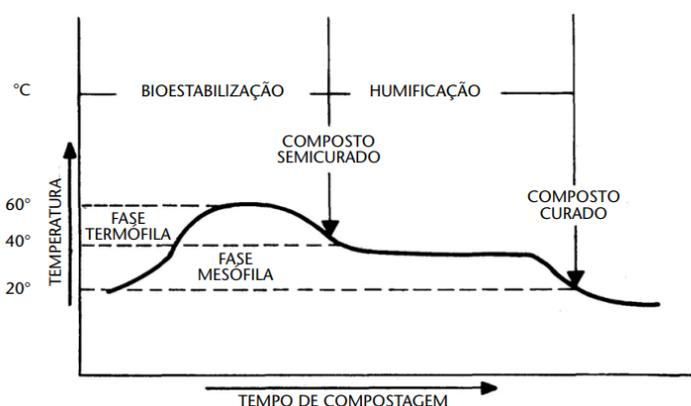
3.4 Fatores que influenciam na compostagem

A compostagem, sendo um processo biológico e aeróbico, demanda a criação de um ambiente propício para o desenvolvimento dos microrganismos em todas as etapas do processo. As comunidades microbianas são primariamente influenciadas pela relação entre carbono e nitrogênio (C/N), temperatura, pH, umidade e aeração (KIEHL, 1985),

além das características granulométricas do material compostável (LORIN, 2019). Baldotto e Baldotto (2014) destacam, no contexto da compostagem, a composição inicial dos materiais orgânicos, aeração, temperatura e umidade como os principais fatores que afetam a velocidade do processo. Estes fatores apresentam uma interdependência, ou seja, a alteração de um deles pode impactar no comportamento dos demais.

A **temperatura** influencia tanto na descontaminação do material quanto na sucessão das populações microbianas e na composição final do composto. A temperatura está correlacionada com a maioria dos parâmetros essenciais, incluindo a relação C/N, a oxigenação, o pH, a umidade, o tamanho das partículas, a porosidade e a humificação (AZIM et al., 2018). É também por meio do controle da temperatura que se determinam as diferentes fases do processo de compostagem, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2: Fases do processo de compostagem.



Fonte: KIEHL, 1985.

Na fase inicial, a temperatura deve ser mantida entre 45°C e 65°C, favorecendo a proliferação de microrganismos termofílicos. Em seguida, a temperatura diminui para cerca de 40°C, propiciando o crescimento de microrganismos mesofílicos. Conforme o processo avança, a temperatura se estabiliza em valores próximos a temperatura ambiente, levando a uma redução nas populações microbianas devido à diminuição dos substratos orgânicos disponíveis. Nessa etapa, ocorre a estabilização biológica, química e física do material orgânico, promovendo sua humificação (KIEHL, 1985; LÓPEZ-GONZÁLEZ et al., 2015).

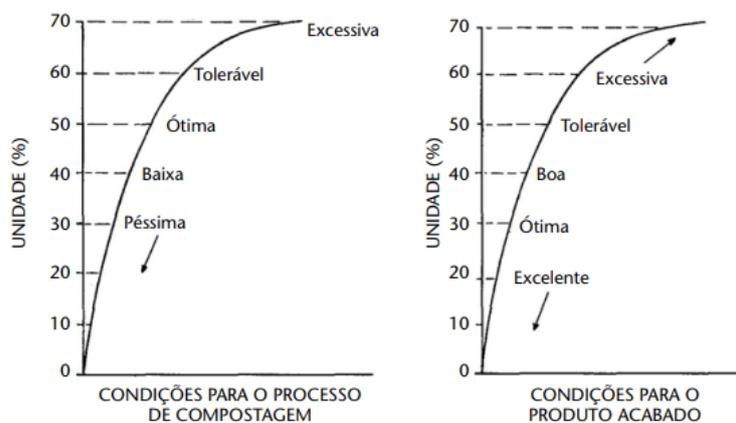
A **umidade** adequada para o processo de compostagem varia conforme os tipos de resíduos fornecidos ao processo, contudo, geralmente é recomendado que esteja entre

50% e 60% (KIEHL, 1985). Outro fator que influencia na umidade dos resíduos é a sua porosidade e seu grau de compactação.

Níveis de umidade inferiores a 30% tendem a inibir a atividade bacteriana. Por outro lado, quando o teor de umidade ultrapassa 60%, o movimento de oxigênio (O₂) é comprometido, levando o processo a tornar-se anaeróbico (DAS; KEENER, 1997; KIEHL, 2004). Nessas circunstâncias, forma-se o chorume, um líquido escuro e malcheiroso, que exsuda das pilhas de material em decomposição.

Durante a compostagem, devido a geração do calor, ocorre a evaporação da água. À medida que a porcentagem de água diminui, observa-se uma redução na taxa de decomposição. Nesses casos, é necessário adicionar umidade à massa para manter o nível adequado a atividade microbiana, como ilustrado na Figura 3 (BERNAL; ALBUQUERQUE; MORAL, 2008).

Figura 3: Umidade no processo de compostagem e no produto acabado



Fonte: KIEHL, 1985.

A **aeração** desempenha um papel crucial no controle da temperatura, na eliminação do excesso de umidade e dióxido de carbono, e na provisão de oxigênio para os processos biológicos durante a compostagem. Quando a aeração não é adequada, pode ocorrer um processo de decomposição anaeróbia, caracterizado por um odor desagradável. Esse fenômeno tende a começar nas camadas inferiores do material em compostagem, onde a falta de oxigênio é ocasionada pelo acúmulo de umidade e pela compactação devido ao peso das camadas superiores (CASTILHOS JUNIOR et al., 2006).

Na configuração das pilhas de compostagem, é essencial determinar a proporção de cada material orgânico para manter a **relação C/N** entre 25 e 30. Proporções com alto

teor de carbono podem retardar a atividade microbiana, enquanto proporções com baixo teor de carbono aceleram a decomposição, resultando em perda de nitrogênio. Conforme o processo avança, a relação C/N diminui, indicando a maturidade do composto quando atinge 20 para 1 ou menos (LÓPEZ-GONZÁLEZ et al., 2015).

O **pH** entre 6,0 e 7,5 é ideal para o crescimento bacteriano durante a compostagem, já que os microrganismos têm faixas de pH ótimas para seu desenvolvimento dentro desse intervalo. Isso torna o processo de compostagem um ambiente propício para as bactérias, com o pH variando entre 6 e 8 ao longo do processo (NADIA et al., 2015).

A **granulometria** ou tamanho de partículas, influencia significativamente a compostagem, afetando a área superficial disponível para a ação dos microrganismos. Partículas menores aceleram a decomposição, no entanto, a compactação e a anaerobiose podem interferir no processo, especialmente em materiais com granulação muito fina, reduzindo a difusão de oxigênio na pilha de compostagem. Isso favorece condições anaeróbias, resultando em compactação e aumento da densidade do substrato compostado. Estudos indicam que a porosidade ideal para a compostagem varia entre 30% e 36% (Kiehl, 2004; Fernandes e Silva, 1999).

3.5 Métodos de Compostagem

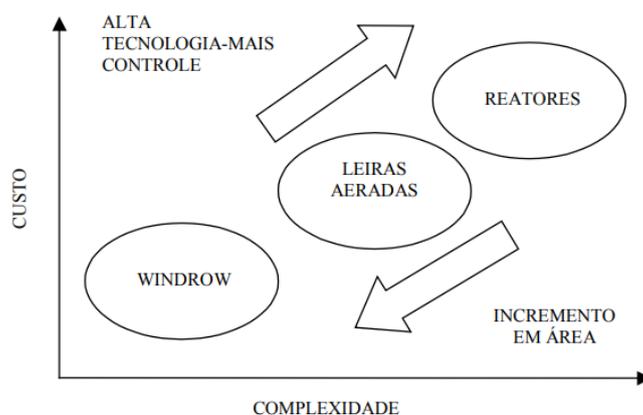
A compostagem oferece diversas abordagens, sendo crucial escolher o método mais adequado para o tipo de material orgânico compostado, garantindo a eficiência do projeto. Com os avanços tecnológicos, surgiram várias alternativas, complementando as técnicas manuais de compostagem já estabelecidas. Segundo Fernandes e Silva (1999), esses processos podem ser categorizados em três grupos distintos:

- **Sistemas de leiras revolvidas (windrow):** Nesse método, os resíduos orgânicos são dispostos em leiras e a aeração é promovida pelo revolvimento da mistura, incorporando oxigênio aos resíduos. É importante considerar a insuflação de ar sob pressão nas leiras.
- **Sistemas de leiras estáticas aeradas (static pile):** Aqui, o material a ser compostado é depositado sobre uma tubulação perfurada, responsável por facilitar a circulação de ar dentro da pilha, seja injetando-o ou aspirando-o.
- **Sistemas fechados ou reatores biológicos (In-vessel):** Esses sistemas envolvem o uso de reatores fechados, nos quais os fatores do processo de compostagem são

controlados de forma precisa. É importante notar que existem diferentes tipos de reatores, incluindo os de fluxo vertical, horizontal ou em batelada.

Os dois primeiros sistemas geralmente são realizados ao ar livre, embora existam exceções. Por outro lado, a compostagem por meio de reatores biológicos oferece uma variedade de abordagens e níveis de automação. A figura 4 apresenta uma comparação entre os métodos de compostagem.

Figura 4: Comparação entre os métodos de compostagem.



Fonte: Reis (2005)

3.5.1 Reatores biológicos

Fernandes e Silva (1999) destacam que a compostagem em reatores biológicos oferece maior controle dos parâmetros do processo, reduzindo o ciclo da fase termófila e, em alguns casos, sendo chamada de "compostagem acelerada". Devido à homogeneidade do ambiente, especialmente em relação à temperatura, essa técnica é mais eficaz no controle de patógenos e odores, pois o sistema é fechado e a aeração é controlada.

