

UNIVERSIDADE FEDERAL DO TRIÂNGULO MINEIRO
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental

Laís de Oliveira Paulo

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA ACELERADO DE COMPOSTAGEM DOMÉSTICA

Uberaba

2021

Laís de Oliveira Paulo

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA ACELERADO DE COMPOSTAGEM DOMÉSTICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, área de concentração “Qualidade Ambiental” da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Deusmaque Carneiro Ferreira

Uberaba

2021

**Catálogo na fonte: Biblioteca da Universidade Federal do
Triângulo Mineiro**

P355d Paulo, Laís de Oliveira
Desenvolvimento de sistema acelerado de compostagem doméstica /
Laís de Oliveira Paulo. -- 2021.
81 f. : il., graf., tab.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) --
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, MG, 2021
Orientador: Dr. Deusmaque Cameiro Ferreira

1. Desenvolvimento sustentável. 2. Resíduos orgânicos como
fertilizantes. 3. Gestão integrada de resíduos sólidos. 4. Adubos compostos.
I. Ferreira, Deusmaque Cameiro. II. Universidade Federal do Triângulo
Mineiro. III. Título.

CDU 502.131.1:628.4

LAÍS DE OLIVEIRA PAULO

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA ACELERADO DE COMPOSTAGEM DOMÉSTICA

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Triângulo Mineiro, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, para obtenção do título de mestre.

Uberaba, 31 de agosto de 2021.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Deusmaque Carneiro Ferreira
Orientador - UFTM

Prof. Dr. Ednilson Viana
Membro Titular - USP

Profa. Dra. Bruna Fernanda Faria Oliveira
Membro Titular - UFU



Documento assinado eletronicamente por **DEUSMAQUE CARNEIRO FERREIRA, Professor do Magistério Superior**, em 31/08/2021, às 16:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) e no art. 34 da [Portaria Reitoria/UFTM nº 87, de 17 de agosto de 2021](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ednilson Viana, Usuário Externo**, em 31/08/2021, às 21:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) e no art. 34 da [Portaria Reitoria/UFTM nº 87, de 17 de agosto de 2021](#).



Documento assinado eletronicamente por **Bruna Fernanda Faria Oliveira, Usuário Externo**, em 01/09/2021, às 08:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) e no art. 34 da [Portaria Reitoria/UFTM nº 87, de 17 de agosto de 2021](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufm.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0587319** e o código CRC **327A4979**.

Dedico aos meus pais pelo apoio imensurável
nesta caminhada e à minha irmã, companheira
de toda a minha vida.

AGRADECIMENTOS

Meu primeiro agradecimento é a Deus, pelo dom da vida, pela proteção, saúde e cuidado em cada um dos meus passos.

Aos meus pais, Almira e Amarildo, pelas palavras de sabedoria, consolo e amor. Por sempre me permitirem enxergar em seus olhos o orgulho que sentem de mim, o que me fez nunca desistir dos meus sonhos. Pelo apoio financeiro e pelos valores morais que me ensinaram e norteiam minha vida.

À minha irmã, Lucila, por ser meu exemplo de amizade, de companheirismo, de renúncia. Pelas palavras de conforto e por simplesmente me ouvir quando necessário. Por me presentear com minhas afilhadas Melissa e Bianca, que são a minha paz em meio a todas as turbulências da vida.

Ao meu esposo Maykon, por me permitir realizar o sonho de ser mestre, por renunciar suas horas de descanso para que eu pudesse persistir nos estudos e por manter nosso lar durante esse período. Pelo amor, pelo trabalho e por nossa família.

Aos meus avós, que em sua simplicidade demonstram diariamente o que realmente tem importância nesta vida.

Ao Fábio, meu amigo e padrinho, responsável por grande parte deste trabalho. Obrigada por viver este trabalho junto comigo e fazer dele um projeto seu.

Ao meu orientador Deusmaque, meu mestre e amigo, que acreditou neste projeto antes mesmo de mim. Pelos conselhos, direcionamentos, ensinamentos, apoio financeiro e por me provar que o conhecimento é o caminho, não deixando que eu fraquejasse frente às dificuldades.

À Luciana da Costa e Silva Martins, secretária do PPGCTA, pela ajuda, paciência e cuidado com todas as minhas necessidades acadêmicas.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental por compartilhar seus conhecimentos comigo.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais- FAPEMIG, por disponibilizar a bolsa de fomento, tão fundamental para conclusão deste trabalho.

E a todos que direta ou indiretamente colaboraram para a existência deste trabalho, muito obrigada.

“Estude como se você fosse viver para sempre...

“...viva como se você fosse morrer amanhã.”

Santo Isidoro de Sevilha

RESUMO

A crescente geração de resíduos sólidos orgânicos urbanos inquieta e direciona, há décadas, órgãos nacionais e internacionais a buscarem alternativas ambientalmente adequadas para o destino destes resíduos. Neste sentido, uma abordagem circular se faz necessária na gestão dos resíduos orgânicos. A compostagem se apresenta como um instrumento na aplicação dos princípios da economia circular, reduzindo consideravelmente a entrada de resíduos orgânicos em aterros e promovendo a reciclagem de nutrientes no solo com a aplicação do biofertilizante resultante do processo. Diante disso, este estudo objetivou o desenvolvimento de uma composteira e a otimização dos principais parâmetros do processo de compostagem para os resíduos sólidos orgânicos gerados em ambientes domésticos. A composteira doméstica foi desenvolvida e o delineamento composto central foi escolhido como método de definição da matriz experimental para a otimização das variáveis. Os parâmetros monitorados durante os experimentos foram: teor de umidade, temperatura, pH e relação C/N. O modelo matemático retornou valores de 99% para a estabilização do ponto de ótimo e os dados experimentais em aproximadamente 98%, o que indica a eficiência do modelo de otimização obtido. Os resultados obtidos do parâmetro temperatura evidenciaram que este não se demonstrou um fator comprometedor no correto andamento do processo de compostagem. A relação C/N durante os experimentos comprovou que o equipamento foi capaz de mineralizar os resíduos sem obter altas temperaturas e com pequenas quantidades de massa orgânica. Assim, o equipamento desenvolvido com os parâmetros de compostagem otimizados constitui uma alternativa promissora para o tratamento da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos, corroborando com o desenvolvimento sustentável, ganho ambiental, econômico e social.

Palavras-chave: Composteira. Resíduos alimentares. Viabilidade.

ABSTRACT

The growing generation of urban organic solid waste disturbs and directs, for decades, national and international bodies to seek environmentally adequate alternatives for the destination of this waste. In this sense, a circular approach is needed in the management of organic waste. Composting is presented as an instrument in the application of the principles of circular economy, considerably reducing the entry of organic waste into landfills and promoting the recycling of nutrients in the soil with the application of biofertilizer resulting from the process. Therefore, this study aimed to develop a composter and optimize the main parameters of the composting process for organic solid waste generated in domestic environments. Domestic composting was developed, and the central composite design was chosen as the method for defining the experimental matrix for the optimization of variables. The parameters monitored during the experiments were: moisture content, temperature, pH and C/N ratio. The mathematical model returned values of 99% for the stabilization of the optimum point and the experimental data in approximately 98%, which indicates the efficiency of the obtained optimization model. The results obtained from the temperature parameter showed that it did not prove to be a compromising factor in the correct progress of the composting process. The C/N ratio during the experiments proved that the equipment was able to mineralize the waste without obtaining high temperatures and with small amounts of organic mass. Thus, the equipment developed with optimized composting parameters constitutes a promising alternative for the treatment of the organic fraction of urban solid waste, supporting sustainable development, environmental, economic, and social gain.

Keywords: Composter. Food waste. Viability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Gestão dos resíduos orgânicos por meio da economia circular.....	19
Figura 2 – Gestão dos resíduos sólidos urbanos nos EUA em 2018.....	20
Figura 3 – Tratamento dos RSU por incineração no Japão em 2018 e 2019.....	21
Figura 4 – Unidades de processamento de RSU com informações atualizadas dos municípios participantes do SNIS em 2019.....	22
Figura 5 – Tecnologias de processamento e tratamento de resíduos.....	23
Figura 6 – Padrões de compostagem, sendo: a) leiras; b) pilhas; c) composteira doméstica.....	26
Figura 7 – Localização de Uberaba-MG.....	34
Figura 8 – Protótipo da composteira doméstica, sendo: a) vista superior com abertura superior; b) vista superior externa; c) vista lateral com abertura interna.....	35
Figura 9 – Etapas de construção e composteira doméstica finalizada, sendo: a) recepção das peças do equipamento; b) construção do tambor de rotação; c) construção da estrutura externa; d) finalização da montagem; e) vista lateral do equipamento finalizado; f) vista superior interna do equipamento finalizado.....	35
Figura 10 – Entrada dos resíduos orgânicos na composteira através de equipamento de trituração.....	37
Figura 11 – Tambor de rotação e válvula para revolvimento do composto.....	38
Figura 12 – Retirada do composto após a finalização do experimento, sendo: a) gaveta de coleta do composto; b) gaveta de coleta do composto dentro da composteira.....	39
Figura 13 – Experimentos do Bloco 1 no 5º dia de compostagem, sendo: a) experimento 1; b) experimento 3; c) experimento 5; d) experimento 7; e) experimento 14.....	47
Figura 14 – Experimentos do Bloco 2 no 15º dia de compostagem, sendo: a) experimento 2; b) experimento 4; c) experimento 6; d) experimento 8; e) experimento 15.....	48
Figura 15 – Experimentos do Bloco 3 no 10º dia de compostagem, sendo: a) experimento 10; b) experimento 12; c) experimento 16.....	49
Figura 16 – Experimentos do Bloco 4 no 1º dia de compostagem, sendo: a) experimento 9; b) experimento 11; c) experimento 17; d) experimento 13.....	50
Figura 17 – Diagrama de Pareto para os efeitos das variáveis de estudo e suas interações.....	54
Figura 18 – Valores preditos pelo modelo <i>versus</i> valores observados em experimentos.....	55
Figura 19 – Valores dos resíduos <i>versus</i> valores preditos.....	55
Figura 20 – Valores dos resíduos <i>versus</i> valores observados.....	56

Figura 21 – Estabilização do organomineral: superfície de resposta da estabilização (%) em função das variáveis tempo e revolvimento.....	56
Figura 22 – Estabilização do organomineral: superfície de resposta da estabilização (%) em função das variáveis tempo e adubo sintético (NPK).....	57
Figura 23 – Estabilização do organomineral: superfície de resposta da estabilização (%) em função das variáveis adubo sintético (NPK) e revolvimento.....	58
Figura 24 – Gráfico de Umidade <i>versus</i> Tempo dos Blocos 1, 2, 3 e 4 no 1°, 5°, 10°, 15°, 20° e 25° dia.....	60
Figura 25 – Gráfico de Temperatura <i>versus</i> Tempo dos Blocos 1, 2, 3 e 4 no 1°, 5°, 10°, 15°, 20° e 25° dia.....	61
Figura 26 – Gráfico de pH <i>versus</i> Tempo dos Blocos 1, 2, 3 e 4 no 1°, 5°, 10°, 15°, 20° e 25° dia.....	62
Figura 27 – Gráfico da Relação C/N <i>versus</i> Tempo do Bloco 1 no 1°, 5° e 10° dia.....	63
Figura 28 – Gráfico da Relação C/N <i>versus</i> Tempo do Bloco 2 no 1°, 5°, 10°, 15°, 20° e 25° dia.....	64
Figura 29 – Gráfico da Relação C/N <i>versus</i> Tempo do Bloco 3 no 1°, 5°, 10° e 15° dia.....	64
Figura 30 – Gráfico da Relação C/N <i>versus</i> Tempo do Bloco 4 no 1°, 5°, 10° e 15° dia.....	65
Quadro 1 –Comparativo das tecnologias de tratamento de resíduos.....	24

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de trabalho das variáveis abordadas no estudo de compostagem.....	40
Tabela 2 – Matriz experimental do DCCR para compostagem.....	41
Tabela 3 – Matriz experimental com as datas dos experimentos.....	46
Tabela 4 – Experimentos: composição, peso final e porcentagem de redução.....	51
Tabela 5 – Variáveis de controle, independentes, e variável de resposta, dependente, para estabilização do composto organomineral.....	52
Tabela 6 – Valores de máximo rendimento para o intervalo das variáveis em estudo.....	59
Tabela 7 – Resultados das análises em triplicata de C, N e a relação C/N do composto estabilizado nas gavetas 1, 2 e 3, considerando os parâmetros otimizados.....	59
Tabela 8 – Caracterização do composto estabilizado nas gavetas 1, 2 e 3, considerando os parâmetros otimizados.....	66