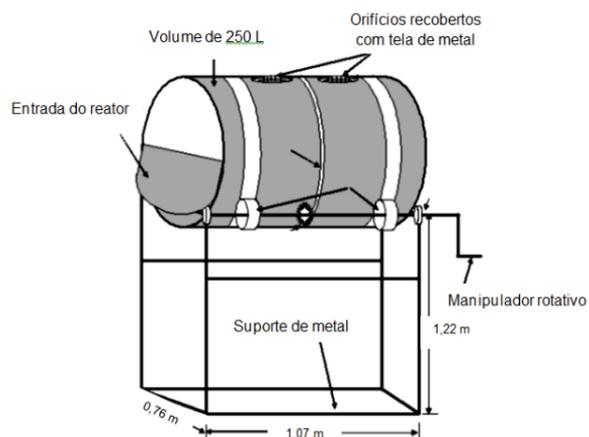
O tempo de detenção no reator varia de 7 a 20 dias, dependendo dos resíduos e do tipo de equipamento. Apesar da fase termófila mais rápida e intensa, o composto ainda requer aproximadamente 60 dias de maturação após o término dessa fase, semelhante aos sistemas tradicionais, antes de ser utilizado. Em termos gerais, os diferentes tipos de reatores comerciais podem ser agrupados em três categorias principais:

- Reatores de fluxo vertical: Estruturas similares a silos verticais, onde os resíduos são inseridos no topo e movem-se para baixo. O ar pode ser injetado em diferentes pontos ou apenas na parte inferior.

- Reatores de fluxo horizontal: Cilíndricos e dispostos horizontalmente, também conhecidos como túneis. Os resíduos entram por uma extremidade e saem pela outra, permanecendo tempo suficiente para a fase termófila. Algumas variantes incluem túneis fechados onde o ar é injetado sob pressão.
- Reatores de batelada: O composto permanece no mesmo local, sem movimento. Geralmente, esses reatores têm um sistema para agitar os resíduos, como rotação lenta ou mistura interna, para evitar a formação de caminhos preferenciais para o ar. Alguns reatores não possuem esse sistema de agitação.

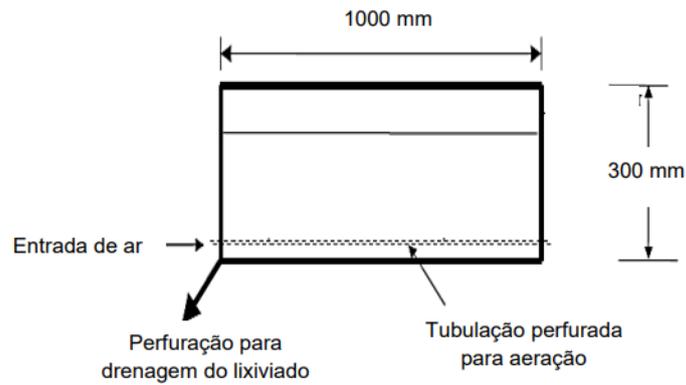
Devido ao alto custo dos reatores comerciais, existem estudos sobre a eficiência de reatores pilotos feitos de forma mais robusta e artesanal, a figura 5 e a figura 6 apresentam alguns exemplos desses sistemas.

Figura 5: Compostagem em reator rotativo, feito com tambor de 250 L.



Fonte: Adaptado de Kalamdhad e Kazm (2009).

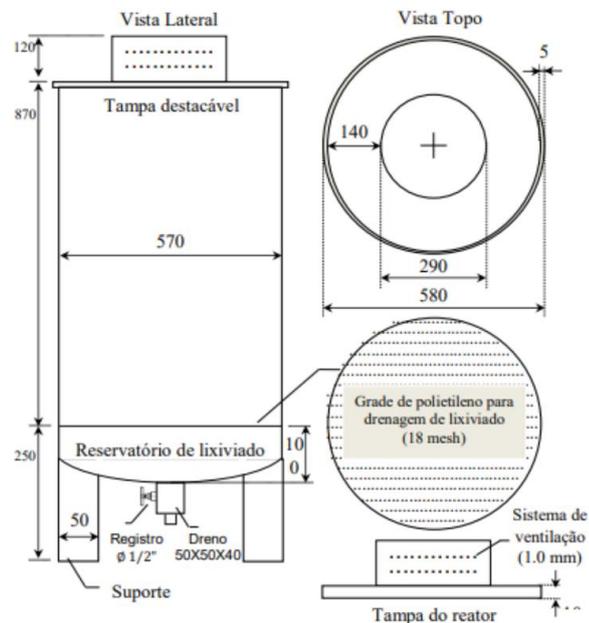
Figura 6: Compostagem em reator feito de caixa de polietileno.



Fonte: Adaptado de Adhikari et al. (2009)

Além dos reatores que operam de forma aeróbia, existem estudos com reatores facultativos, ou seja, apresentam regiões inferiores anaeróbias e regiões superiores aeróbias, devido à formação de camadas de resíduos. A figura 7 ilustra um exemplo desse sistema.

Figura 7: Compostagem em reator facultativo.



Fonte: Adaptado de ZITTEL, 2014.

3.6 Aceleradores de Compostagem

A compostagem é uma das formas mais eficazes de tratar resíduos orgânicos, mas sua principal desvantagem é o tempo que o processo convencional leva. Para contornar esse problema, têm sido desenvolvidos métodos para acelerar a compostagem, tanto em leiras quanto em reatores. Estes métodos envolvem desde mudanças físicas no processo como aeração mecânica e trituradores, até a adição de co-substratos (RESSETTI e CAMPOS, 2020).

Vários estudos têm investigado o uso de co-substratos para melhorar a qualidade do produto final ou reduzir o tempo necessário para a compostagem. Geralmente, a literatura sugere a adição de materiais ou microrganismos para complementar as características do material a ser compostado.

Dentre esses microrganismos as bactérias destacando-se por colonizarem rapidamente o ambiente. Na compostagem, desempenham um papel crucial na degradação inicial do material, especialmente em condições termofílicas, onde são responsáveis pela decomposição de carboidratos, proteínas primárias e açúcares (VILELA, 2019).

Segundo López-González et al., 2014, as bactérias do grupo *Bacillus spp.* são o principal grupo frequentemente isolado de diferentes massas de compostos. Isso acontece devido à sua capacidade única de formar esporos resistentes, o que lhes permite sobreviver em condições ambientais adversas que seriam letais para outros organismos. Essa habilidade de formar esporos confere uma vantagem adaptativa ao *Bacillus*. Além disso, muitas cepas de *Bacillus* encontradas na compostagem têm a capacidade de produzir uma variedade de compostos úteis, como enzimas hidrolíticas, biossurfactantes, antibióticos e promotores de crescimento de plantas.

3.7 Qualidade e regulamentação dos adubos orgânicos

O processo de compostagem fornece um adubo orgânico estável que deve estar em conformidade com as normas vigentes. No Brasil esses critérios são estabelecidos pela Instrução Normativa nº 61, de 08 de julho de 2020 pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2020), que estabelece as regras sobre definições, exigências, especificações, garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos fertilizantes orgânicos e dos biofertilizantes, destinados à agricultura.

Segundo a norma, os fertilizantes orgânicos são classificados em duas categorias com base nas matérias-primas utilizadas em sua produção:

- Classe "A": utiliza matéria-prima proveniente de atividades extrativas, agropecuárias, industriais e agroindustriais autorizadas pelo Órgão Ambiental. Pode conter resíduos de frutas, legumes, verduras e alimentos segregados na fonte geradora e recolhidos por coleta diferenciada, desde que isentos de despejos ou contaminantes sanitários.
- Classe "B": utiliza matéria-prima orgânica proveniente de atividades urbanas, industriais e agroindustriais, incluindo a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos da coleta convencional, lodos gerados em estações de tratamento de esgotos e lodos industriais e agroindustriais provenientes de sistemas de tratamento de águas residuárias, contendo qualquer quantidade de despejos ou contaminantes sanitários, desde que autorizados pelo Órgão Ambiental.

O adubo produzido no presente trabalho se enquadra na Classe A. Para esta classe, os parâmetros de qualidade exigidos encontram-se nas tabelas 1 e 2.

Tabela 1: Parâmetros exigidos para adubos orgânicos Classe A.

Umidade	Carbono orgânico	C/N
50% (max)	15% (mín)	20 (máx)

Fonte: Adaptado de (BRASIL, 2020)

Tabela 2: Teores de macronutrientes exigidos para adubos orgânicos Classe A.

	Cálcio	Magnésio	Nitrogênio	Fósforo	Potássio
Mínimo Exigido (%)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

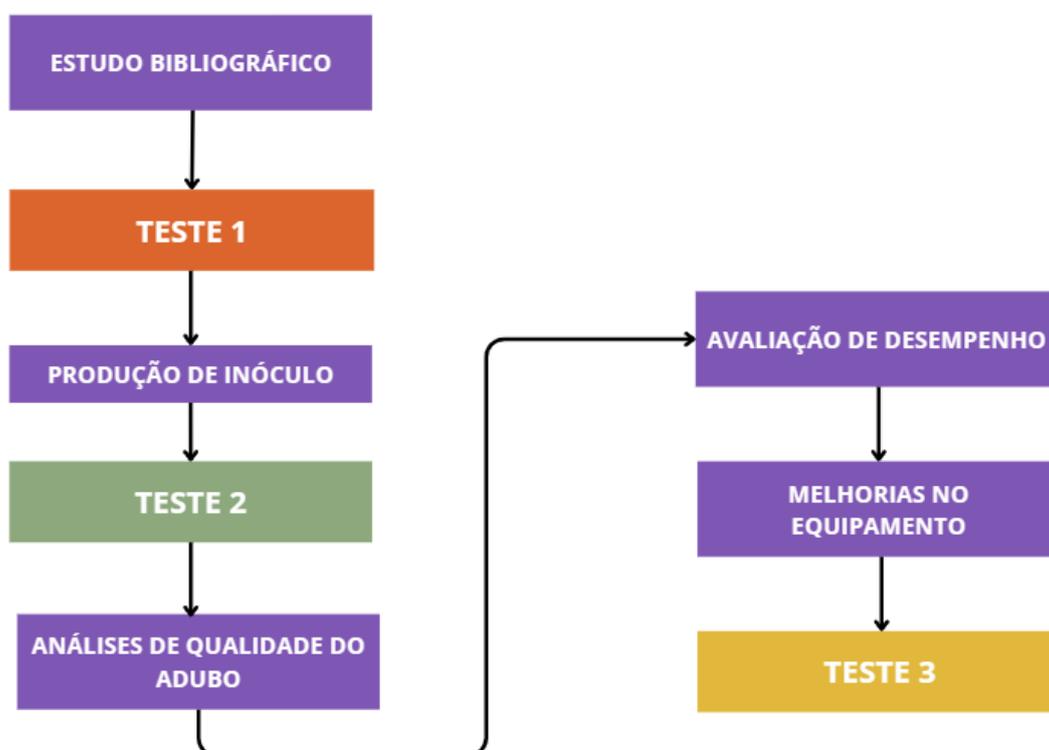
Fonte: Adaptado de (BRASIL, 2020)

4.0 METODOLOGIA

Este estudo foi realizado por meio de uma parceria entre a Universidade Federal da Paraíba (UFPB) e a Universidade Federal do Amazonas (UFAM), através da rede INCT Midas, que disponibilizou dois reatores piloto, desenvolvidos pelo Prof. Dr. Raimundo Kennedy Vieira. Os dois reatores, com as mesmas características e dimensões, foram operados no Laboratório de Reatores Químicos, localizado no Centro de Tecnologia da UFPB. O resíduo sólido orgânico, utilizado nos dois experimentos, foi coletado no Restaurante Universitário da UFPB, a matéria seca foi coletada de restos de podas e na serraria também da UFPB.

A seguir têm-se o fluxograma das atividades realizadas, no total, foram realizados dois testes nos reatores piloto, sendo o teste 1, sem a adição de inóculo e o teste 2, adicionando diferentes tipos de inóculo. Os dados experimentais de cada teste estão descritos abaixo.

Figura 8: Fluxograma das atividades realizadas.



Fonte: A autora.

4.1 Reator Piloto Utilizado

O reator utilizado nos experimentos é considerado um reator em batelada, em que o material orgânico a ser compostado é alimentado no início do processo e permanece por um tempo suficiente para que a reação se complete. O mesmo opera com agitação mecânica manual - por meio de manivela, e, se necessário, aeração forçada - pela introdução de ar por meio de compressores instalados na parte externa do reator.

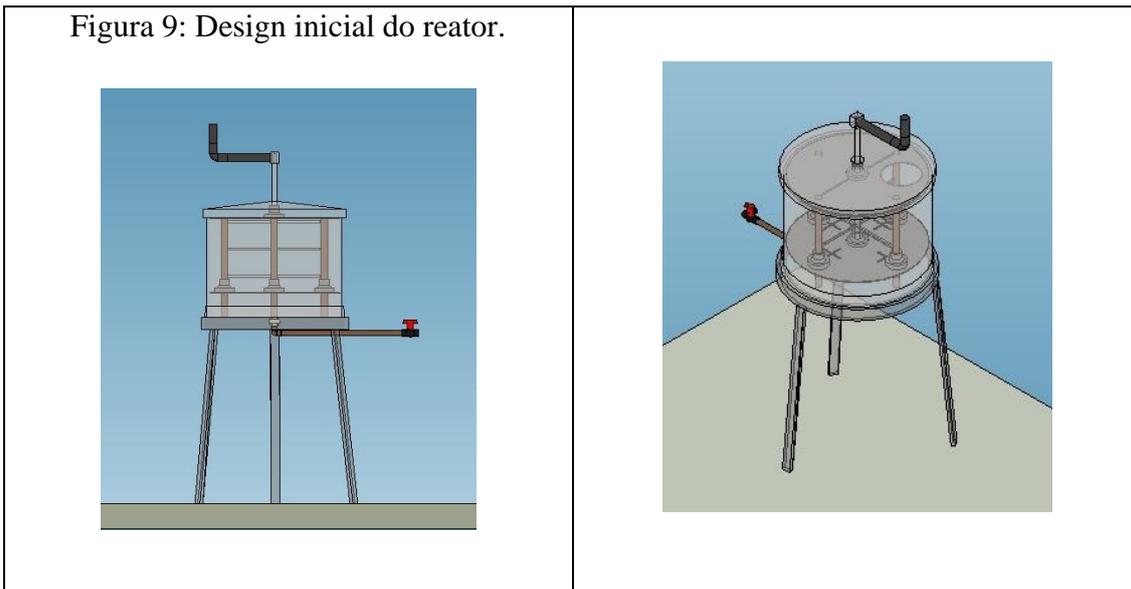
O volume útil do reator é de 50 L. A tabela 3 apresenta as dimensões e materiais utilizados na construção do equipamento, estes dados foram fornecidos diretamente pelo Prof. Dr. Raimundo Kennedy Vieira. Na Figura 9 temos o design inicial do equipamento projetado.

Tabela 3: Dimensões e materiais utilizados para a montagem do reator.

Componentes biodecompositor			
	Componente	Medida	Quantidade
Cilindro e tampa	manta	(54 cm x 51 cm)	1
	resina		
Divisórias de 52 cm	1	flange pvc 25 mm	5
		tubo pvc soldavel - 32 cm	4
	2	flangePVC	5
		tubo pvc 12 cm	4
Batedor em ferro	Hastes batedor com torneira 20 x 20	(37 cm x 6 cm)	1
	Batedor	54 cm	1
Base em aço	Base	58 cm	1
	Pés	77 cm	3
Saída xorume	Joelho	3/4"	1
	Flange	3/4"	1
	Tubo PVC	32 cm	1
	Registro tipo esfera inox	3/4"	1

Fonte: VIEIRA, R. K, 2023

Figura 9: Design inicial do reator.



Fonte: VIEIRA, R. K, 2023

4.2 Teste 1

O primeiro teste foi realizado em apenas um reator, com a introdução forçada de ar, por meio de compressores, e agitação mecânica manual e diária. Neste teste os reatores foram operados abertos (sem a tampa), a fim aumentar a aeração do meio bem como viabilizar a coleta das amostras (durante a reação), para monitoramento dos parâmetros de processo (temperatura, umidade e pH). No lugar da tampa foi instalada uma tela de proteção, de TNT (Tecido Não Tecido), que é um falso tecido composto por fibras sintéticas ou naturais, unidas por aglutinação térmica ou química.

Para a alimentação do reator com a matéria seca, foram utilizadas folhas secas e serragem na proporção de 1:1 em volume. Esse material foi misturado com os restos de alimentos crus (matéria úmida), oriundos da preparação das saladas no RU. Esse alimento era composto basicamente por folhas de alface e acelga.

A composição final da massa para a compostagem, no teste 1, foi de 2:1 de matéria úmida para matéria seca. A Figura 12 mostra o reator em operação, e as Figuras 13 e 14, mostram a matéria úmida e matéria seca, respectivamente, antes da mistura.

Figura 10: Reator 1 com aeração forçada.



Fonte: A autora.

Figura 11: Matéria orgânica úmida alimentada.



Fonte: A autora.

Figura 12: Matéria orgânica seca alimentada.



Fonte: A autora.

Antes de adicionar o material no equipamento, o mesmo passou pela etapa de separação e medição de volume utilizando balde graduado de 10L. Todo o material adicionado foi pesado através de uma balança digital de gancho. Antes de ser adicionado no reator, toda a matéria (úmida e seca) foi homogeneizada formando uma única massa uniforme.

4.2.1 Acompanhamento do Reator (Teste 1)

Após a alimentação, o reator foi monitorado durante 26 dias, com medidas diárias da temperatura e semanais de umidade e pH. A temperatura foi aferida utilizando um termômetro espeto, o qual foi introduzido em três pontos, igualmente dispersos dentro do reator e, ao final, a temperatura foi dada pela média desses três pontos.

Para a determinação do pH e da umidade, a metodologia foi baseada no Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes (Embrapa, 2009).

Para medir o pH, foram pesados 3g da amostra em béqueres e adicionados 30 ml de água destilada. Após agitar a solução com um bastão de vidro por cinco minutos, ela foi deixada em repouso sobre a bancada por 15 minutos. Em seguida, o pH foi medido com um pHmetro digital.

Para determinar a umidade, cerca de 2g da massa compostada foram pesados e colocados em um recipiente de peso conhecido, obtendo-se assim o peso úmido. Após 12 horas em estufa a 60-65°C, a amostra foi pesada novamente (peso seco) para calcular a umidade usando a seguinte equação:

$$\% \text{ Umidade} = \frac{(\text{Peso úmido} - \text{Peso seco})}{\text{Peso úmido}} \times 100$$

4.3 Teste 2

O segundo teste foi realizado em dois reatores, operando ao mesmo tempo, um contendo o inóculo comercial Embiotic, e outro contendo um inóculo da bactéria *Bacillus pumilus*, que foi isolada no Laboratório de Bioengenharia localizado no Centro de Tecnologia da UFPB. Os dois reatores foram agitados semanalmente, através da manivela, e, neste caso, não tiveram a introdução forçada de ar por meio de compressores.

Figura 13: Reatores 2 e 3 após instalação e alimentação.



Fonte: A autora.