LISTA DE SIGLAS

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

C/N – Carbono/Nitrogênio

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

COT – Carbono Orgânico Total

DCCR – Delineamento Composto Central Rotacionado

EPA – *United States Environmental Protection Agency*

EUROSTAT – *Statistical Office of the European Union*

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

NPK – Nitrogênio- Fósforo-Potássio

NTK - Nitrogênio Total Kjeldahl

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

SNIS– Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

UFTM – Universidade Federal do Triângulo Mineiro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	17
1.1.1 Objetivo Geral	17
1.1.2 Objetivos Específicos	17
1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA	17
2 ESTADO DA ARTE	18
2.1 RESÍDUOS ORGÂNICOS E A ECONOMIA CIRCULAR	18
2.1.1 Panorama geral dos resíduos sólidos	20
2.2 PRINCIPAIS TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS	23
2.2.1 Compostagem	25
2.3 PRINCIPAIS PARÂMETROS DO PROCESSO DE COMPOSTAGEM	27
2.3.1 Umidade	27
2.3.2 Temperatura	28
2.3.3 pH	29
2.3.4 Granulometria dos resíduos	29
2.3.5 Aeração	30
2.3.6 Ativação microbiológica	31
2.3.7 Adição de fertilizante sintético	31
2.3.8 Relação C/N	32
3 METODOLOGIA	33
3.1 ÁREA E QUALIFICAÇÃO DO ESTUDO	33
3.2 COMPOSTEIRA DOMÉSTICA	34
3.3 OTIMIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO	39
3.4 ANÁLISE DOS PARÂMETROS DO PROCESSO DE COMPOSTAGEM	42
3.4.1 Teor de umidade	42

3.4.2 Análise da temperatura	43
3.4.3 Análise pH	43
3.4.4. Análise de Carbono e Nitrogênio	43
3.4.5 Caracterização do biofertilizante maturado	44
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1 TESTES PRÉ-OPERACIONAIS NA COMPOSTEIRA DOMÉSTICA	45
4.2 CONDUÇÃO DOS EXPERIMENTOS DA MATRIZ EXPERIMENTAL	46
4.3 OTIMIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO ATRAVÉS DO DELINEAMENTO COMPOSTO CENTRAL ROTACIONADO	52
4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS PARÂMETROS: UMIDADE, TEMPERATURA, PH E RELAÇÃO C/N	60
4.5 CARACTERIZAÇÃO DO BIOFERTILIZANTE MATURADO.....	66
5 CONCLUSÃO	68
REFERÊNCIAS	69
APÊNDICE A – Tabela de resultados do parâmetro Umidade (%)	79
APÊNDICE B – Tabela de resultados do parâmetro Temperatura (°C)	80
APÊNDICE C – Tabela de resultados do parâmetro pH	81
APÊNDICE D – Tabela de resultados do parâmetro Relação C/N	82

1 INTRODUÇÃO

Inúmeros são os estudos que apontam o crescimento exacerbado na geração de resíduos sólidos urbanos em todo o mundo, bem como sobre a problemática envolvida em sua coleta, reciclagem e descarte. Esta curva ascendente aponta que até 2050 serão produzidas aproximadamente 3,4 bilhões de toneladas de resíduos sólidos municipais no mundo (TYAGI et al., 2018). O gerenciamento inadequado de resíduos resulta no agravamento dos impactos causados ao meio ambiente e danos à saúde humana, concomitante a elevados investimentos de governos que buscam solucionar estas questões. Contudo, existem tecnologias eficazes para a gestão destes resíduos, visando os aspectos ambientais, sociais e econômicos, seguindo os princípios da economia circular (MAYER; BHANDARI; GÄTH, 2019).

O conceito de economia circular baseia-se no reaproveitamento e reciclagem de materiais e produtos, proporcionando o retorno destes às etapas do seu ciclo de vida ou transformando-os em novas fontes de energia renováveis, por exemplo, valorando assim aquilo que estaria descartado em aterros, lixões ou locais impróprios (CHATTERJEE; MAZUMDER, 2019). Contudo, Cerda et al. (2018) destacam que o desenvolvimento de um processo de tratamento que seja viável nos âmbitos econômico, técnico, social, legal e ambiental é o maior desafio da gestão dos resíduos sólidos urbanos na atualidade.

Variadas são as metodologias para o tratamento de resíduos, como a incineração, reciclagem, disposição final em aterros sanitários, assim como os biodigestores e a compostagem para a fração orgânica. Esta última, em constante expansão pelo mundo, se inclui entre as tecnologias biológicas capazes de sustentar-se com pequenos investimentos e custos de operação e consumo energético reduzido (SIDDIQUE et al., 2018). Por isso, Keng et al. (2020), destacam esta prática como um substituto aos padrões pré-definidos de tratamento, além de disponibilizar um biofertilizante como produto do processo, eficiente na aplicação e restituição de nutrientes ao solo.

Zhou et al. (2020) afirmam que a compostagem doméstica, ou seja, o tratamento da fração orgânica dos resíduos sólidos no local de sua geração, surge como um modelo sustentável de economia de mão-de-obra, transporte e segregação, uma vez que estas etapas não são requeridas neste processo. O que pode ser confirmado por Vázquez e Soto (2017), que sugerem o método como uma rota alternativa promissora, eficiente e sustentável na gestão de resíduos orgânicos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma composteira para o tratamento da fração orgânica dos resíduos sólidos gerados em ambientes domiciliares e otimizar os principais parâmetros do processo de compostagem nessas condições.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Construir a composteira doméstica.
- Otimizar, empregando o delineamento composto central rotacionado, o tempo de compostagem, o número de vezes de revolvimento e a quantidade adicionada de inoculante.
- Acompanhar a maturação do composto por meio de parâmetros como pH, umidade, temperatura e relação C/N.
- Avaliar a qualidade do biofertilizante (organomineral) maturado e realizar a sua caracterização.

1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

Os resíduos sólidos urbanos, em destaque sua fração orgânica, se apresentam como um constante desafio para a sociedade contemporânea, uma vez que aterros sanitários têm sido saturados pela disposição de um crescente volume destes resíduos. Sabendo que a fração orgânica representa mais de 50% na constituição de resíduos sólidos gerados no mundo, e que estes possuem potencial para disponibilizar micro e macronutrientes no solo e geração de energia e calor, faz-se necessário o desenvolvimento de tecnologias capazes aproveitar os benefícios advindos do seu adequado tratamento. Neste sentido, a compostagem se apresenta como uma alternativa viável, capaz de tratar resíduos orgânicos em grande escala, como os industriais, urbanos e derivados da agricultura e pecuária.

Com isso, este estudo se justifica diante da necessidade de aplicar a compostagem em menor escala, nos ambientes residenciais, que são os geradores da maior porcentagem de resíduos orgânicos urbanos. A prática da compostagem doméstica proporciona não apenas a segregação de resíduos na fonte geradora e posteriormente seu tratamento in loco, como possibilita uma considerável economia em energia advinda da coleta, transporte e disposição

destes resíduos. Assim, o desenvolvimento de uma composteira doméstica traz em pequena escala uma possibilidade de tratamento ambientalmente adequado e viável.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 RESÍDUOS ORGÂNICOS E A ECONOMIA CIRCULAR

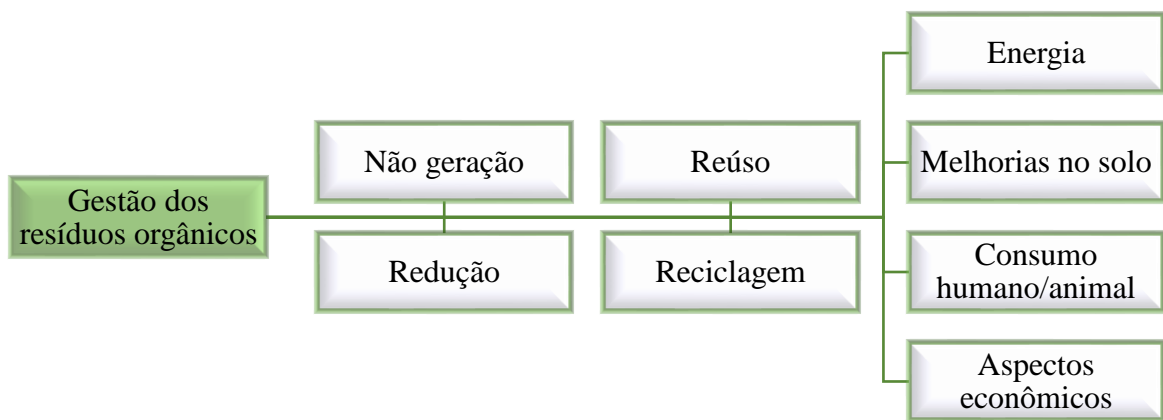
A evolução crescente na geração dos resíduos orgânicos, bem como o gerenciamento dos impactos ambientais decorrentes da degradação de alimentos em aterros sanitários direcionam entidades nacionais e internacionais a buscarem tecnologias viáveis para o tratamento e disposição final sustentáveis destes resíduos (ARMINGTON; CHEN, 2018). Diante desta realidade, procurando alcançar o equilíbrio entre os múltiplos setores produtivos e o cuidado com o meio ambiente, em 2010, foi instituída a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), baseada no conceito de responsabilidade compartilhada, direcionando funções e ações individualizadas à sociedade civil, setores privados e governos federal, estaduais e municipais (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2021).

Os resíduos orgânicos são aqueles constituídos essencialmente por restos animais ou vegetais, derivados de atividades humanas, que em ambientes naturais em equilíbrio, se degradam, reciclando os nutrientes nos processos da natureza (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2021). Para Ashwood et al. (2018) os resíduos orgânicos são materiais que quando adicionados ao solo, agregam qualidade ao mesmo, favorecendo o crescimento de culturas através da reciclagem e disponibilização de micro e macronutrientes, maior retenção de umidade, melhorias na textura do solo e minimização das emissões de CO₂ para a atmosfera.

Bekchanov e Mirzabaev (2018) afirmam que a reciclagem de resíduos é uma alternativa em que todos os setores da sociedade são beneficiados sob perspectivas ambientais e econômicas. Segundo os mesmos autores, a transformação de resíduos orgânicos em biofertilizantes reduz a poluição ambiental relacionados ao despejo destes em lixões e atenuam a necessidade de terras disponíveis para aterros sanitários, além disso, a redução de despesas públicas com a gestão dos resíduos e o menor uso de fertilizantes químicos são aspectos positivos desta prática. Segundo Perger (2019), ao se destinar resíduos orgânicos a aterros, os recursos perdidos representam um custo inestimável para a sociedade, meio ambiente e economia.

Neste sentido, uma abordagem circular se faz necessária na gestão dos resíduos orgânicos, onde o que é descartado passa por um processo de segregação e pode ser restituído como insumo produtivo na economia, impulsionando a valoração destes resíduos por meio de uma abordagem hierárquica, conforme representado na Figura 1. Segundo a European Commission (2019), a economia circular trata-se de um modelo de gestão que busca a extração do valor máximo e uso de matérias-primas, produtos e resíduos a fim de promover a economia de energia, redução de emissões gasosas potencialmente tóxicas e minimizar o consumo dos recursos naturais. Ao reintroduzir resíduos na cadeia produtiva, abrangendo o ciclo de vida da produção e consumo, são direcionadas mudanças conceituais acerca de resíduos, que por sua vez, se tornam recursos que fomentam empregos, renda familiar e proporcionam a mitigação de impactos ambientais. Entretanto, Perger (2019) afirma que a gestão de resíduos orgânicos fundamentalmente necessita advir de cada indivíduo para que possa ser disseminada em seguida como um aspecto positivo cultural mútuo e amplamente importante.

Figura 1: Gestão dos resíduos orgânicos por meio da economia circular.

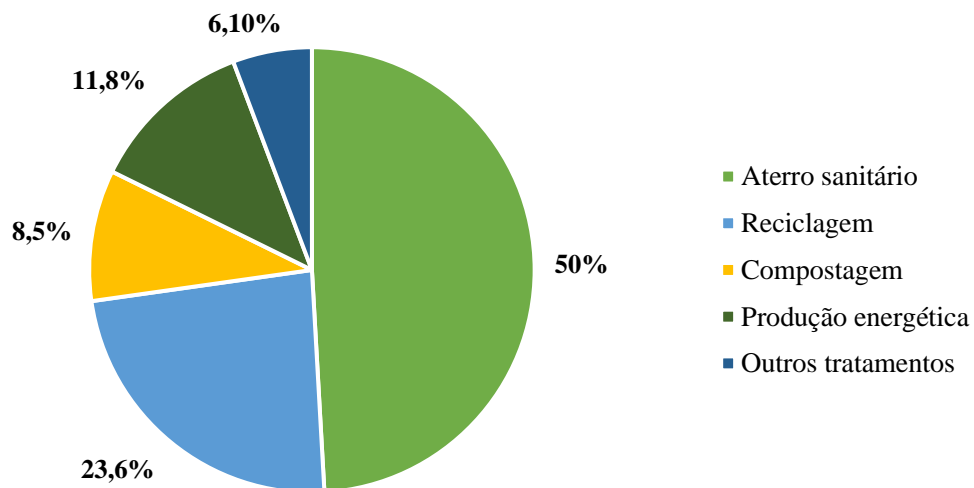


Fonte: Adaptado de Perger (2019).

2.1.1 Panorama geral dos resíduos sólidos

Diversos países conseguiram agregar às suas culturas a coleta seletiva e as boas práticas de tratamento e disposição final dos resíduos sólidos gerados. Nos Estados Unidos, em 2018, de acordo com a *United States Environmental Protection Agency* (EPA, 2020), foram geradas aproximadamente 292 milhões de toneladas de RSU. Destes, aproximadamente 69 milhões de toneladas foram recicladas e 25 milhões de toneladas foram compostadas (Figura 2). Além disso, mais de 34 milhões de toneladas de RSU foram reaproveitadas para geração de energia e 18 milhões de toneladas foram tratadas de formas alternativas. Por fim, mais de 146 milhões de toneladas de RSU foram depositadas em aterros sanitários.