4.3.1 Alimentação dos reatores

Para alimentar os reatores, foram combinadas folhas secas e serragem na proporção 1:1 como matéria seca. Já a matéria úmida consistiu de restos de alimentos cozidos, coletados das bandejas do RU, mais os resíduos crus oriundos do preparo dos alimentos. Esse material foi adicionado ao reator na proporção de 3:1 (cru : cozido) formando uma massa única de matéria úmida.

A matéria orgânica cozida precisou de uma separação mais atenta pois continha muitos pedaços de ossos e carne, que foram separados e retirados do sistema de compostagem, pois seriam de difícil degradação, podendo prejudicar o processo. Assim, a composição final do equipamento foi de 1:1,5 de matéria úmida para matéria seca.

Antes de adicionar o material no equipamento, o mesmo passou pela etapa de medição de volume utilizando baldes graduados de 10L. Todo material adicionado foi pesado através de uma balança digital de gancho. A Figuras 14 mostra o material utilizado para a alimentação dos reatores.

Figura 14: Matéria orgânica utilizada na alimentação dos reatores.



Material cozido



Material cru



Material orgânico
alimentado nos reatores

Fonte: A autora.

4.3.2 Preparação dos inóculos

- **Inóculo comercial (Embiotic)**

O inóculo comercial utilizado foi o Embiotic, produzido pela empresa Korin - Agricultura e Meio Ambiente. Segundo o fabricante, o produto é composto por *Lactobacilos plantarum* 10^4 UFC/mL, *Saccharomyces cerevisiae* 10^3 UFC/mL, melão de cana de açúcar e água.

O produto é apresentado na fase líquida e é indicado para a otimização da compostagem dos resíduos provenientes de produção animal; usinas sucroalcooleiras; usinas de compostagem; agroindústrias e restaurantes, podendo também ser utilizado em compostagem doméstica.

Para a utilização do inóculo, o fabricante sugere uma dosagem de 5 mL por kg de matéria orgânica adicionada. Assim, como foi pesado aproximadamente 9kg de resíduo, foram utilizados 45mL do inóculo comercial Embiotic, no reator 2

- **Inóculo BP (*Bacillus pumilus*)**

O inóculo foi produzido no Laboratório de Bioengenharia (LABIO) localizado no Centro de tecnologia da UFPB, coordenado pela professora Dr. Sharline Florentino.

Inicialmente foi feito o repique da bactéria de um meio sólido (placa) já existente no laboratório para um meio líquido. O meio líquido foi preparado em triplicata solubilizando 2,6 g de caldo nutriente em 200 mL de água destilada. Em seguida, esse meio foi esterilizado a 121 °C em autoclave, juntamente com os materiais necessários para o repique. Após isso, passou-se a bactéria já inoculada em placa para o meio líquido utilizando uma alça de platina. O meio ficou 48 horas em incubadora sob agitação de 120rpm e temperatura controlada de 30 °C.

Com o meio líquido pronto, foi feita a contagem em placas, para obter-se a concentração do inóculo em UFC/mL. Esta contagem foi realizada utilizando o inóculo líquido produzido, onde executou-se uma diluição seriada de 10^{-4} , 10^{-5} e 10^{-6} para melhor visualização e contagem das placas. As placas foram mantidas em incubadora com temperatura controlada de 30 °C durante 48 horas.

Após o processo de contagem obteve-se uma concentração de $4,6 \times 10^8$. Assim, o mesmo foi diluído até a concentração de $4,6 \times 10^5$ para que apresentasse uma concentração próxima a do inóculo comercial.

4.3.3 Acompanhamento dos Reatores

Após a alimentação, os reatores foram acompanhados durante 60 dias com análises diárias da temperatura, e semanais da umidade, pH e sólidos voláteis.

As análises de temperatura, umidade e pH foram realizadas de forma análoga ao primeiro teste como descrito no tópico 4.2.1.

Para a determinação dos sólidos voláteis, a metodologia foi baseada no Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes (Embrapa, 2009). Para isto, uma amostra de 2g do composto foi seca em estufa à 105 °C e calcinada em múfla à 550 °C, o peso do material nessas duas temperaturas foi aferido e obteve-se a porcentagem de sólidos voláteis através do seguinte cálculo.

$$\% \text{ Sol. Voláteis} = \frac{(\text{Peso à } 105^\circ - \text{Peso à } 550^\circ)}{\text{Peso à } 105^\circ} \times 100$$

4.4 Avaliação da qualidade do adubo

Para avaliar a qualidade do adubo sólido produzido pela compostagem foram analisados os macronutrientes presentes através do kit de análises de solo da empresa Alfakit. Os macronutrientes analisados foram carbono, nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio. Além disso, ao final do processo foi determinada a relação carbono/nitrogênio, como estabelece a Instrução Normativa nº 61, de 08 de julho de 2020 pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2020).

4.4.1 Análises de Macronutrientes

Para a realização das análises inicialmente as amostras passaram pelo processo de secagem (estufa à 40 °C por 2 horas), moagem e peneiramento (até diâmetro de partículas menor do que 0,5 mm).

Os macronutrientes: nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio, foram analisados em fase líquida; obtida pela extração dos mesmos, a partir do adubo com uma solução extratora específica para cada componente, como mostra a tabela abaixo.

Tabela 4: Procedimento de extração realizado.

Solução Extratora	Processo de extração	Parâmetros/Análise
02 Composta por KCl (cloreto de potássio) 1 M	Pesar 2 gramas de amostra, adicionar 70 mL de água, 30 mL da Solução Extratora 02 , agitar e deixar o material em repouso por 12 horas. Filtrar o sobrenadante e utilizar o mesmo para as análises	Cálcio Magnésio Nitrogênio Total Mineral
03 Composta por uma	Pesar 2 gramas de amostra, adicionar 50 mL da Solução Extratora 03 , agitar e deixar o material em repouso por 12.	Fósforo

“dupla ácida”, que possui HCl 0,05 M e H ₂ SO ₄ 0,0125 M	Filtrar o sobrenadante e utilizar o mesmo para as análises.	Potássio
--	---	----------

As metodologias de análises foram feitas utilizando adaptações dos manuais e kits da empresa Alfakit, bem como o Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes (EMBRAPA,2009).

Determinação de Carbono Orgânico (CO) Total

Para quantificar a matéria orgânica presente no adubo, o método utilizado foi o da oxidação com dicromato de potássio em meio ácido. Para a análise, pesou-se 2 gramas do adubo seco e peneirado, transferiu-se para um erlenmeyer de 250 mL, adicionou-se 50 mL de K₂Cr₂O₇ 0,2 mol L⁻¹ e 50 mL de H₂SO₄ concentrado. Essa mistura foi mantida em ebulição por 30 minutos. Após o resfriamento, transferiu-se a amostra líquida para um balão volumétrico de 100 mL, completando o volume para tal. Conduziu-se também uma prova em branco, ou seja, 50 mL de K₂Cr₂O₇ 0,2 mol L⁻¹ e 50 mL de H₂SO₄ concentrado, omitindo a adição da amostra sólida.

Em seguida transferiu-se uma alíquota de 10 mL do sobrenadante para um erlenmeyer de 250 mL, adicionou-se 10 mL de H₃PO₄ (1 + 3 v/v), 1 mL de difenilaminasulfonado de bário e agitou-se.

Por fim, titulou-se o excesso de oxidante com solução de sulfato ferroso amoniacal 0,1 mol L⁻¹ até o ponto de viragem, quando a coloração da solução azul se torna verde, sendo calculada por meio desta titulação.

Durante este processo, o carbono orgânico presente no adubo é oxidado a CO₂, enquanto os íons de cromo são reduzidos, de Cr⁶⁺ para Cr³⁺. O excesso de dicromato de potássio adicionado no sistema para a reação de oxidação é titulado com sulfato ferroso amoniacal. A quantidade de íons Cr⁶⁺ que foi reduzida, é diretamente proporcional a quantidade de matéria orgânica oxidada, e, portanto, presente no adubo. As reações químicas que descrevem este método são descritas abaixo.





A quantidade de carbono orgânico é calculada pela diferença entre a quantidade de Fe^{2+} consumida na titulação da prova em branco (reação com todo dicromato inicialmente adicionado) e aquela utilizada na titulação do dicromato remanescente após a oxidação do carbono presente na amostra.

Para os cálculos consideraram-se que cada mol de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ consumido reagiram com 1,5 mol de carbono orgânico, assim o teor de CO na amostra foi determinado da seguinte maneira:

$$CO = \left(\frac{(V_{\text{branco}} - V_{\text{amoniacal}}) \times C_{\text{Fe}^{2+}} \times 1,5 \times M_{\text{Carbono}} \times 25}{6 \times m_{\text{adubo}}} \right) \times 100$$

Sendo:

V_{Branco} → Volume gasto do sulfato ferroso amoniacal na prova em branco;

$V_{\text{Amoniacal}}$ → Volume gasto do sulfato ferroso amoniacal na titulação da amostra;

$C_{\text{Fe}^{2+}}$ → concentração da solução de Fe^{2+} ;

m_{adubo} → massa pesada do adubo/fertilizante;

25 → fator de diluição (250/10);

M_{carbono} → massa molar do carbono.

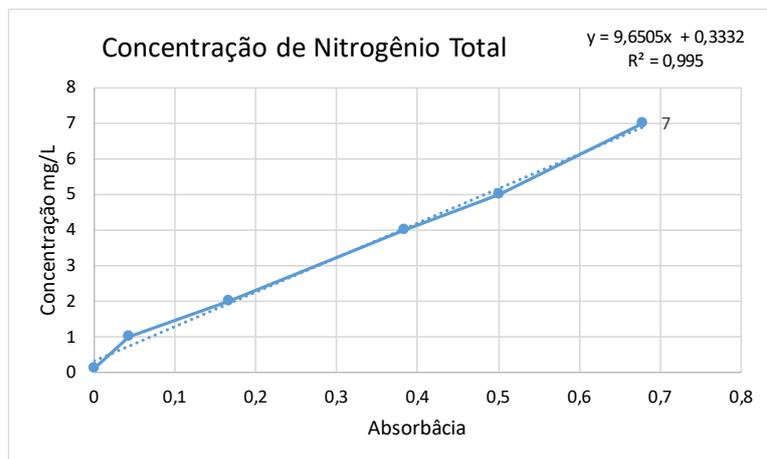
- **Determinação de Nitrogênio Total**

Para a determinação do nitrogênio total, a amostra foi digerida oxidando todos os elementos nitrogenados a nitrato através da solução extratora 02, para isso mediu-se 1 mL de amostra com a seringa e transferiu-se para um tubo de vidro com tampa rosqueável. Em seguida, adicionou-se uma medida rasa do Reagente 1 de Nitrato, fechou-se o tubo e agitou-se até dissolver parcialmente e colocou-se 2 gotas do Reagente 2 de Nitrato.

Por fim, adicionou-se 4 mL do Reagente 2 de Nitrato, homogeneizou-se a amostra e colocou-a em repouso por 10 minutos para leitura de absorvância no espectrofotômetro.

Para os cálculos de concentração utilizou-se uma curva de calibração pré definida pelos alunos do laboratório LACQUA da UFPB. Essa curva foi construída dentro do comprimento de onda recomendado no kit de análise de nitrogênio do Alfakit que foi de 415 nm.

Figura 15: Curva de calibração para o Nitrogênio.



Fonte: LACQUA, 2023.

Para a determinação da relação carbono nitrogênio, fez-se apenas a divisão do percentual de carbono orgânico nas amostras pelo percentual de nitrogênio total.

- **Determinação de Cálcio e Magnésio**

Inicialmente determinou-se a dureza total (Ca + Mg), transferindo-se 25 mL da solução, após extração, para um erlenmeyer e adicionou-se 2 mL de Inibidor de Interferentes Solo. Após isso, foi adicionado 1 mL da Solução Tampão e colocado duas medidas de Negro ET. Essa solução foi titulada com EDTA até mudança de coloração vinho/rosa para azul puro.

Para o cálculo utilizou-se o volume gasto de EDTA e fez-se as seguintes correlações:

$$C_{CaCO_3} = V_{EDTA} \times C_{EDTA} \times M_{CaCO_3} \times \frac{1}{V_{amostra}} \times \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}}$$

↓

$$C_{CaCO_3}(\%) = \left(\frac{C_{CaCO_3}}{m_{adubo}} \times V_{solução} \times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}} \times \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} \right) \times 100$$

Sendo:

C_{CaCO_3} → Concentração do $CaCO_3$ na amostra;

V_{EDTA} → Volume gasto do EDTA;

C_{EDTA} → Concentração do EDTA;

M_{CaCO_3} → Massa Molar do carbonato de cálcio;

$V_{amostra}$ → Volume da amostra (25 mL);

$V_{solução}$ → Volume da solução (100 mL);

m_{adubo} → massa pesada do adubo/fertilizante.

Após a determinação da dureza total, seguiu-se para a determinação da quantidade de magnésio, assim 25 mL do material filtrado foi transferido para um erlenmeyer de 125 mL e adicionou-se 2 mL de Inibidor de Interferentes Solo. Após isso, foram adicionados 1 mL de NaOH 1,0 M e duas medidas de Murexida. Essa solução foi titulada com EDTA até mudança de coloração de vinho para azul puro.

Para o cálculo utilizou-se o volume gasto de EDTA e fez-se as seguintes correlações para encontrar o percentual de magnésio na amostra:

$$C_{CaCO_3} = V_{EDTA} \times C_{EDTA} \times M_{CaCO_3} \times \frac{1}{V_{amostra}} \times \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} \rightarrow \frac{\text{mg } CaCO_3}{L}$$

↓

$$C_{Mg} = \frac{\text{mg } CaCO_3}{L} \times \text{Fator}_{Diluição} \times V_{solução} \times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}}$$

↓

$$\left(\frac{m_{CaCO_3} \times \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} \times \frac{1}{M_{CaCO_3}} \times M_{Mg}}{m_{adubo}} \right) \times 100$$

Sendo:

V_{EDTA} → Volume gasto do EDTA;

C_{EDTA} → Concentração do EDTA;

M_{CaCO_3} → Massa Molar do carbonato de cálcio;

$V_{amostra}$ → Volume da amostra (25 mL);

C_{CaCO_3} → Concentração, determinada, do carbonato de cálcio na amostra;

$Fator_{Diluição}$ → Relação da diluição feita (100/25);

m_{adubo} → massa pesada do adubo/fertilizante;

$V_{solução}$ → Volume da solução (100 mL);

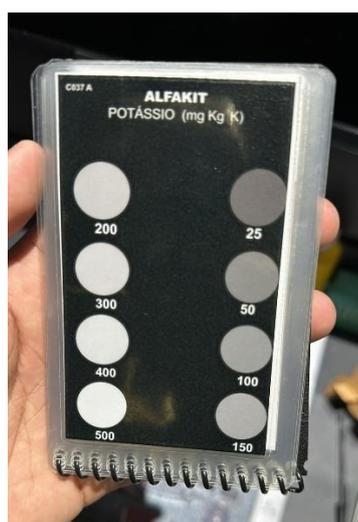
M_{Mg} → Massa Molar de magnésio.

De posse da dureza total e do percentual de magnésio, fez-se uma subtração para encontrar o percentual de cálcio nas amostras.

- **Determinação de Fosfato e Potássio**

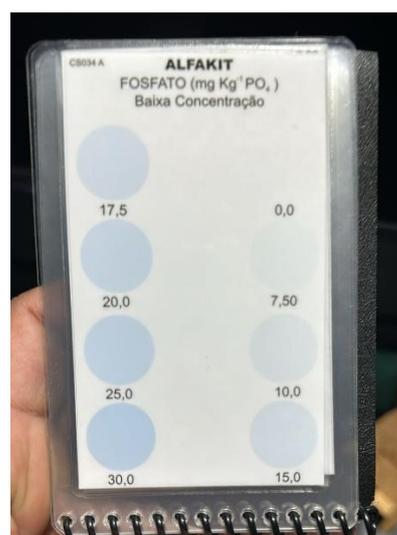
Para a obtenção desses parâmetros utilizou-se o método colorimétrico, onde através de reagentes próprios dos kits realizou-se a observação das cores e através delas obteve-se os valores para o fosfato e o potássio em mg/Kg.

Figura 16: Tabela de cores para análise de Potássio



Fonte: A autora.

Figura 17: Tabela de cores para análise de Fosfato.



Fonte: A autora.

5.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Primeiro Teste – Reator 1

5.1.1 Comportamento dos parâmetros físico-químicos.

Com relação a alimentação do reator, na tabela 4 encontram-se as quantidades em massa e volume do material adicionado.

Tabela 5: Dados de alimentação no Reator 1.

	Massa Inicial	Volume Inicial
Serragem	3,27	15L
Folhas Secas	0,28	15L
Matéria Húmida	4,49	15L

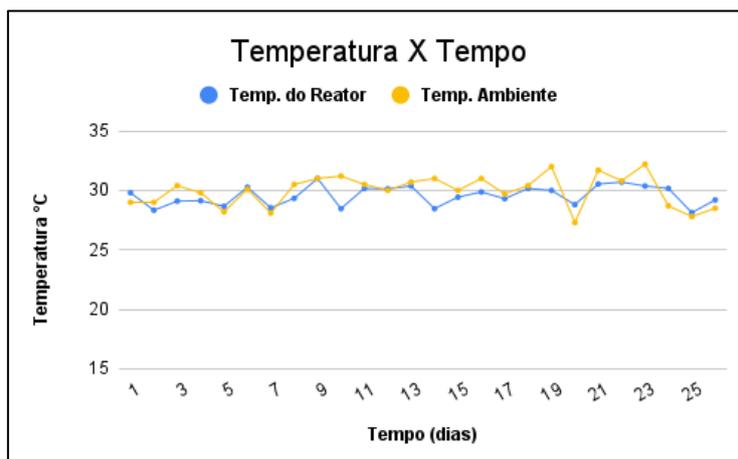
Fonte: A autora.

A proporção de matéria úmida para seca foi de 1:2 em volume, porém observou-se que essa relação proporcionou um ambiente de baixa umidade, o que desfavoreceu o crescimento das bactérias degradadoras.

A aeração desse reator foi feita de forma contínua, 24 horas por dia, através do compressor, além disso, o sistema foi agitado uma vez por dia.

A figura 17 apresenta o gráfico contendo a variação da temperatura ao longo do tempo no reator, em comparação com a temperatura ambiente. Observa-se que a fase termofílica da compostagem não ocorreu, pois a temperatura manteve-se constante atingindo no máximo 32°C, em 25 dias de monitoramento. Isso ocorreu, provavelmente, em razão da demasiada aeração e agitação do sistema, o que favoreceu a redução de umidade, diminuindo assim o metabolismo dos microrganismos ou inativando. Além disso, a matéria orgânica alimentada neste processo, folhas secas+serragem+folhas cruas de alface e repolho, é composta predominantemente por vegetais que são ricos em celulose, hemicelulose e lignina (serragem). Estes materiais são de difícil degradação e necessitam preferencialmente de microrganismos degradadores de celulose, para se decomporem.

Figura 18: Comportamento da temperatura ao longo do tempo para o reator.



Fonte: A autora.

Na tabela 6 a seguir, encontram-se os valores de umidade e pH obtidos no processo durante as quatro semanas de reação.