Figura 2: Gestão dos resíduos sólidos urbanos nos EUA em 2018

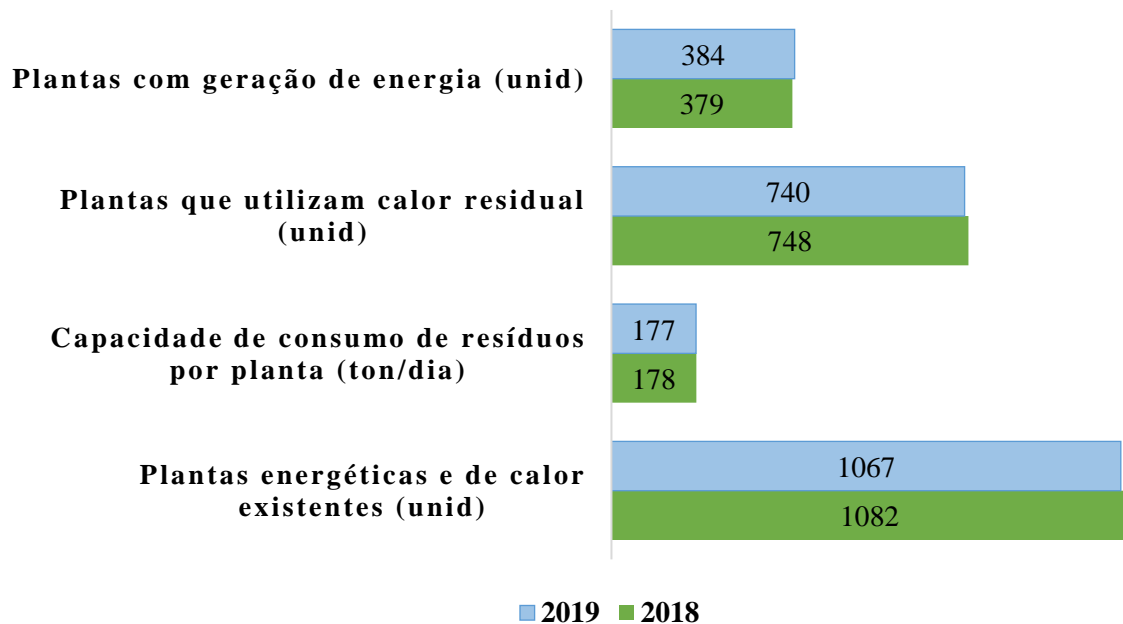


Fonte: Adaptado de EPA (2020).

A União Europeia se apresenta como outro bom exemplo de gestão e gerenciamento de resíduos sólidos. A geração *per capita* de resíduos foi em média 1,8 tonelada por habitante em 2016. Deste montante, 38,8% dos resíduos sólidos gerados foram depositados em aterros sanitários, 1% incinerados sem recuperação de energia e 7% foram eliminados de outra forma. Ainda segundo dados do *Statistical Office of the European Union* (EUROSTAT, 2020), 53,2% dos resíduos foram tratados em operações de recuperação como: reciclagem (37,8%), enchimento de zonas escavadas para efeitos de recuperação de encostas ou de segurança (9,8%) ou recuperação de energia (5,6%).

No Japão em 2019, de acordo com o *Ministry of the Environment Government of Japan* (2020) foram geradas 42.730.000 toneladas de resíduos sólidos urbanos, sendo a média diária por habitante de 0,918 kg. No mesmo ano, 3.800.000 toneladas de resíduos foram destinadas a aterros sanitários e 8.400.000 para reciclagem. Neste país, a existência de políticas públicas que estimulam o tratamento de resíduos sólidos através da incineração para geração de energia ou de calor residual são notórias, conforme demonstra a Figura 3.

Figura 3: Tratamento dos RSU por incineração no Japão em 2018 e 2019.



Fonte: Adaptado de Ministry of the Environment Government of Japan (2021).

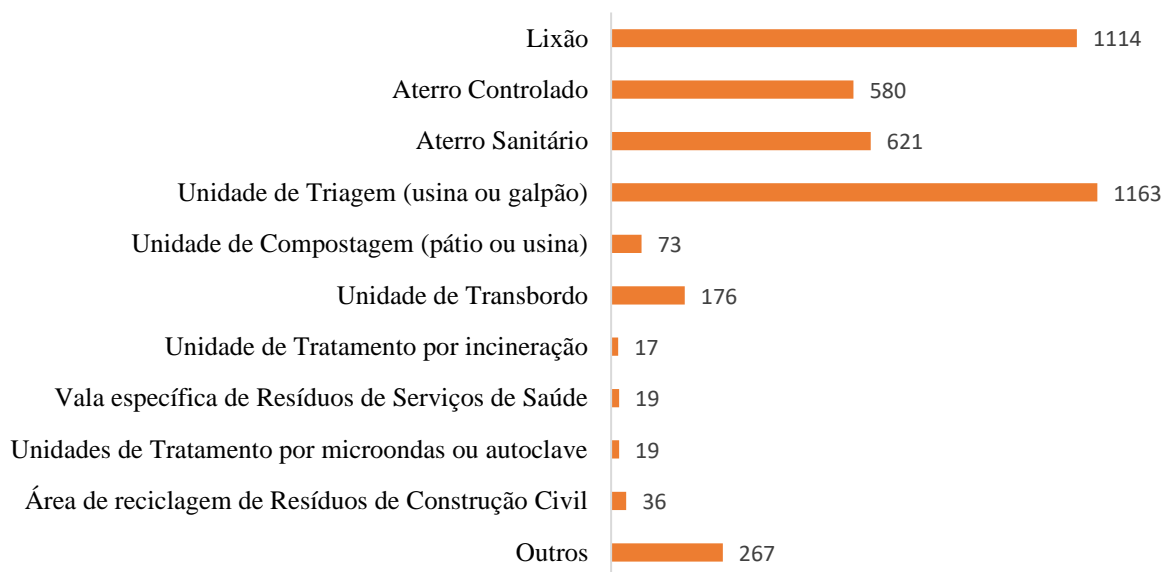
No Brasil, em 2019, foram gerados aproximadamente 79,6 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU). Deste total, receberam coleta 92%, assim, 6,36 milhões de toneladas permaneceram em suas fontes geradoras ou foram descartados inadequadamente. Os aterros sanitários receberam em média 60% dos RSU coletados, enquanto a parcela remanescente (40%), foi destinada a lixões e aterros controlados ou disposta em locais desconhecidos (ABRELPE, 2020). Diante disso, a Figura 4 apresenta um quantitativo que evidencia a realidade do tratamento e disposição final dos resíduos sólidos urbanos no Brasil.

Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2020), em 2019, somente 1,6 milhão de toneladas foram coletadas seletivamente, ou seja, obtiveram tratamentos alternativa à disposição final em aterros sanitários ou controlados. O diagnóstico anual demonstra a recuperação de 305 mil toneladas recebidas em 73 unidades de compostagem e a

estimativa de que 1,04 milhão de toneladas de resíduos recicláveis secos são recuperados em 1.163 unidades de triagem. Conhecer as propriedades e características dos resíduos separadamente, de acordo com Zhou et al. (2018) é imprescindível quando se busca o bom gerenciamento destes, uma vez que esse processo tende a facilitar seu tratamento posteriormente.

Neste sentido, a Resolução CONAMA 358 de 2005, afirma ser imperativa a segregação dos resíduos na fonte geradora, proporcionando assim, uma redução do volume de resíduos a serem coletados, tratados e dispostos, o que colabora com a proteção da saúde e do meio ambiente. Segundo Viljoen, Blaauw e Schenck (2019), a separação de resíduos na fonte além de possibilitar a coleta de um material em melhores condições de limpeza, visa garantir a recuperação máxima desses materiais, uma vez que serão direcionados a centros de reciclagem especializados em seus tratamentos e reaproveitamento.

Figura 4: Unidades de processamento de RSU com informações atualizadas dos Municípios participantes do SNIS em 2019.



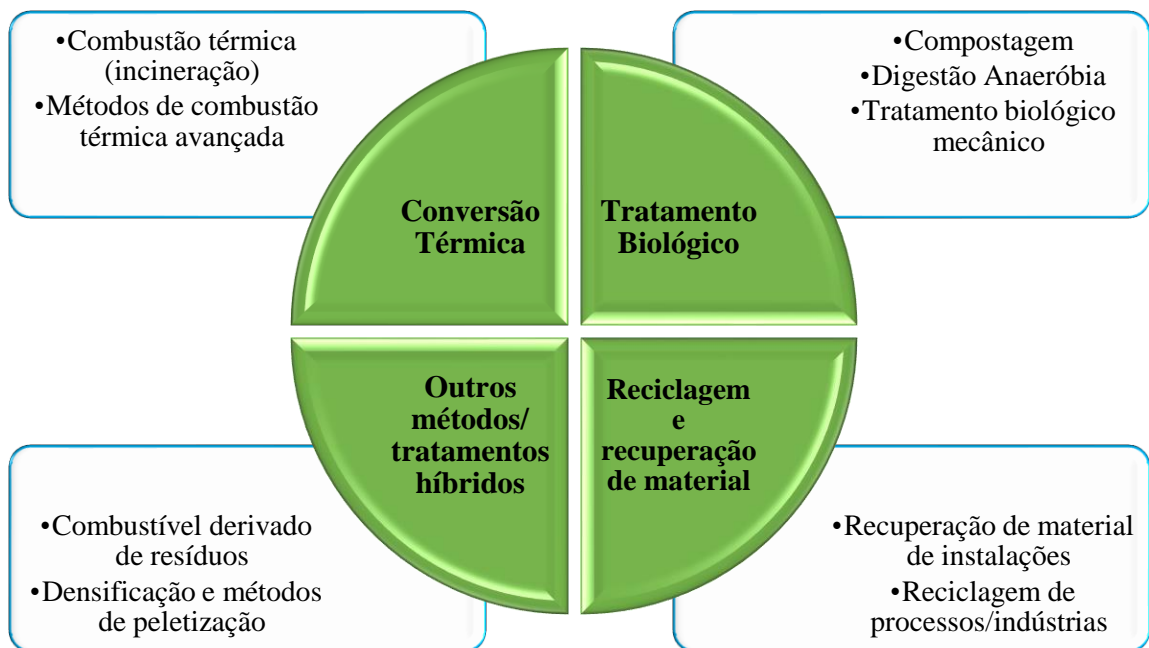
Fonte: Adaptado de SNIS (2020).

Baseado no panorama traçado pela ABRELPE (2020), no Brasil em 2019, dos 5570 municípios que compõem o Estado, 4070 possuem implantada a iniciativa de coleta seletiva dos resíduos sólidos urbanos, entretanto, em muitos deles, essas atividades são rudimentares e não abrangem todos os bairros.

2.2 PRINCIPAIS TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS

Atualmente, a tendência crescente do consumo de bens e serviços e as diferentes práticas na cadeia de suprimentos resultaram em grandes impactos ambientais derivados do aumento do fluxo final de resíduos gerados (RAJAEIFAR et al., 2017). Diante deste cenário, tornou-se essencial o desenvolvimento de tecnologias e estratégias capazes de lidar eficientemente com os resíduos, buscando a sustentabilidade destas práticas. Aleluia e Ferrão (2017) relatam que as principais alternativas de tratamento segregadas em categorias são tratamento biológico, conversão térmica, reciclagem, tratamentos híbridos entre outros (Figura 5).

Figura 5: Tecnologias de processamento e tratamento de resíduos.



Fonte: Adaptado de Aleluia e Ferrão (2017).

Entre as tecnologias supracitadas, serão destacados os benefícios e limitações da co-geração de energia, digestão anaeróbia e incineração no Quadro 1.

Quadro 1: Comparativo das tecnologias de tratamento de resíduos			
	DESCRIÇÃO	BENEFÍCIOS	LIMITAÇÕES
Co-geração de energia	A bioenergia é a energia produzida a partir de usinas alimentadas com biocombustível sólido, biogás ou bio-líquidos	Matriz energética renovável e ambientalmente menos impactante; Redução na geração de gases de efeito estufa (GEE); Minimização dos custos com o tratamento dos resíduos sólidos; Geração de economia com a venda do excedente produzido;	Requer condições físicas e tecnológicas para a produção de eletricidade via biogás; Investimentos e priorização da produção de eletricidade a partir de fontes renováveis por parte de entidades governamentais;
Compilado de: Carlini et al. (2017); Rajaeifar et al. (2017); Moreda (2016); Rios e Kaltschmitt, (2016); Al Hamamre et al. (2017)			
Digestão anaeróbia: biodigestores	Degradação biológica de substâncias orgânicas na ausência de oxigênio	Conversão de resíduos em biogás e biofertilizante; Minimização de emissão de gases nocivos; Economia financeira advinda da substituição do fertilizante químico pelo biofertilizante; Eficiência e baixo custo de se produzir energia de maneira limpa;	Necessidade de estudos mais aprofundados quanto à aplicação do biofertilizante no solo; Problemas técnicos existentes no funcionamento nos casos dos biodigestores domésticos; Emissão de gases nocivos quando fora dos padrões ideais de digestão;
Compilado de: Zhang, Hu e Lee (2016); Rajaeifar et al. (2017); Hyman e Bailis (2018); Garfi, et al.(2016); Jyothilakshmi e Prakash (2016)			
Incineração	Queima em fornos ou usinas de resíduos em altas temperaturas	Redução do volume e massa dos resíduos e eliminação de patógenos; Produção de energia renovável; Mineralização de substâncias orgânicas em produtos inofensivos;	Altos custos de operação do processo; Viável para resíduos não biodegradáveis com baixo teor de umidade; Emissão de gases poluentes e presença de metais pesados nas cinzas;
Compilado de: Aleluia e Ferrão (2017); Makarichi, Jutidamrongphan e Techato (2018); Brunner e Rechberger (2015); Tan et al. (2014); Lombardi, Carnevale e Corti (2015)			
Fonte: Elaborado pelo autor, (2020).			