Tabela 6: Dados de umidade e pH no Reator 1

Reator 1		
Semana	Umidade	pH
1	20,70	6,01
2	59,17	7,09
3	44,3	6,32
4	60,08	6,5

Fonte: A autora.

No que diz respeito à umidade, observou-se um valor muito baixo durante a primeira semana do processo. Esse fato pode ser atribuído à quantidade de matéria seca alimentada no processo, em relação a massa total - 3,55 kg/8,04 kg, com uma elevada quantidade de serragem (3,27 kg). Além disso, a escassez de variedade na matéria orgânica úmida, prejudicou o processo, uma vez que o material alimentado consistia principalmente de folhas (alfaca e acelga). De acordo com as análises de Bianchi (2011) e Santos Júnior (2018), comparativamente, a celulose é mais facilmente decomposta do que a lignina, que possui maior resistência. Como as folhas são abundantemente compostas por lignocelulose, o material destinado a compostagem demonstrou uma maior resistência à decomposição da lignina.

Após a primeira semana, constatada a baixa umidade, foi feita a correção da mesma através da adição de água ao reator, obtendo-se assim umidades mais favoráveis ao processo.

O pH se manteve dentro do esperado para o processo, pois segundo Nadia et al., 2015 a faixa ideal é entre 6 e 8, para favorecer o crescimento microbiano.

Assim, tendo em vista que a maioria dos parâmetros principais não foram atendidos, conclui-se que a degradação da matéria orgânica não ocorreu e o processo foi encerrado após esse tempo.

5.1.2 Melhorias propostas para o processo de compostagem no reator

Após o primeiro teste, muitos conhecimentos e melhorias para o processo foram percebidos, assim um novo planejamento foi feito propondo as seguintes melhorias:

- Remoção dos compressores e diminuição da frequência de agitação para uma vez na semana;
- Alimentação com matéria orgânica variada (frutas, legumes, folhas e alimentos cozidos);
- Adição de inóculos aceleradores de compostagem;
- Diminuição da proporção de matéria úmida e seca de 1:2 para 1:1,5.
-

5.2 Segundo Teste – reatores 2 e 3

5.2.1 Preparação dos Inóculos

Após a diluição seriada e incubação do inóculo *B. pumillus*, observou-se um crescimento favorável tanto no meio líquido quanto no meio sólido. Através da incubação do inóculo em placas para determinar a concentração em UFC/mL, verificou-se que a placa de melhor leitura foi a de diluição 10^{-6} . Posteriormente, após a contagem das unidades formadoras de colônia na placa, foi obtida uma concentração de $4,6 \times 10^8$ para o inóculo produzido. A figura 19 mostra as placas incubadas após um período de 48 horas.

Figura 19: Bactéria *Bacillus pumilus* isolada em placas para contagem de colônias.



Fonte: A autora.

Após obter a concentração do meio líquido, este foi submetido a mais duas diluições até atingir uma concentração próxima à do inóculo comercial. Na primeira diluição, alcançou-se uma concentração de $4,6 \times 10^8$, e na segunda, $1,8 \times 10^3$. A Figura 19 apresenta o inóculo líquido e suas respectivas diluições.

Figura 20: Inóculo *B. pumilus* diluído para aplicação no reator.



Fonte: A autora.

Para o inóculo comercial necessitou-se fazer apenas a diluição sugerida pelo fabricante. Assim, na figura 20 pode-se ver os inóculos diluídos e prontos para uso.

Figura 21: Inóculo *B. pumillus* e EMBIOTIC diluídos e prontos para aplicação no reator.



Fonte: A autora.

5.2.2 Comportamento dos parâmetros físico-químicos.

Com relação a alimentação dos reatores, na tabela 6 encontram-se as quantidades em massa e volume do material adicionado.

Tabela 7: Dados de alimentação no Reator 2 e 3.

Mistura De Alimentação	Massa Inicial (Kg)	Volume(L)
	11,7	45
Matéria Úmida	5,6 Cruas	15
	3,5 Cozida	5
Folhas Secas	0,8	20
Serragem	1,8	15

Fonte: A autora.

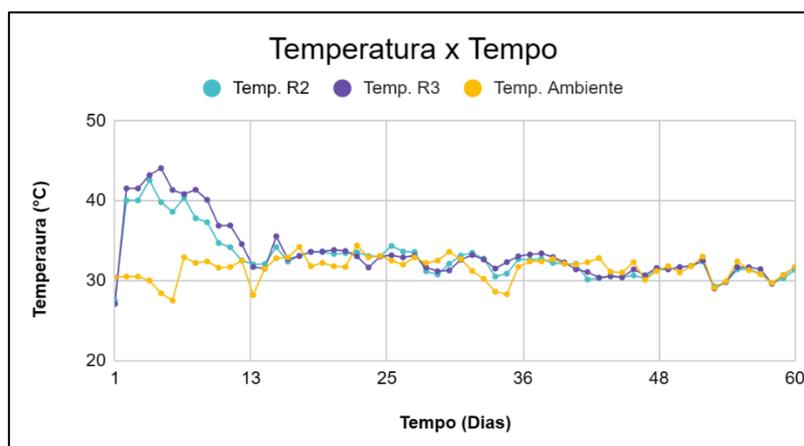
A proporção de matéria úmida a para matéria seca foi de 1:1,5 em volume, essa relação proporcionou um ambiente de umidade favorável para o crescimento das bactérias degradadoras.

A aeração dos reatores foi feita de forma mais contida apenas por agitação mecânica uma vez na semana. Essa aeração foi suficiente para oxigenação do sistema, melhorando assim a retenção de calor e umidade nos equipamentos e favorecendo a etapa termofílica da compostagem.

A figura 22 ilustra a variação da temperatura ao longo do tempo em comparação com a temperatura ambiente nos reatores 2 e 3. O reator 2 continha o inóculo comercial (Embiotic), enquanto o reator 3 continha o inóculo BP.

Observando o gráfico, percebe-se que a fase termofílica teve início a partir do segundo dia e perdurou até o nono dia no reator 3 e até o sétimo dia no reator 2. Ambos os reatores atingiram uma temperatura máxima de aproximadamente 45°C.

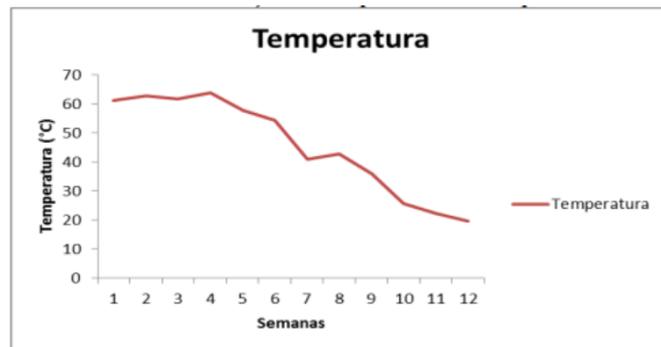
Figura 22: Comportamento da temperatura ao longo do tempo para os reatores 2 e 3.



Fonte: A autora.

Esse comportamento é o esperado para o processo devido a adição de inóculos aceleradores. Podemos observar um comportamento parecido na compostagem em leiras feita por (OLIVEIRA, 2016), através da figura 23, onde a fase termofílica se inicia nos primeiros dias de compostagem até aproximadamente três semanas.

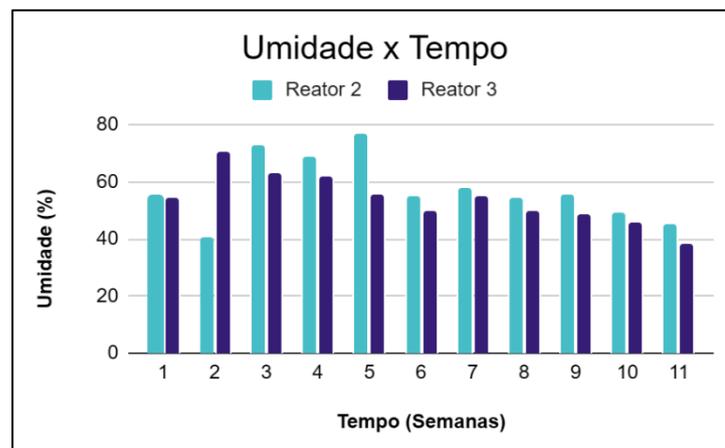
Figura 23: Comportamento da temperatura na compostagem em leiras.



Fonte: (OLIVEIRA, I et al. 2016)

A figura 24 a seguir, apresenta o comportamento da umidade ao longo das 11 semanas de compostagem.

Figura 24: Comportamento umidade ao longo do tempo para os reatores 2 e 3.



Fonte: A autora.

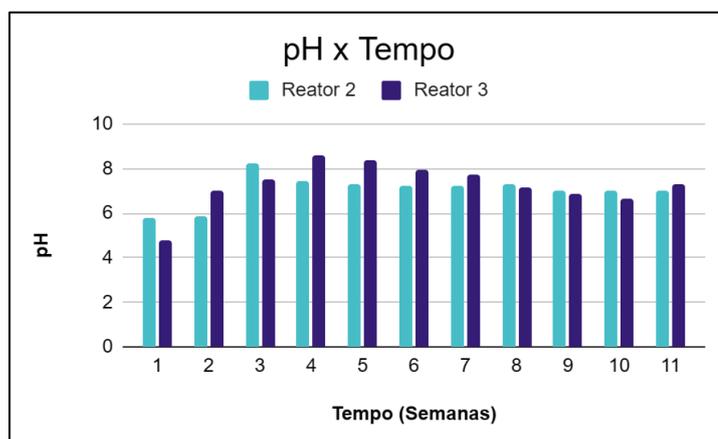
Com relação à umidade, observou-se um comportamento esperado na maior parte do tempo em ambos os reatores, onde a mesma variou entre 50% e 60%, faixa ideal segundo KIEHL, 1985.

Porém, em algumas semanas os reatores apresentaram picos muito altos de umidade, superando 70%. Assim, foi feita a correção da umidade através da adição de serragem nos equipamentos, obtendo assim umidades mais favoráveis ao processo.

Essa adição de serragem cumpriu o objetivo de controlar a umidade, porém interferiu na relação C/N, o que será visto mais adiante.

Com relação ao pH, pode-se constatar através da figura 25, que o mesmo se manteve dentro do esperado para o processo, pois segundo Nadia et al., 2015 a faixa ideal é entre 6 e 8, para favorecer o crescimento microbiano.

Figura 25: Comportamento do pH ao longo do tempo para os reatores 2 e 3.



Fonte: A autora.

Apesar de apresentarem comportamentos bem similares, observou-se que o reator 3 apresentou um melhor desempenho, pois sua fase termofílica atingiu temperatura mais elevadas e umidades menos extremas, favorecendo a degradação da matéria orgânica. Esse fator nos leva a crer que o inóculo produzido em laboratório teve um melhor desempenho em relação ao inóculo comercial, porém essa afirmação se torna imprecisa, tendo em vista que não foram feitas análises detalhadas de cunho microbiológico sobre ambos os inóculos.

5.2.3 Análises de qualidade dos adubos produzidos.

Sabendo que os adubos produzidos no presente trabalho se enquadram como Classe A, a tabela abaixo mostra os resultados das análises realizadas nestes adubos, em comparação com os parâmetros exigidos pela legislação.

Tabela 8: Resultados das análises de qualidade do adubo orgânico produzido – CLASSE A

		Cálcio	Magnésio	Nitrogênio Total	Fósforo	Potássio	Carbono Orgânico	C/N
Adubo REATOR 2	Mínimo Exigido (%)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	20	20/1(máx)
	Valor obtido (%)	1,23	1,43	0,004	0,004	0,1	33,5	>100
		Cálcio	Magnésio	Nitrogênio Total	Fósforo	Potássio	Carbono Orgânico	C/N
Adubo REATOR 3	Mínimo Exigido (%)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	20	20/1(máx)
	Valor obtido (%)	0,87	0,54	0,012	0,235	0,1	46,0	>100

Fonte: A autora.

Analisando a tabela 8, observa-se que os teores de cálcio, magnésio e carbono orgânico total, foram os parâmetros que mais se aproximaram dos teores exigidos pela legislação vigente - em ambos os reatores. O teor de nitrogênio, componente crucial para a qualidade do adubo, ficou muito abaixo do mínimo exigido.

Esse déficit, provavelmente está relacionado a adição de muita matéria seca, principalmente serragem, que é rica em carbono, para a correção da umidade durante o processo. Essa adição desequilibrou a relação carbono/nitrogênio levando ao aumento de um componente (carbono) em detrimento do outro (nitrogênio) na composição.

Além disso, os teores de carbono orgânico ficaram acima do exigido, este fator provavelmente foi o que retardou o processo de compostagem, pois relações C/N muito altas tendem a aumentar o tempo de compostagem.

Os teores de fósforo e potássio também ficaram bem abaixo do exigido evidenciando mais um déficit nos macronutrientes.

Comparando os dois adubos produzidos, o adubo do Reator 3 foi o que mais se aproximou dos parâmetros exigidos pela legislação, porém, ainda assim, não estaria apto para ser comercializados para aplicação na agricultura por não apresentarem as quantidades mínimas de nitrogênio, fósforo e potássio.

Apesar da não conformidade com os parâmetros exigidos, ambos os adubos ainda poderiam ser utilizados em jardinagem doméstica, pois apresentam teores confiáveis de macronutrientes, sendo ricos principalmente em cálcio e magnésio que são nutrientes

essenciais para o crescimento e desenvolvimento saudável das plantas, influenciando uma variedade de processos fisiológicos e bioquímicos.

Os adubos obtidos podem ser visualizados na figura 26.

Figura 26: Adubos produzidos nos reatores 2 e 3.



Fonte: A autora.

5.2.4 Problemas enfrentados e melhorias propostas para o reator.

Durante o processo de compostagem alguns problemas foram enfrentados. Além do excesso de umidade nos reatores notou-se a presença de insetos e larvas de moscas soldado, esses insetos podem ter afetado o processo de degradação do material.

Com relação a agitação mecânica observou-se que as hastes agitadoras não apresentavam um comprimento adequado para uma agitação uniforme, compactando o material nas paredes e no fundo dos reatores.

Assim, afim de melhorar o equipamento e o processo foram sugeridas as seguintes modificações nos reatores:

- Remoção da sustentação do eixo central para aumento do comprimento das hastes de agitação;
- Utilização dos reatores fechados para evitar a entrada de insetos e reduzir as perdas de calor para o meio externo, propiciando a obtenção de maiores temperaturas durante a compostagem;
- Inserção de compressores para aeração forçada, tendo em vista que os equipamentos ficariam fechados e a oxigenação é primordial para o processo;

- Inserção de filtros de carvão ativado para evitar o possível mal cheiro provocado pela degradação do material;
- Furo lateral para coleta de amostras;
- Adição de inóculos aceleradores de compostagem em maior concentração;

Essas melhorias foram implementadas nos equipamentos, porém a retirada da sustentação do eixo central impediu a movimentação das hastes de agitação, o que impossibilitou um terceiro teste que foi programado e iniciado como pode ser visto nas figuras 27 e 28.

As figuras abaixo mostram como os reatores ficaram após as mudanças efetuadas.

Figura 27: Reator fechado com filtro de carvão.



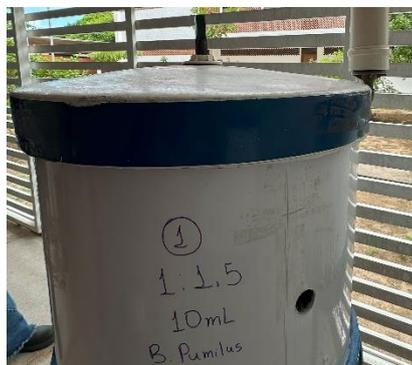
Fonte: A autora.

Figura 28: Vista superior do reator aberto após remoção do eixo de sustentação e aumento do comprimento das hastes de agitação.



Fonte: A autora.

Figura 29: Furo lateral para remoção de amostras a serem analisadas.



Fonte: A autora.

Figura 30: Furo inferior para posicionamento de compressor.



Fonte: A autora.

Para este teste a programação era encher três reatores avaliando a quantidade de inóculo adicionado e a proporção de matéria crua : matéria cozida. Assim, a tabela abaixo mostra o planejamento realizado.

Tabela 9: Planejamento de alimentação dos reatores.

	REATOR 1	REATOR 2	REATOR 3
Volume de Inóculo (mL)	10	10	20
Proporção			
Mat. Crua : Mat. Cozido	1:1,5	2:1	2:1
Proporção			
Mat. Úmida : Mat. Seco	1:1,5	1:1,5	1:1,5

Como percebeu-se problemas de estrutura no equipamento após a alimentação no primeiro reator, os demais não foram alimentados. Assim, a figura 30 mostra o primeiro reator alimentado.

Figura 31: Primeiro reator do teste 3 alimentado.



Fonte: A autora.

5.3 Divulgação Científica

A divulgação científica em canais de comunicação de fácil acesso, como o Instagram, atua como uma forma de aumentar o engajamento dos colegas de curso e do laboratório, a fim de permanecer na pesquisa e superar as dificuldades encontradas. Além disso, a divulgação dos trabalhos realizados em nossos laboratórios é uma forma eficaz de aproximar os trabalhos da população em geral, e aumentar o interesse e a busca das pessoas por temas relevantes como a redução dos resíduos e métodos simples e eficazes de tratamento dos mesmos.

Neste trabalho, vídeos ilustrativos do processo de compostagem estudado foram produzidos e publicados na rede do laboratório chegando a mais de 800 visualizações. Bem como, foram feitas postagens explicativas sobre o projeto, onde a comunidade pode interagir e aprender sobre o processo de compostagem.

Figura 32: Vídeos e postagens feitas no Instagram do laboratório.



Fonte: Instagram, LACQUA.

6.0 CONCLUSÕES

Através dos acompanhamentos e análises realizadas nos reatores foi possível observar de forma detalhada todas as variáveis que interferem no processo de compostagem, esse conhecimento proporcionou aos alunos envolvidos a capacidade de resolver problemas operacionais de forma coerente e ágil, unindo conhecimentos de química e engenharia para otimizar um reator piloto.

De posse desses conhecimentos realizou-se dois testes de compostagem, no primeiro teste concluiu-se que a relação de matéria úmida para matéria seca de 1:2 não foi favorável ao processo criando um ambiente de baixa umidade e excesso de carbono. Outro fator que interferiu na umidade baixa foi a pouca variedade da matéria úmida alimentada que continha mais folhas, ricas em celulose de difícil degradação. A aeração diária também prejudicou o processo, pois o excesso de oxigênio desfavoreceu a ocorrência da fase termofílica e consequentemente a degradação da matéria orgânica.

No segundo teste utilizou-se uma relação de matéria úmida para matéria seca de 1:1,5 e os reatores foram alimentados com mais variedade de alimentos, o que favoreceu o processo, proporcionando um ambiente mais úmido e propício para o desenvolvimento das bactérias. Apesar disso, a umidade ainda aumentou muito após a fase termofílica, sendo necessária a correção através da adição de matéria seca. Assim, o segundo teste foi o mais promissor, possibilitando a observação de um ciclo de compostagem completa que durou 60 dias até a obtenção do adubo orgânico.