2.2.1 Compostagem

De acordo com Sanchez et al. (2015), compostagem define-se como uma forma ecológica de tratamento dos resíduos orgânicos por meio da degradação biológica (aeróbia) da matéria orgânica. Oliveira et al. (2017) afirmam que este processo fornece a reciclagem de nutrientes e a natural restituição deles aos respectivos ciclos biológicos, minimizando assim os impactos decorrentes de sua disposição em locais incorretos. Para Dhamodharana et al. (2019) trata-se de um método natural onde reações bioquímicas envolvendo milhões de populações microbianas atuam sob controle aeróbico, de umidade, relação C/N e outros fatores, na decomposição da matéria orgânica, resultando em um produto estabilizado e rico em nutrientes. Em outras palavras, na compostagem é realizado o tratamento da matéria orgânica em condições controladas, onde ocorre o desprendimento de gás carbônico, água – na forma de vapor – e energia por causa da ação dos microrganismos que realizam a decomposição dessa matéria de forma anaeróbia (LOUREIRO et al. 2007).

Bong et al. (2017) descrevem a compostagem como uma estratégia de mitigação das emissões gasosas de efeito estufa, reduzindo consideravelmente a entrada de resíduos orgânicos em aterros e o volume destinado aos mesmos, aumentando sua vida útil e evitando a geração de chorume, além de promover a reciclagem de nutrientes e a produção de biofertilizante. O valor agrônômico deste, de acordo com Boldrin et al. (2010), consiste na promoção do crescimento de espécies vegetais, melhoria na estrutura do solo e na minimização do uso de fertilizantes químicos. Aleluia e Ferrão (2017) afirmam que a compostagem está entre os tratamentos biológicos com maior viabilidade técnica e econômica no âmbito dos países asiáticos. Contudo, a garantia dos padrões de segregação dos resíduos requeridos pelas plantas de operação e o investimento em programas de conscientização para aplicação desta prática, evidenciam a necessidade de uma atenção direcionada ao tema por parte das entidades governamental e privada.

Desta forma, segundo Cerda et al. (2018), a compostagem, por sua eficiência no tratamento de resíduos orgânicos e produção de um precioso composto capaz de realizar alterações significativas no solo, se apresenta como um processo que deve ser valorizado no âmbito da gestão de resíduos. Entretanto, fatores como emissões gasosas, sucessão microbiana e seu impacto no produto, além do condicionamento da matéria-prima (resíduos) necessitam ser pontuados a fim de abonar a sustentabilidade deste método de tratamento.

O tratamento dos resíduos orgânicos através da compostagem pode ocorrer por configurações diversas, sendo tradicionais as leiras, pilhas e composteiras (Figura 6). A opção pelo tipo de compostagem está condicionada ao volume dos resíduos orgânicos gerados e disponíveis, espaço físico para implementação do processo e investimentos em curto prazo.

Figura 6: Padrões de compostagem, sendo: a) leiras, b) pilhas, c) composteira doméstica.



Fonte: a) Alejandra et al. (2018), b) The Ohio State University (2019), c) Adaptado de Zhou et al. (2020).

A implantação de compostagem domiciliar obteve nos últimos anos um ascendente crescimento em todo o mundo. Em um de seus estudos, Zhou et al. (2020) analisaram o potencial de uma composteira para uso doméstico, sendo comprovada a eficiência do processo e a qualidade do composto final, além de sua viabilidade técnica e econômica. Neugebauer e Sołowiej (2017) também estudaram a compostagem dos resíduos orgânicos domiciliares na Polônia, onde apontam como benefícios desta prática, a economia de energia advinda do transporte e descarte dos resíduos, baixo impacto ambiental e não exigência de tratamento diferenciado. Resultados homônimos foram obtidos por Manu, Kumar e Garg (2019), que utilizaram tambores plásticos como composteiras para tratar a fração orgânica dos resíduos sólidos, com o objetivo de disponibilizar uma solução de baixo custo e eficaz para os países em desenvolvimento.

No Brasil, Siqueira e Assad (2015) destacam a existência de empresas que prestam serviços a órgãos públicos e privados, referentes à implantação da compostagem, com métodos naturais e tecnologias mais modernas, como bioaceleradores e compositores elétricos, visando a possibilidade e necessidade de diversificação da gestão dos resíduos municipais e seu tratamento mais próximo ao local de geração. Segundo os mesmos autores, algumas instituições optam pela autogestão desta prática, buscando métodos menos complexos, uma vez que este tem papel fundamental nos custos do sistema. Ferreira et al. (2018) estudaram a aplicação do biofertilizante produzido em escala domiciliar em culturas de tomate, obtendo resultados satisfatórios, como o aumento da biomassa da planta através da assimilação de nutrientes no tecido foliar.

2.3 PRINCIPAIS PARÂMETROS DO PROCESSO DE COMPOSTAGEM

2.3.1 Umidade

A umidade é responsável pela manutenção da atividade microbológica durante o processo de decomposição da matéria orgânica. Isso se deve em grande parte pela constituição física dos microrganismos, que possuem basicamente 90% de água em sua estrutura e na produção de novas células, sendo a água obtida do meio. Adicionado a isso, é necessária a dissolução dos nutrientes indispensáveis para o desenvolvimento celular em água, antes de sua assimilação (ALEXANDER, 1977).

Sendo assim, segundo Merkel (1981) a decomposição será realizada em condições ótimas quando a umidade estiver entre 40 e 60%, especialmente durante a fase inicial, uma vez

que a água presente nesta etapa auxilia no crescimento dos organismos fundamentais do processo e para que as reações bioquímicas ocorram adequadamente.

Fernandes e Silva (1999) afirmam que o teor de umidade do composto tende a diminuir ao longo do processo devido à aerobiose, por isso, se faz tão importante o monitoramento deste parâmetro. Logo, a faixa ideal de umidade, de modo geral, situa-se entre 50 e 60%. Os autores destacam que a umidade está diretamente ligada à eficácia da aeração, uma vez que, valores superiores à 65% podem originar a ocupação de espaços vazios pela água, o que conseqüentemente favorece o desenvolvimento de anaerobiose durante o processo. Ao se considerar valores inferiores a 40% a inibição da atividade biológica pode acarretar a diminuição na velocidade de degradação.

O teor de umidade também tem relação direta com a emissão de gases nocivos ao meio ambiente durante a compostagem. De acordo com Ermolaev et al. (2019) quando o teor de umidade é acima de 66%, um alto índice na produção de CH₄ e N₂O pode ser constatado. Em contrapartida, quando este se encontra na faixa de 43% a 59%, houve redução nas emissões de N₂O em cerca de 77%. Além disso, segundo Thomas et al. (2020) manter o teor de umidade do composto em uma faixa ótima auxilia na redução de patógenos, como bactérias.

2.3.2 Temperatura

A temperatura se apresenta como um parâmetro básico de avaliação do progresso do processo de compostagem, indicando a taxa de atividade microbiana (MANU; KUMAR; GARG, 2019). A evolução da temperatura é conexas com fatores como a presença materiais ricos em proteínas, baixa relação Carbono/Nitrogênio, umidade, granulometria e aeração. (OLIVEIRA; SARTORI; GARCEZ, 2008). A aeração, por exemplo, pode ser utilizada como um método de controle da temperatura, uma vez que em determinados processos, o ar comprimido introduzido na massa do composto pode ser de 5 a 10 vezes maior do que o estritamente necessário à respiração microbiana, tendo assim função de dissipar o calor liberado no processo (FERNANDES; SILVA, 1999).

De acordo com Cunha Queda (1999) são três fases que demarcam a evolução deste parâmetro durante o processo: mesofílica inicial e termofílica, que correspondem às fases ativas do processo, e mesofílica final, sendo o resfriamento gradual ou fase de acabamento.

Iguchi (2008) afirma que na fase mesófila os micro-organismos presentes utilizam os componentes solúveis e rapidamente degradáveis da matéria orgânica. Sequencialmente, Rodrigues (2004) diz que, ao se elevar a temperatura estes mesmos organismos tornam-se

menos competitivos, ocorrendo sua substituição pelos termófilos (fase termófila). No final da fase termófila, Conceição (2012) descreve a ocorrência da diminuição da temperatura, tendo início a fase criófila, onde o composto atinge uma temperatura próxima à do ambiente.

Segundo Oliveira, Lima e Cajazeira (2004), temperaturas de 40 a 60 °C dentro do segundo ao quarto dia do processo de compostagem são indicadores de condições satisfatórias de equilíbrio. Estudos demonstram que altas temperaturas na fase termofílica (> 55 °C à 70°C) podem efetivamente eliminar microrganismos patogênicos, parasitas e até mesmo tetraciclina residuais (YU et al., 2019; MANU; KUMAR; GARG, 2019).

2.3.3 pH

O pH é considerado um parâmetro para o desenvolvimento regular do processo de compostagem. No início da degradação, devido à produção de ácidos orgânicos, o pH decresce até valores próximo a 5. Em seguida, ocorre um aumento gradual justificado pela hidrólise das proteínas e liberação de amônia. Com o decorrer do tempo, o pH se estabiliza, sendo a faixa ótima entre 7 e 8, mantendo-se assim até o fim do processo (OLIVEIRA; SARTORI; GARCEZ, 2008). Os mesmos autores destacam que valores muito baixos de pH (< 5) podem indicar uma possível ocorrência de processos anaeróbios ou a falta de maturação relacionado à curta duração do processo.

Em um de seus estudos, Wang et al. (2017) constataram que um pH inicial entre 5-6 foi benéfico para a maturação do composto dentro do tempo previsto, enquanto no mesmo experimento, um pH de partida 4 resultou em um maior tempo gasto para maturação. Tello-Andrade et al. (2015) destaca que no decorrer do processo de compostagem o aumento gradual do pH é comum, devido à biodegradação de substâncias ácidas e à produção de nitrogênio inorgânico. Yang et al., (2013) confirma que a recomendação do valor de pH para o biofertilizante está entre 7,0 e 8,5, o que é comumente preconizado.

2.3.4 Granulometria dos resíduos

De acordo com Kiehl (1998) e Andreoli (2001), a dimensão das partículas dos resíduos propicia o acréscimo na aeração, porosidade e homogeneidade da massa. Granulometrias menores aumentam a área superficial em contato com os microrganismos, e conseqüentemente, elevam as taxas das reações bioquímicas e a degradação dos materiais. Entretanto, partículas muito pequenas tendem a favorecer a compactação durante o processo de compostagem,

comprometendo a aeração (OLIVEIRA; SARTORI; GARCEZ, 2008). Fernandes e Silva, (1999) afirmam que em alguns estudos, substratos com porosidade de 30 a 36% apresentaram condições ótimas de compostagem e que, de modo geral, o tamanho das partículas deverá estar entre 25 e 75 mm, para ótimos resultados.

Similarmente, Zhang e Sun (2014) asseguram que a granulometria ideal dos resíduos orgânicos garante elevadas taxas de permeabilidade de aeração e de água, o que resulta em inúmeros benefícios para o processo, como a adequada repartição de tamanho das partículas, ascensão da população microbiana e de atividades enzimáticas, faixa de pH favorável, diminuição da razão C/N. Assim, a taxa de degradação biológica é elevada, causando a maturação do composto em menor tempo, porém garantindo sua qualidade final.

2.3.5 Aeração

A aeração é apontada por Oliveira, Lima e Cajazeira (2004) como um parâmetro determinante na correta condução do processo de compostagem, essencialmente na etapa onde a atividade dos microrganismos é intensa, garantindo a oxidação de substâncias orgânicas e a respiração microbiana. Quando a oxigenação é deficitária, ocorre a proliferação e predomínio de organismos anaeróbios, que provocam a geração de gases com maus odores, como o ácido sulfídrico, mercaptanas e outros produtos contendo enxofre (KIEHL, 1998).

Assim, a compostagem é um processo predominantemente aeróbio, sendo a disponibilidade de oxigênio fator determinante na transformação da matéria, na retirada do excesso de calor, de gases, vapor de água e controle de odores (MASSUKADO, 2008). A aeração permite o desenvolvimento de altas temperaturas, as reações de oxigenação e oxidação e um menor tempo de degradação da matéria orgânica (KIEHL, 1998). Parâmetros como a umidade estão diretamente relacionados à aeração, uma vez que quanto mais úmidos estiverem os resíduos orgânicos mais deficiente será sua oxigenação, sendo necessário o controle de umidade e posteriormente a introdução de métodos de insuflação de ar (OLIVEIRA; SARTORI; GARCEZ, 2008).

De acordo com estudos recentes de Shimizu et al. (2018) a compostagem obtém resultados mais satisfatórios quando adicionada a aeração contínua ou intermitente. Ge et al. (2020) afirmam que diferentes taxas de aeração afetam diretamente a sucessão de comunidades bacterianas através das variações temperatura na fase mesofílica, teor de umidade na fase termofílica e condutividade elétrica na fase de resfriamento. No geral, segundo Wu et al. (2019)

a aeração afeta a composição da substância húmica que, conseqüentemente, pode afetar as formas de aproveitamento dos produtos de compostagem.