Ainda no segundo teste, avaliou-se o desempenho de dois reatores pilotos, o reator continha um inóculo comercial, enquanto o reator 3 continha um inóculo desenvolvido em laboratório para teste. O reator 3 apresentou melhor desempenho tanto nos parâmetros físico-químicos quanto na qualidade do adubo gerado, o que nos leva a crer que o inóculo produzido em laboratório para este trabalho teve um melhor desempenho. Ainda assim, os adubos produzidos não conseguiram atingir os níveis de macronutrientes exigidos pela legislação vigente para a comercialização.

Apesar disso, os adubos ainda poderiam ser utilizados em jardinagem doméstica, pois apresentam teores confiáveis de macronutrientes, sendo ricos principalmente em cálcio e magnésio.

Diante do exposto, fica claro que o presente trabalho possibilitou a otimização do processo de compostagem no equipamento proposto, fomentando o estudo pormenorizado dos processos físico-químicos da compostagem e a aplicação de conhecimentos da Engenharia Química em prol do tratamento de resíduos sólidos de forma limpa e sustentável.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Realizar um terceiro teste a partir das melhorias citadas no item 5.2.4 do presente trabalho, utilizando três reatores e avaliando os parâmetros sugeridos na tabela 9.
- Estudar e propor materiais mais eficientes para compor o reator piloto, avaliando pontos como retenção de calor nas paredes do reator, flexibilidade do material, dentre outros aspectos.
- Fazer uma análise pormenorizada do inóculo a ser adicionado, considerando fatores como eficiência e crescimento microbiano.

7.0 REFERÊNCIAS

- ADHIKARI, B. K. et al. Effectiveness of three bulking agents for food waste composting. *Waste Management*, v.29, p. 197-203, 2009.
- AZIM, K. et al. Composting parameters and compost quality: a literature review. *Organic Agricultural*, v.8, p.141-158, 2018.
- BALDOTTO, M. A; BALDOTTO, L. E. B. Ácidos húmicos. *Revista Ceres, Viçosa* , v. 61, supl. p. 856-881, dez. 2014 . <https://doi.org/10.1590/0034-737x201461000011>.
- BERNAL, M. P.; ALBUQUERQUE, J. A.; MORAL, R. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresource Technology*, p. 5444-5453, dez. 2008.
- BIANCHI, T. S. The Role of Terrestrially Derived Organic Carbon in the Coastal Ocean: A Changing Paradigm and the Priming Effect. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 108, n. 49, p. 19473– 19481, 2011.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 61, de 8 de julho de 2020. Brasília, DF: Instrução Normativa SDA/MAPA 61/2020b.
- Brasil. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental. Plano Nacional de Resíduos Sólidos - Planares / coordenação de André Luiz Felisberto França... [et. al.]. – Brasília, DF: MMA, 2022. 209 p.
- CASTILHOS JUNIOR, A. B. de. et al. Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos com ênfase na proteção de corpos d'água: prevenção, geração e tratamento de lixiviados de aterros sanitários. Rio de Janeiro: ABBES, 2006.
- COSTA, K. J. C.; PASTOR, T. A.; SILVA, J. P. M.; MENDES, S. C. S. Geração de energia elétrica a partir do aproveitamento do biogás gerado por (resíduos sólidos urbanos) rsu no sertão de alagoas. *Caburé-Saberes Acadêmicos Interdisciplinares*. V1.N1; 81-90 p. 2019.
- DA SILVA JANUÁRIO, T. L.; MARINHO, J. L. A.; OLIVEIRA, J. F. A. Potencial de geração de energia elétrica a partir do aproveitamento de resíduos sólidos orgânicos no Brasil/Potential of electricity generation from the use of organic solid waste in Brazil. *Brazilian Journal of Development*. Curitiba, v. 5, n. 12, p. 30092-30103, dec. 2019

DAS, K.; KEENER, H. M. Moisture effect on compaction and permeability in composts. *J. Environ. Eng.* 123, p. 275–281, 1997.

Desperdício de alimentos em restaurantes chega a seis mil toneladas no país – Abrasel, 2018. Disponível em: <<https://abrasei.com.br/noticias/noticias/desperdicio-de-alimentos-em-restaurantes-chega-a-seis-mil-toneladas-no-pais/>>. Acesso em: 25 fev. 2024.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes / editor técnico, Fábio Cesar da Silva. – 2. Ed. Ver. Ampl. – Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009, 627 p.

FERNANDES, F.; SILVA, S.M.S.P. Manual prático para compostagem de biossólidos. 1.ed. Rio de Janeiro: ABES – Associação Brasileira de Engenharia Ambiental e Sanitária, 1999. 84p

GOMES, D. Aceleração da compostagem em reposta à inoculação bacteriana.

Disponível em:

<<https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/27876/1/texto%20completo.pdf>>.

Acesso em: 28 fev. 2024.

HÖFIG, P. et al. Avaliação da qualidade de um fertilizante produzido por compostagem conjunta de materiais orgânicos e rochas moídas. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 15, n. 3, p. 1–18, 1 jul. 2022

JURADO, M. M.; SUÁREZ-ESTRELLA, F.; LÓPEZ, M. J; VARGAS-GARCÍA, M. C.; LÓPEZ-GONZÁLEZ, J. A.; MORENO, J. Enhanced turnover of organic matter fractions by microbial stimulation during lignocellulosic waste composting. *Bioresource Technology*, v. 186, p. 15-24, 2015.

KALAMDHAD, A. S.; KAZMI, A. A. Rotary drum composting of different organic waste mixtures. *Waste Management*, v.27, p.129-137, 2009.

KIEHL, E. J. Fertilizantes Orgânicos. Editora Agronômica Ceres, 492p.: il. Piracicaba, 1985.

KIEHL, E.J. Manual da Compostagem: Maturação e Qualidade do Composto. 4ed. Piracicaba: O autor, 2004. 173p.

LEITE, V. D. et al. Tratamento anaeróbio de resíduos sólidos orgânicos com alta e baixa concentração de sólidos. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 13, n. 2, p. 190–196, abr. 2009.

LIAO, H. P.; LU, X. M.; RENSING, C.; FRIMAN, V. P.; GEISEN, S.; CHEN, Z.; YU, Z.; WEI, Z.; ZHOU, S.G.; ZHU, Y. G. Hyperthermophilic composting accelerates the removal of antibiotic resistance genes and mobile genetic elements in sewage sludge. Environ. Sci. Technol. v. 52, 266–276, 2017.

LÓPEZ-GONZÁLEZ, J. A.; SUÁREZ-ESTRELLA, F.; VARGAS-GARCÍA, M.C.; LÓPEZ, M.J.; JURADO, M.M.; MORENO, J. Dynamics of bacterial microbiota during lignocellulosic waste composting: studies upon its structure, functionality and biodiversity. Bioresource Technology, 175, 406–416, 2015.

LORIN, H. E. F. Aproveitamento dos resíduos da cadeia produtiva do frango de Corte: compostagem, obtenção de chás de composto e uso dos Compostos como substratos para produção de muda. 2019. 109 f. Tese (Programa de PósGraduação em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2019.

MOREIRA, M.; PROENÇA, L. Resíduos orgânicos - Portal Embrapa. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/hortalica-nao-e-so-salada/secoes/residuos-organicos>>. Acesso em: 25 fev. 2024.

NADIA, O. F.; XIANG, L. Y.; LIE, L. Y.; ANUR, D.C.; AFANDI, M; BAHARUDDIN, S. A. Investigation of physico-chemical properties and microbial community during poul try manure co-composting process. Journal of environmental sciences, vol 28, p81.

OLIVEIRA, I. et al. Compostagem dos resíduos orgânicos provenientes do Restaurante Universitário da UTFPR - Campus Francisco Beltrão, 2016.

Panorama dos resíduos sólidos no Brasil. ABRELPE,2020. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7212936/mod_resource/content/1/Panorama-2020-V5-unicas%20%282%29.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2024.

REIS, M.F.P. Avaliação do processo de compostagem de resíduos sólidos urbanos. 2005. 239p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005. Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/7653/000550758.pdf?se+quencia=1> Acesso em: 25 fev. 2024.

RESSETTI, R. R.; CAMPOS, S. X. Aceleração do Processo de Compostagem: Uma revisão. **Caderno de Ciências Agrárias**, [S. l.], v. 12, p. 1–12, 2020. DOI: 10.35699/2447-6218.2020.20286.

RESSETTI, Rolan Roney. Biodecomposição De Resíduos Orgânicos Domésticos Em Reator Fechado E Caracterização Do Composto Obtido Por Técnicas Convencionais E Espectroscópicas. 2012. 116 F. Dissertação (Mestrado Em Química) - Universidade Estadual De Ponta GROSSA, Ponta Grossa, 2012.

SANTOS JÚNIOR, C. D. et al. Degradação de matéria orgânica terrestre por microrganismos do rio Amazonas–Metagenômica e genômica populacional. 2018. 225f. Tese (Programa de Pós-Graduação em Genética Evolutiva e Biologia Molecular do Centro de Ciências Biológicas e da Saúde) - Universidade Federal de São Carlos, 2019.

Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), disponível em: <https://seegbr.s3.amazonaws.com/Documentos%20Analiticos/SEEG_8/SEEG8_DOC_ANALITICO_SINTESE_1990-2019.pdf> Acesso em: 28 fev. 2024.

VILLAR, I.; ALVES, D.; GARRIDO, J.; MATO, S.. Evolution of microbial dynamics during the maturation phase of the composting of different types of waste. *Waste Management*, v. 54, p. 83-92, 2016.

ZITTEL, R. TRATAMENTO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS DOMÉSTICOS, TABACO DE CIGARROS CONTRABANDEADOS E RESÍDUOS DE MADEIRA EM BIOREATOR PONTA GROSSA, 2014. . Disponível em: <<https://tede2.uepg.br/jspui/bitstream/prefix/2129/1/Rosimara%20Zittel.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2024.