2.3.6 Ativação microbiológica

Diversas espécies de microrganismos compõem o processo de compostagem em diferentes etapas, se destacando as bactérias, protozoários, fungos e actinomicetos (VALENTE et al. 2009). Os microrganismos mesófilos estão presentes na etapa inicial, que tendo a duração prolongada, é acompanhada pela diminuição da relação C/N, comumente abaixo de 20 (FERNANDES; SILVA, 1999). Posteriormente, a população termófila se prolifera intensamente devido ao aumento gradual da temperatura. Estes organismos são extremamente ativos, degradando rapidamente a matéria orgânica e elevando a temperatura, provocando a supressão de microrganismos patogênicos. (CONCEIÇÃO, 2012).

Sendo assim, Wan et al. (2020) confirmam que a inoculação de microrganismos, que em seu estudo foram cultivados em caldo de peptona de extrato de carne, no processo de compostagem aumenta a sua eficiência, além de promover em menor tempo a maturação do composto. Isso se deve à redução considerável do conteúdo de NH_4^+ na etapa de resfriamento. Além disso, foram obtidos benefícios na conversão de nitrogênio e nos níveis de humificação. As emissões de NH_3 e N_2O também foram minimizadas quando realizada esta prática (YUA et al., 2020). Segundo Jiaqin et al. (2019) a inoculação microbiológica, de organismos presentes em cascas de frutas, influencia na elevação mais rápida da temperatura de compostagem, na degradação da matéria orgânica e na eficiência do biofertilizante, uma vez que proporciona a abundância e diversidade de comunidades bacteriana. Obtendo resultados similares, Muscope (2017) utilizou a inoculação de microrganismos eficientes obtidos da extração em solo de matas pouco exploradas na compostagem em leiras, concluindo que a quantidade de macronutrientes aumentou, a relação C/N ao final do processo foi satisfatória além da considerável eliminação de patógenos.

2.3.7 Adição de fertilizante sintético

A adição de fertilizantes sintéticos, segundo Jerônimo et al. (2020) colabora em diversos aspectos para a otimização da compostagem, entre eles, a redução no tempo de maturação, a valorização agrônômica do organomineral, menores custos do processo e a possibilidade de

aplicação direta do produto no solo. Liu et al. (2020) destaca também a redução de emissões gasosas e a inibição da perda de material como aspectos positivos desta prática.

Qu et al. (2020) investigaram os efeitos da adição de biochar e gesso (G) à palha misturada com esterco de galinha no desempenho da compostagem em diferentes relações C/N iniciais. Os resultados foram positivos pois demonstraram uma diminuição significativa no tempo de compostagem, redução de perda de carbono e nitrogênio, aumento na decomposição de lignocelulose, retenção de nutrientes e um aumento da qualidade final do composto.

Segundo Li et al. (2018) investigaram o desempenho do fertilizante fosfogesso e fosfato de cálcio e magnésio na conservação de nitrogênio durante a compostagem de dejetos suínos. Os resultados mostram que o gesso reduziu significativamente a emissão de amônia (NH_3) e que ao misturar esses dois aditivos, uma conservação efetiva de nitrogênio durante o processo de compostagem seria possível. Além disso, esses dois aditivos poderiam melhorar sinergicamente a maturidade e a qualidade do composto.

2.3.8 Relação C/N

O balanceamento da relação C/N é imperativo na compostagem, pois além de favorecer condições de fixação dos nutrientes e caracterizar o equilíbrio da matéria-prima utilizada (FERNANDES; SILVA, 1999) este parâmetro é essencial na determinação do grau de maturação do composto, sendo um indicador das fases em que se encontra o processo (VALENTE et al. 2009). Sendo assim, quanto maior a diversidade de nutrientes disponíveis, melhor será a decomposição da matéria orgânica, uma vez que o carbono (C) é utilizado como fonte de energia e o nitrogênio (N) na síntese de proteínas, o que beneficia o crescimento celular.

Para Fernandes e Silva, (1999), a relação C/N inicial propícia é de 30:1, o que colabora com a aceleração do processo. YU et al., (2020) descreve como sendo ideal a proporção C/N de 25 a 30:1 para se manter no processo de compostagem, devido à influência deste fator sob aspectos como valores de pH, degradação de lignocelulose, geração de calor e melhora na humificação. Kiehl (1998) e Iguchi (2012), afirmam que, para se entender o andamento do processo de compostagem é essencial o acompanhamento deste parâmetro, uma vez que a bioestabilização do composto ocorre quando a relação C/N se estabelece próximo de 18:1, e sua maturidade (produto humificado) em torno de 10:1.

Quando este equilíbrio não é alcançado, podem ocorrer desajustes no processo que limitam as atividades microbianas, como por exemplo a perda de nitrogênio por volatilização da amônia, quando a relação C/N estiver inferior ao desejável e na situação inversa, os

microrganismos terão seu desenvolvimento inibido, pois não encontrarão nitrogênio suficiente para a síntese de proteínas (FERNANDES; SILVA, 1999; CONCEIÇÃO, 2012).

3 METODOLOGIA

Nesta seção está apresentada a metodologia experimental, bem como materiais e instrumentos que foram empregados no desenvolvimento do estudo.

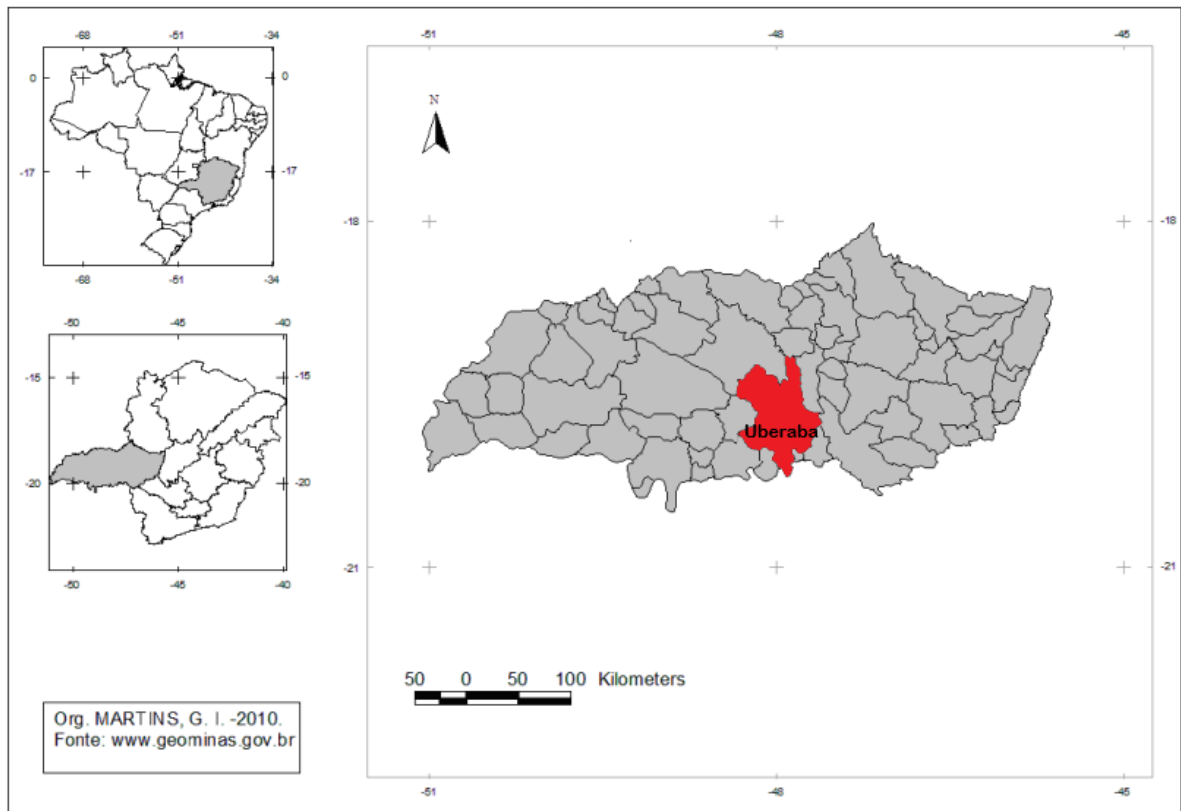
3.1 ÁREA E QUALIFICAÇÃO DO ESTUDO

A área de estudo corresponde à cidade de Uberaba, que abrange 4.530 km², localizada no interior do estado de Minas Gerais. O município possui população estimada de 333.783 habitantes em 2019 e densidade demográfica de 65,43 hab/km², segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010). Situado na microrregião do Triângulo Mineiro (Figura 7), com latitude Sul 19°45'27" e longitude Oeste a 47°55'36", possui altitude máxima, mínima e média igual a 1031 m, 522 m e 765 m, respectivamente. Os municípios limítrofes a Uberaba são Água Comprida, Conceição das Alagoas, Conquista, Delta, Indianópolis, Nova Ponte, Sacramento, Uberlândia e Veríssimo. Especificamente, o experimento de compostagem será conduzido no bairro Pontal, da referida cidade.

Inicialmente, fez-se necessário o acompanhamento quantitativo e qualitativo da geração de resíduos orgânicos de 3 residências com características sociais, econômicas e físicas distintas, com a finalidade de projetar adequadamente as dimensões do equipamento (composteira doméstica). Considerando a classificação gravimétrica e temporária da produção de resíduos orgânicos destes locais acima citados, foi possível a obtenção de uma amostragem para adequação e dimensionamento do projeto .

A composteira doméstica foi instalada em um apartamento de 45 m², composto de 2 quartos, 1 banheiro social, sala e cozinha conjugadas, em que residem 2 pessoas, com faixa etária entre 28 e 32 anos. Os resíduos orgânicos direcionados à compostagem foram derivados de 4 refeições principais (café da manhã, almoço, café da tarde e jantar), sendo caracterizados em três grupos de alimentos: vegetais e legumes (cascas e pedaços de cenoura, tomate, batata, pepino, couve, alface, cebola, alho); frutas e carboidratos (cascas e pedaços de laranja, banana, melancia, mexerica, abacaxi, uva, pão francês, pão de queijo, bolos, arroz, feijão, macarrão); carnes (bovina, suína, peixe e frango).

Figura 7: Localização de Uberaba-MG.



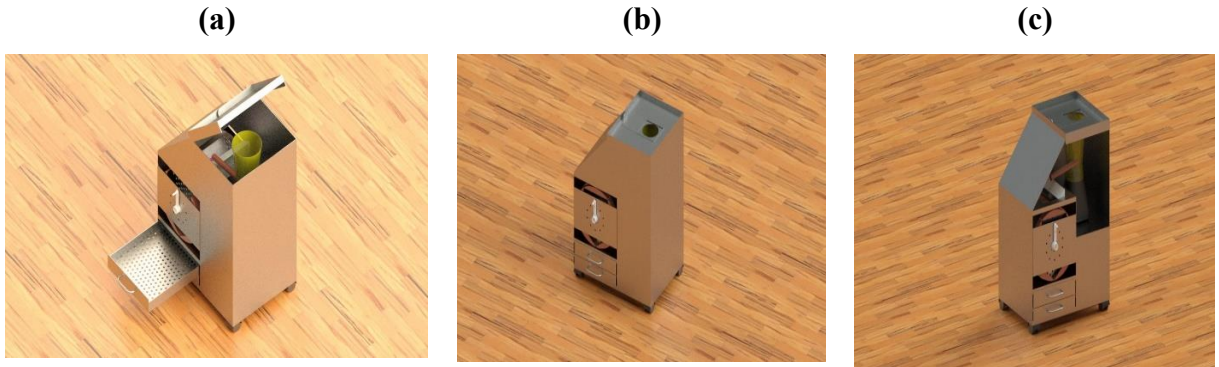
Fonte: Adaptado de Souza e Júnior, (2013).

3.2 COMPOSTEIRA DOMÉSTICA

A composteira doméstica foi construída conforme protótipo apresentado na Figura 8. O material empregado na construção do equipamento foi o aço carbono (SAE-1020). Pode-se destacar como macro constituintes do equipamento:

- Triturador;
- 5 compartimentos de armazenamento interno dos resíduos orgânicos triturados;
- Caixa coletora de resíduos líquidos;
- Caixa coletora do biofertilizante.

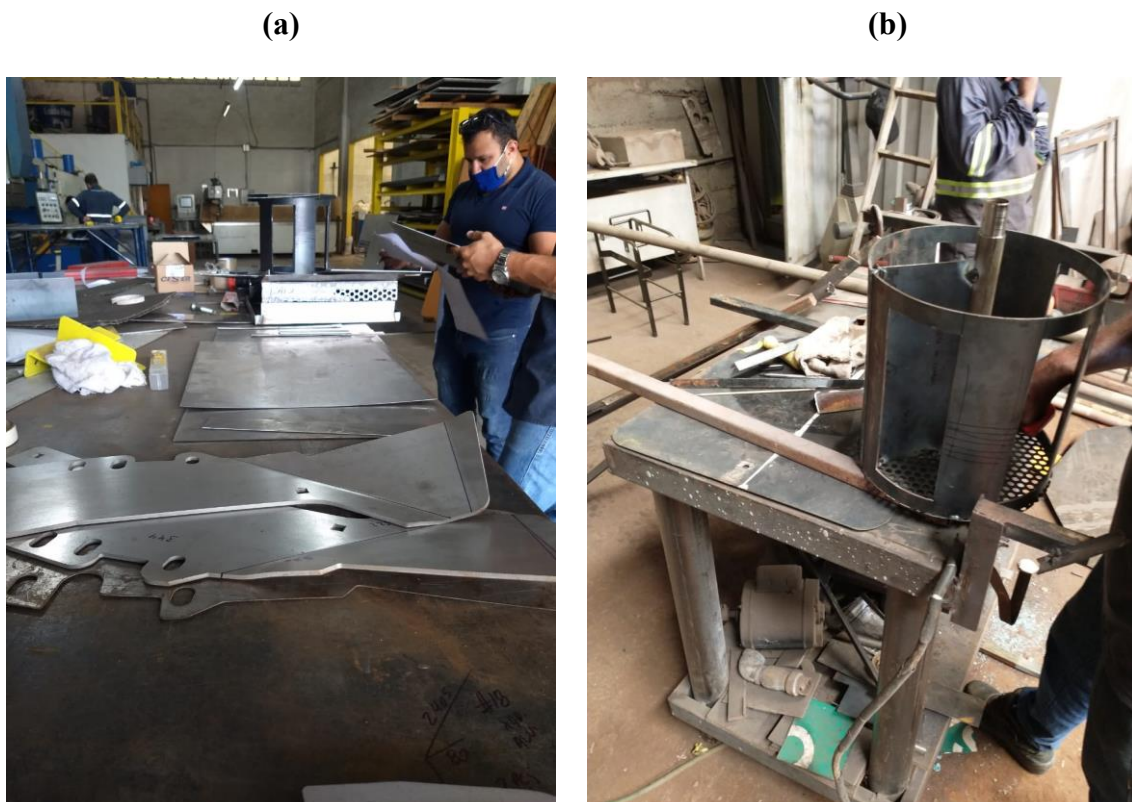
Figura 8: Protótipo da composteira doméstica, sendo: a) vista superior com abertura superior; b) vista superior externa; c) vista lateral com abertura interna.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2021).

As ilustrações das etapas de construção e do projeto finalizado estão demonstradas na Figura 9.

Figura 9: Etapas de construção e composteira doméstica finalizada, sendo: a) recepção das peças do equipamento; b) construção do tambor de rotação; c) construção da estrutura externa; d) finalização da montagem; e) vista lateral do equipamento finalizado; f) vista superior interna do equipamento finalizado.



(c)



(d)



(e)



(f)



Fonte: Elaborado pelo autor, (2021).

O funcionamento do equipamento pode ser descrito em 3 etapas principais, conforme exposto a seguir:

- 1ª etapa: Introdução e armazenamento dos resíduos orgânicos na composteira

A composteira é constituída por 5 compartimentos de armazenamento interno, com capacidade de até 2 kg de material. A entrada dos resíduos orgânicos na composteira (Figura 10) se dá através de uma caixa onde são triturados por um liquidificador, garantindo assim a homogeneidade dos grânulos. Este liquidificador possui uma saída que se encaixa na abertura do compartimento (gaveta). Importante ressaltar que a introdução simultânea do ativador microbiológico neste momento deverá ser feita manualmente no triturador. Esta ativação poderá ser realizada com esterco bovino ou resíduos vegetais que serão fornecidos junto com a composteira na quantidade correta de cada compartimento.

Figura 10: Entrada dos resíduos orgânicos na composteira através do equipamento de trituração.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2021).

- 2ª etapa: Revolvimento manual e maturação do composto

Faz-se necessária a aeração periódica do composto afim de se evitar a compactação e atividade anaeróbia no mesmo. Sendo assim, o equipamento possui uma alavanca (Figura 11) que permitirá a rotação do tambor, possibilitando assim o revolvimento do composto.

Figura 11: Tambor de rotação e válvula para revolvimento do composto.

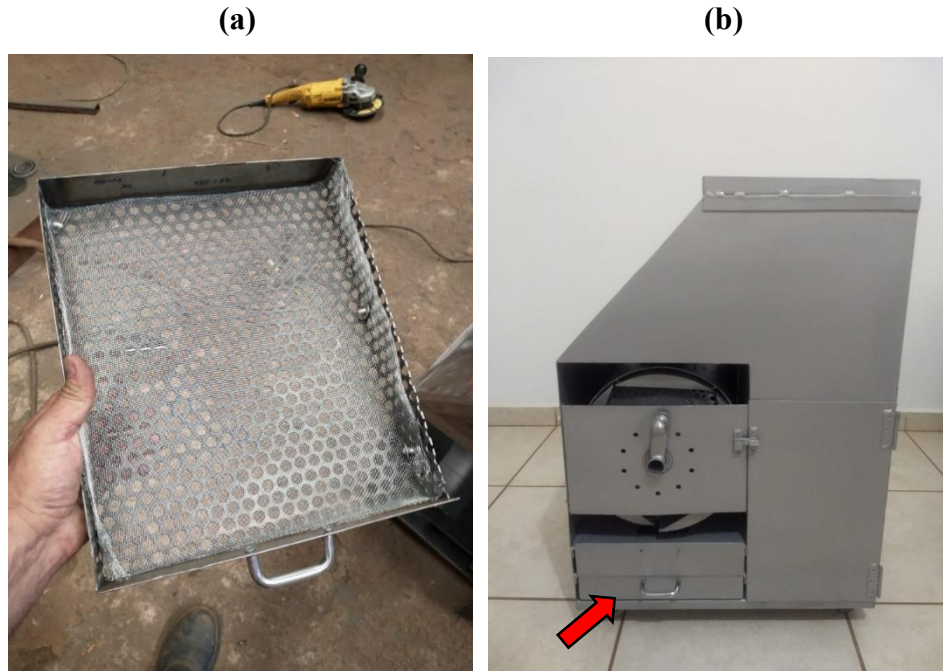


Fonte: Elaborado pelo autor, (2021).

- 3ª etapa: Retirada do biofertilizante maturado

A retirada do composto dos compartimentos é efetuada através da abertura da guilhotina de descarga, que o direcionará para a caixa coletora de sólido (Figura 12). Esta apresenta a estrutura de uma gaveta, podendo ser retirada para transporte do material.

Figura 12: Retirada do composto após a finalização do experimento, sendo: a) gaveta de coleta do composto; b) gaveta de coleta do composto dentro da composteira.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2021).

3.3 OTIMIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO

Levando em consideração a relevância de otimizar as variáveis envolvidas no processo de compostagem e a necessidade de um planejamento experimental eficaz, o Delineamento Composto Central Rotacionado (DCCR) foi escolhido. Esta decisão se deve ao fato que a metodologia encontrada no DCCR permite que, através de procedimentos estatísticos e matemáticos sejam estudadas inter-relações entre uma ou mais respostas (variáveis dependentes) com inúmeros fatores (variáveis independentes). Este planejamento fatorial reduz o número de experimentos com melhor qualidade de informação nos resultados, permite a detecção de erros experimentais e sua avaliação, e através da análise multivariável admite verificar e quantificar efeitos sinérgicos e antagônicos entre as variáveis estudadas.

O DCCR foi definido com repetição em triplicata no ponto central para cada uma das matrizes, sendo os fatores e intervalo de grandeza das variáveis adotadas: X_1 : Tempo de compostagem (dias); X_2 : Frequência dos revolvimentos (número de vezes por semana); X_3 : Quantidade do inoculante (quantidade percentual da mistura: start microbiológico mais o

fertilizante sintético-NPK, 13-13-13). As variáveis foram analisadas em função da estabilização do organomineral, relação C/N 10:1 (variável resposta). Estas variáveis foram definidas levando em consideração uma revisão na literatura que aponta quais são os fatores mais estudados que impactam o processo de compostagem e na qualidade do composto produzido. Além disso, o conhecimento adquirido previamente pelo orientador deste estudo através de outros trabalhos levaram à esta escolha.

Estando as variáveis e limites definidos, o DCCR prevê a adição de 2 pontos para cada variável estudada, sendo estes os pontos axiais que garantem a rotação do planejamento (BOX; HUNTER, 1978). Logo, serão definidos 6 pontos adicionais, pareados em $-\alpha$ e $+\alpha$, com triplicata no ponto central, totalizando 17 experimentos ($2^k +$ número de réplicas no ponto central $+ \text{número de pontos adicionais}$, em que k é o número de variáveis). A codificação e decodificação das variáveis serão realizadas empregando a Equação 1:

$$X_n = \frac{X_{real} - X_{médio}}{\Delta X / 2} \quad [1]$$

, onde X_n corresponde a variável codificada, X_{real} à variável real, $X_{médio}$ o ponto central de cada variável, e ΔX é a variação entre os níveis inferior e superior da variável real. A análise estatística foi realizada empregando o software Statistica 7.0 da StatSoft.

Os valores limites, no intervalo de trabalho dos experimentos do delineamento, são demonstrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores de trabalho das variáveis abordadas no estudo de compostagem.

Variáveis	Valor real (Valor codificado)		
Tempo de compostagem (X_1)	10 dias (-1)	15 dias (0)	20 dias (+1)
Revolvimento (X_2)	10 vezes (-1)	15 vezes (0)	20 vezes (+1)
NPK (X_3)	4 % (-1)	6% (0)	8 % (+1)

Fonte: Elaborado pelo autor, (2021).

A Tabela 02 evidencia os 17 pontos experimentais definidos, sendo; 8 do planejamento fatorial, 6 pontos axiais adicionados (+ α ; - α) e 3 no ponto central (triplicata).

Tabela 02 - Matriz experimental do DCCR para compostagem.

Experimentos	Valor real (Valor codificado) das variáveis		
	Tempo de compostagem (X_1)	Revolvimento (X_2)	NPK (X_3)
1	10 dias (-1)	10 vezes (-1)	4 % (-1)
2	20 dias (+1)	10 vezes (-1)	4 % (-1)
3	10 dias (-1)	20 vezes (+1)	4 % (-1)
4	20 dias (+1)	20 vezes (+1)	4 % (-1)
5	10 dias (-1)	10 vezes (-1)	8 % (+1)
6	20 dias (+1)	10 vezes (-1)	8 % (+1)
7	10 dias (-1)	20 vezes (+1)	8 % (+1)
8	20 dias (+1)	20 vezes (+1)	8 % (+1)
9	15 dias (0)	15 vezes (0)	6% (0)
10	15 dias (0)	15 vezes (0)	2 % (- α)
11	15 dias (0)	15 vezes (0)	10 % (+ α)
12	15 dias (0)	7 vezes (- α)	6% (0)
13	15 dias (0)	23 vezes (+ α)	6% (0)
14	5 dias(- α)	15 vezes (0)	6% (0)
15	25 dias (+ α)	15 vezes (0)	6% (0)
16	15 dias (0)	15 vezes (0)	6% (0)
17	15 dias (0)	15 vezes (0)	6% (0)

Fonte: Elaborado pelo autor, (2021).

3.4 ANÁLISE DOS PARÂMETROS DO PROCESSO DE COMPOSTAGEM

Na otimização das variáveis do processo de compostagem: tempo de maturação do biocomposto, revolvimento e adição do inoculante, foram monitorados diariamente e semanalmente a porcentagem de umidade, a temperatura, o pH e a relação C/N.

3.4.1 Teor de umidade

O método de secagem utilizado foi o forno de microondas (FMO) para determinação da umidade (W). As amostras foram coletadas de cada compartimento (gaveta) diariamente. O microondas utilizado possui as seguintes características: Marca Dako, modelo MODK018SD2A1B, capacidade de 18 L, tensão de alimentação de 127 V, potência nominal 1200 W e frequência de 2450 MHz, estando alocado na residência onde o experimento foi conduzido.

Seguindo a metodologia de Lacerda, Freitas e Silva (2009), inicialmente foram coletadas 10 gramas de cada amostra dos compartimentos. As amostras foram retiradas no primeiro dia superficialmente, no segundo dia aproximadamente do meio do compartimento e no terceiro dia do fundo. Esta sequência foi seguida até o fim do tempo de cada experimento. Em seguida, realizou-se a pesagem dos frascos de vidro vazios onde as amostras seriam inseridas. Logo após, as amostras foram inseridas nos respectivos frascos identificados com a numeração de cada gaveta de onde foram coletadas. Assim, os frascos com as amostras foram submetidos a 3 ciclos de 5 minutos, 1 ciclo de 3 minutos, 1 ciclo de 2 minutos e 1 ciclo de 1 minuto até ser atingido o peso constante. Após cada ciclo as amostras foram deixadas em repouso, fora do FMO, para esfriarem. A cada intervalo, as amostras foram revolvidas para tornar o processo de secagem uniforme. No interior do FMO, foi colocado uma jarra de vidro com a capacidade de 500 mL com 150 ml de água com a finalidade de umedecer o ambiente e evitar a queima das amostras.

Após a retirada da amostra, os frascos de vidro com a massa seca (Ms) foram pesados na balança digital de alta precisão (1 g a 10 kg) da marca Clink. A equação 2 foi empregada para determinar o teor de umidade de cada amostra.

$$W = \frac{(Mu - Ms)}{(Mu - Mc)} \cdot 100 \quad [2]$$

, onde: W: teor de umidade (%); Mu: massa do cadinho + massa da amostra úmida (g); Ms: massa do cadinho + massa da amostra seca (g) e Mc: massa do cadinho (g).

3.4.2 Análise da temperatura

Para medição da temperatura foi utilizado um termômetro digital de haste longa, da marca Clink-Tp101 (-50 a 300°C) inserido nos compartimentos, no primeiro dia superficialmente, no segundo dia aproximadamente do meio do compartimento e no terceiro dia no fundo. Esta sequência foi seguida até o fim do tempo de cada experimento. O termômetro foi mantido estático por um período de 2 minutos, até a estabilização da medição. Esta análise foi realizada 1 vez ao dia até o fim do tempo de cada experimento.

3.4.3 Análise pH

As análises de pH foram realizadas com um medidor de pH de bancada (HMMPB-210) alocado no laboratório de Saneamento Ambiental, pertencente ao Departamento de Engenharia Ambiental da UFTM. A frequência das análises foi de 1 vez ao dia, até o fim do tempo de cada experimento. Foram coletadas dos compartimentos no primeiro dia superficialmente, no segundo dia aproximadamente do meio do compartimento e no terceiro dia do fundo. Esta sequência foi seguida até o fim do tempo de cada experimento. Adaptando a metodologia de Jerônimo et al. (2020), cerca de 10 g de cada amostra foram coletadas e levadas ao laboratório. Em um béquer enumerado foi adicionada água destilada no recipiente até atingir um volume de 20 mL. A mistura foi agitada com um bastão de vidro e, posteriormente, submetida a uma filtração simples. Com a amostra filtrada, o eletrodo do pHmetro foi imerso na solução extratora e a leitura do pH realizada.

3.4.4. Análise de Carbono e Nitrogênio

A relação C/N foi calculada através da Equação 3.

$$\text{Relação } C/N = \frac{\% \text{ COT}}{\% \text{ NTK}} \quad [3]$$

, onde: % COT corresponde ao percentual de Carbono Orgânico Total em relação à massa total (%) e a % NTK se refere ao percentual de Nitrogênio total de Kjeldahl em relação à massa total (%).

Foram coletadas 50g de amostra de cada compartimento, no primeiro dia superficialmente, no segundo dia aproximadamente do meio do compartimento e no terceiro dia do fundo. Esta sequência foi seguida até o fim do tempo de cada experimento.

Para a determinação do carbono orgânico total (COT) foi aplicado o método de Tinsley, baseado em Jerônimo et al. (2020). Para a determinação do percentual de NTK, adaptado de Sun et al. (2020), a amostra foi inicialmente seca e moída. Dessa amostra, foi pesado aproximadamente 1 g e misturado a 10 mL de uma solução de ácido sulfúrico com ácido salicílico, deixado em repouso por 12 horas. Em seguida, 50 mL do extrato passou por destilação em meio alcalino, onde posteriormente foi realizada a titulação. Os resultados estão expressos em porcentagem. Essa análise foi realizada em cada compartimento no 1°, 5°, 10°, 15°, 20° e 25° dia do início do processo, a depender do tempo de duração de cada experimento.

3.4.5 Caracterização do biofertilizante maturado

Na caracterização do biofertilizante, enviou-se uma amostra de 50 g para laboratório terceirizado, do experimento otimizado. As análises dos teores de matéria orgânica, macronutrientes: Nitrogênio (N), Fósforo (P_2O_5), Potássio (K_2O), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e micronutrientes: Ferro (Fe) e Zinco (Zn), além de pH, saturação por base, soma de bases e capacidade de troca catiônica foram realizadas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 TESTES PRÉ-OPERACIONAIS NA COMPOSTEIRA DOMÉSTICA

Fizeram-se necessários a realização de testes pré-operacionais para a verificação de parâmetros inerentes ao processo de compostagem, além de se conhecer o real comportamento do equipamento perante a quantidade e qualidade dos resíduos orgânicos que seriam utilizados.

Os primeiros testes objetivaram a verificação da massa ideal do composto que seria inserida nos compartimentos, de forma que essa quantidade fosse adequada para o correto andamento do processo de compostagem, buscando a faixa ideal de valores dos parâmetros de monitoramento como pH, umidade e temperatura. Nestes testes, cada compartimento recebeu valores diferentes de massa de resíduos orgânicos (0,5 kg, 1 kg, 1,5 kg e 2,0 kg), sendo a gaveta de 1,5 kg a que apresentou um comportamento benéfico superior às demais. Diferentes foram as adversidades encontradas, como: geração de odores, perda rápida de umidade, presença de insetos e deficiência de aeração.

Diante desta definição, os testes seguintes foram importantes para ajustar a composição do material a ser trabalhado, ou seja, qual seria a porcentagem de inoculante necessária na mistura. Durante estes experimentos, a faixa de 10 a 15 % de esterco bovino (inoculante) em aproximadamente 1,3 kg de resíduos orgânicos se mostrou satisfatória, obtendo 1,5 kg de composto final em cada compartimento. Esta estruturação foi importante principalmente para o controle de umidade e, em alguns casos, quando apesar da utilização do esterco a umidade esteve acima do ideal (60%), o método de prensagem foi utilizado, onde a fração orgânica já triturada foi prensada em um tecido e o resíduo líquido obtido utilizado para aspersão posteriormente nos próprios compartimentos. O aspergimento somente era realizado nos compartimentos que apresentaram o teor de umidade abaixo de 40%, buscando assim a manutenção da faixa ótima deste parâmetro.

Por fim, os testes pré-operacionais também foram importantes para a confirmação das faixas de trabalho escolhidas para as variáveis: Tempo de compostagem (X_1), Revolvimento (X_2) e NPK (X_3). Em todos os experimentos foram observados em quais cenários e valores estas variáveis obtiveram melhor comportamento e se estavam de acordo com o esperado e indicado na literatura.

4.2 CONDUÇÃO DOS EXPERIMENTOS DA MATRIZ EXPERIMENTAL

Os 17 experimentos determinados na matriz experimental foram conduzidos em blocos, conforme descritos na Tabela 3.

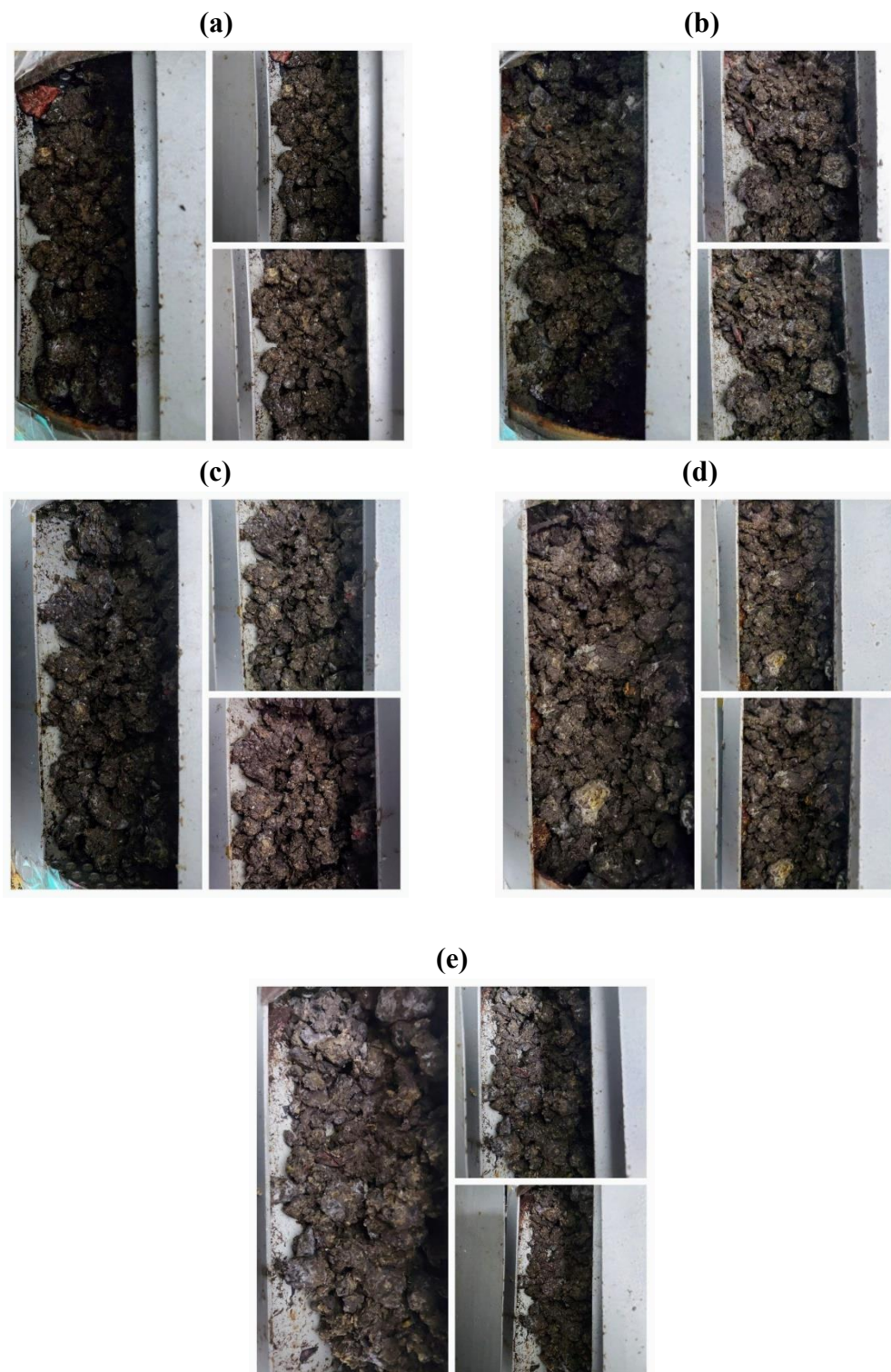
Tabela 03 - Matriz experimental com as datas dos experimentos.

Experimentos	Tempo (X₁)	Revolvimento (X₂)	NPK (X₃)	Data do experimento	Gaveta utilizada
1	10 dias	10 vezes	4 %	10-05-21 à 20-05-21	Gaveta 1
2	20 dias	10 vezes	4 %	21-05-21 à 10-06-21	Gaveta 1
3	10 dias	20 vezes	4 %	10-05-21 à 20-05-21	Gaveta 2
4	20 dias	20 vezes	4 %	21-05-21 à 10-06-21	Gaveta 3
5	10 dias	10 vezes	8 %	10-05-21 à 20-05-21	Gaveta 3
6	20 dias	10 vezes	8 %	21-05-21 à 10-06-21	Gaveta 2
7	10 dias	20 vezes	8 %	10-05-21 à 20-05-21	Gaveta 4
8	20 dias	20 vezes	8 %	21-05-21 à 10-06-21	Gaveta 4
9	15 dias	15 vezes	6%	30-06-21 à 15-07-21	Gaveta 1
10	15 dias	15 vezes	2 %	14-06-21 à 29-06-21	Gaveta 1
11	15 dias	15 vezes	10%	30-06-21 à 15-07-21	Gaveta 2
12	15 dias	7 vezes	6%	14-06-21 à 29-06-21	Gaveta 3
13	15 dias	23 vezes	6%	30-06-21 à 15-07-21	Gaveta 4
14	5 dias	15 vezes	6%	10-05-21 à 15-05-21	Gaveta 5
15	25 dias	15 vezes	6%	21-05-21 à 10-06-21	Gaveta 5
16	15 dias	15 vezes	6%	14-06-21 à 29-06-21	Gaveta 2
17	15 dias	15 vezes	6%	30-06-21 à 15-07-21	Gaveta 3

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2021).

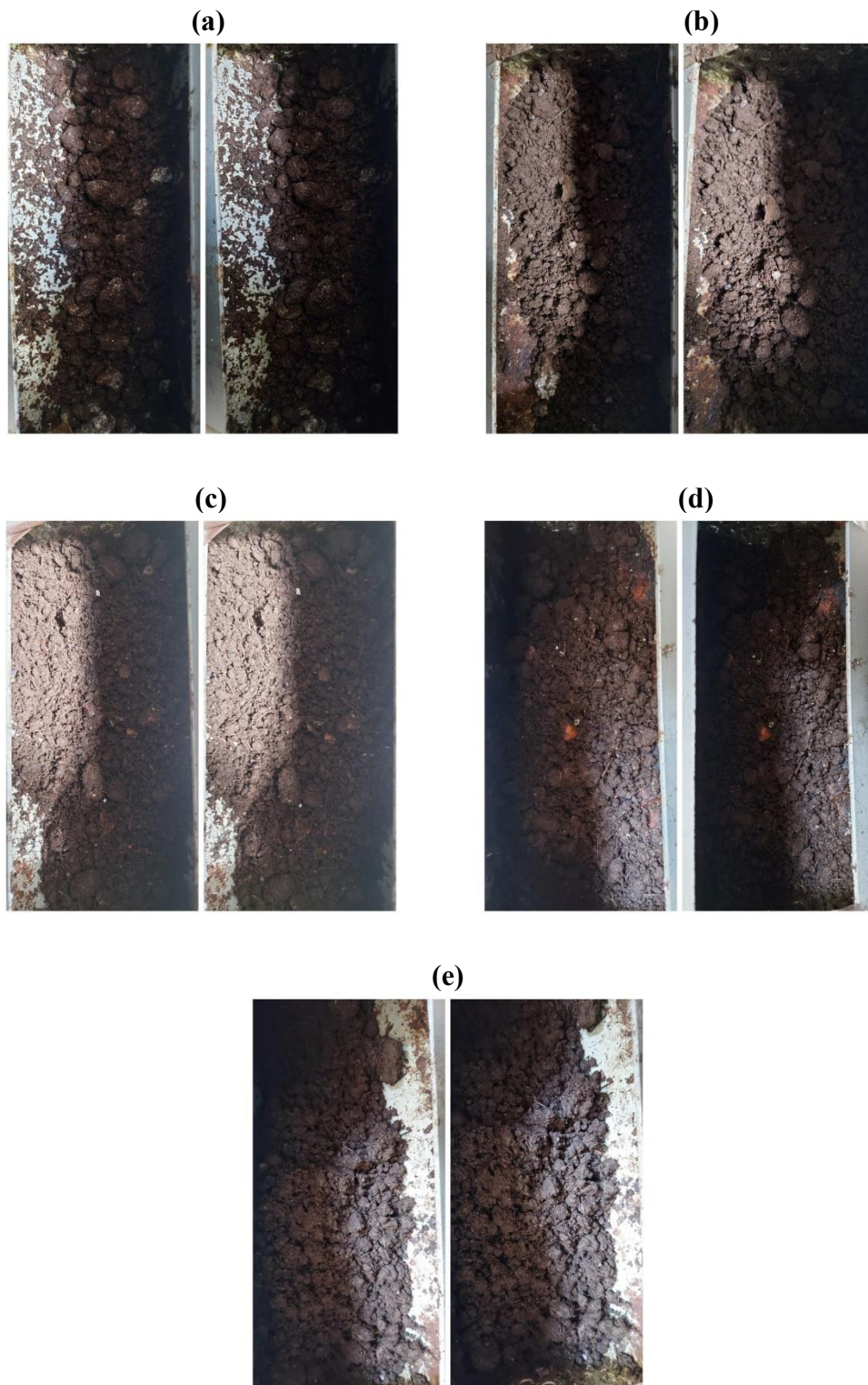
Os experimentos 1, 3, 5, 7 e 14 formaram o 1º bloco (Figura 13). Os experimentos 2, 4, 6, 8 e 15 formaram o 2º bloco (Figura 14). Os experimentos 10, 12 e 16 formaram o 3º bloco (Figura 15) e por fim, o 4º bloco foi constituído dos experimentos 9, 11, 13 e 17 (Figura 16). A escolha da ordem e composição dos blocos foi exclusivamente casual, com a finalidade de manter a aleatoriedade e a existência de qualquer viés experimental.

Figura 13: Experimentos do Bloco 1 no 5º dia de compostagem, sendo: a) experimento 1; b) experimento 3; c) experimento 5; d) experimento 7; e) experimento 14.



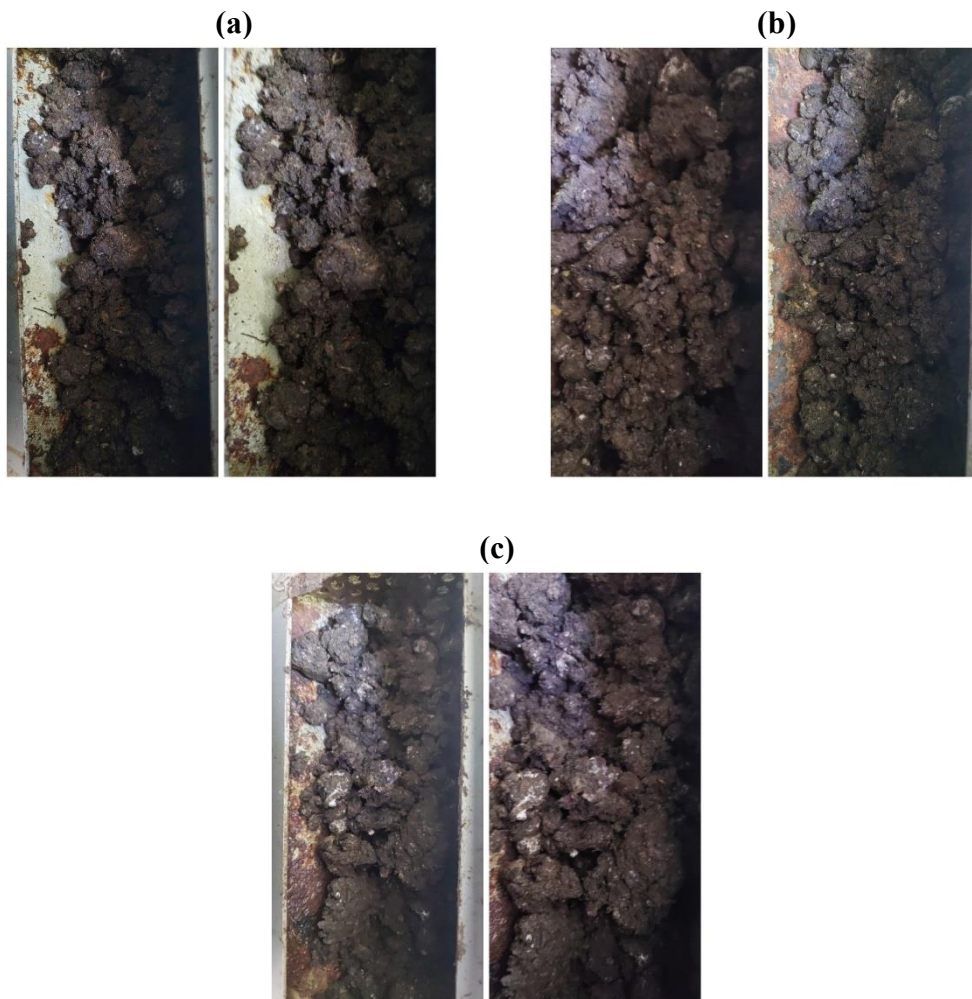
Fonte: Elaborado pelo autor, (2021).

Figura 14: Experimentos do Bloco 2 no 15º dia de compostagem, sendo: a) experimento 2; b) experimento 4; c) experimento 6; d) experimento 8; e) experimento 15.



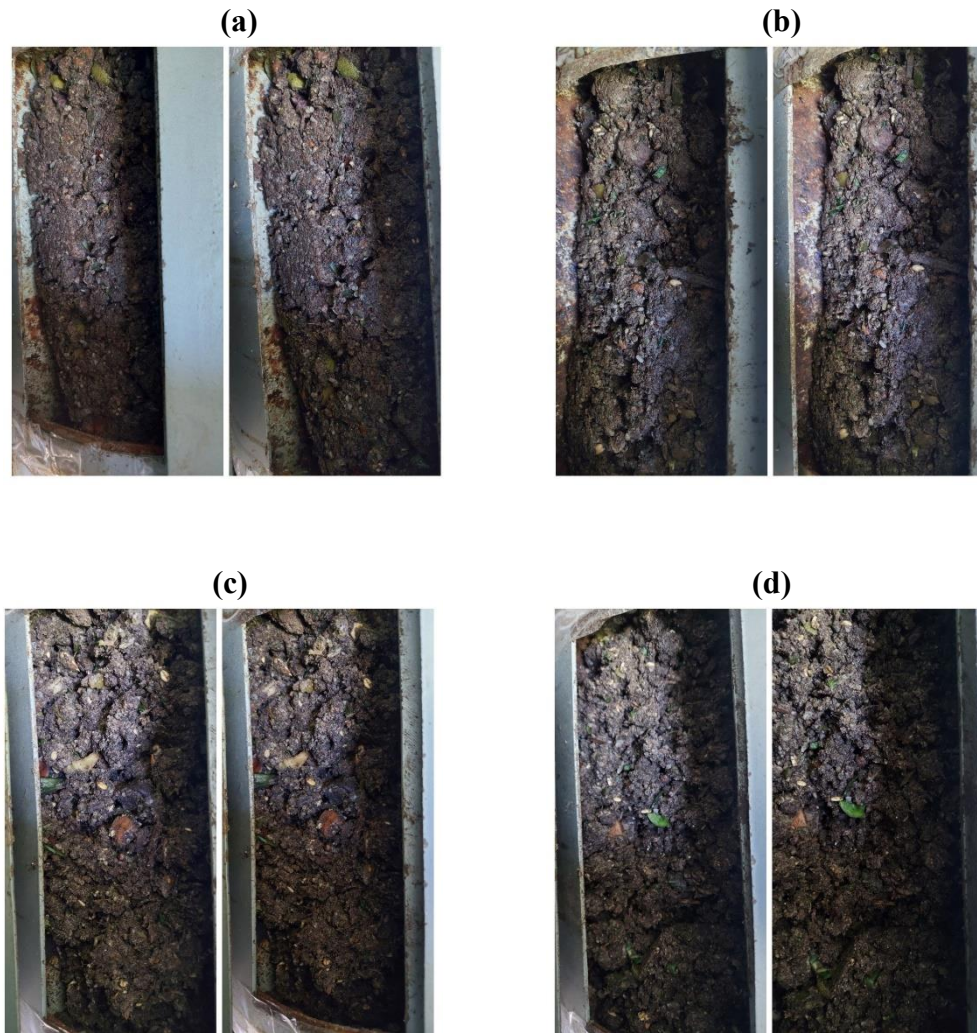
Fonte: Elaborado pelo autor, (2021).

Figura 15: Experimentos do Bloco 3 no 10º dia de compostagem, sendo: a) experimento 10; b) experimento 12; c) experimento 16.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2021).

Figura 16: Experimentos do Bloco 4 no 1º dia de compostagem, sendo: a) experimento 9; b) experimento 11; c) experimento 17; d) experimento 13.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2021).

Faz-se importante ressaltar que durante a condução dos experimentos o equipamento esteve no mesmo ambiente domiciliar, sem alterações de posição, ventilação ambiente ou incidência de luz solar. Sendo assim, seu funcionamento resumia-se em: introdução dos resíduos e inoculante para trituração em cada compartimento, seguindo a ordem estabelecida na matriz experimental; acompanhamento diário dos parâmetros de monitoramento do processo através das coletas de material em cada compartimento; revolvimento para aeração através da válvula inserida no tambor de rotação, obedecendo cada valor estabelecido na matriz

experimental e, ao fim de cada experimento, abertura da guilhotina (tampa) do compartimento para coleta do composto, que caía na gaveta coletora de sólidos.

Os dados quantitativos da massa inicial e final, bem como a composição e proporção de materiais que compuseram cada experimento estão demonstrados na Tabela 4.

Tabela 04 – Experimentos: composição, peso final e porcentagem de redução.

Experimento	Posição	Composição	NPK adicionado (gramas)	Peso final (gramas)	Redução (%)
1	Gaveta 1	1,5 kg (1,350 kg de resíduo + 150 g de esterco)	60	455	69,7
2	Gaveta 1	1,5 kg (1,275 kg de resíduo + 225 g de esterco)	60	410	72,6
3	Gaveta 2	1,5 kg (1,350 kg de resíduo + 150 g de esterco)	60	513	65,8
4	Gaveta 3	1,5 kg (1,275 kg de resíduo + 225 g de esterco)	60	411	72,6
5	Gaveta 3	1,5 kg (1,350 kg de resíduo + 150 g de esterco)	120	674	55
6	Gaveta 2	1,5 kg (1,275 kg de resíduo + 225 g de esterco)	120	397	73,5
7	Gaveta 4	1,5 kg (1,350 kg de resíduo + 150 g de esterco)	120	603	59,8
8	Gaveta 4	1,5 kg (1,275 kg de resíduo + 225 g de esterco)	120	433	71,1
9	Gaveta 1	1,5 kg (1,275 kg de resíduo + 225 g de esterco)	90	598	60,1
10	Gaveta 1	1,5 kg (1,275 kg de resíduo + 225 g de esterco)	30	475	68,3
11	Gaveta 2	1,5 kg (1,275 kg de resíduo + 225 g de esterco)	150	668	55,5
12	Gaveta 3	1,5 kg (1,275 kg de resíduo + 225 g de esterco)	90	511	66
13	Gaveta 4	1,5 kg (1,275 kg de resíduo + 225 g de esterco)	90	675	55
14	Gaveta 5	1,5 kg (1,350 kg de resíduo + 150 g de esterco)	90	658	56,1
15	Gaveta 5	1,5 kg (1,275 kg de resíduo + 225 g de esterco)	90	487	67,5

16	Gaveta 2	1,5 kg (1,275 kg de resíduo + 225 g de esterco)	90	494	67
17	Gaveta 3	1,5 kg (1,275 kg de resíduo + 225 g de esterco)	90	565	62,3

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2021).

De acordo com Kiehl (1998) a compostagem dos resíduos domiciliares deve apresentar uma redução de massa superior a 50% para ser considerada satisfatória e vantajosa. Em seus estudos Freitas, Wieser e Stefanutti (2017) obtiveram reduções de massa superiores a 82%. Karnchanawong e Nissaikla (2014) apresentaram resultados de reduções na faixa de 75 a 80%. A média de redução da massa dos experimentos de Jerônimo et al. (2020) foi de 69,25%. Sendo assim, a média de 65% de redução da massa obtida neste estudo corrobora a eficiência da compostagem como tratamento da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos, sendo altamente eficaz na redução do volume e massa destes resíduos.

4.3 OTIMIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO ATRAVÉS DO DELINEAMENTO COMPOSTO CENTRAL ROTACIONADO

Os valores das variáveis e sua codificação na matriz de planejamento e o rendimento no processo de estabilização do composto encontram-se dispostos na Tabela 5.

Tabela 05 - Variáveis de controle, independentes, e variável de resposta, dependente, para estabilização do composto organomineral.

Experimentos	Tempo (X ₁)	Revolvimento (X ₂)	NPK (X ₃)	Rendimento de estabilização (%)
1	10 dias (-1)	10 vezes (-1)	4 % (-1)	66,75
2	20 dias (+1)	10 vezes (-1)	4 % (-1)	69,88
3	10 dias (-1)	20 vezes (+1)	4 % (-1)	68,96
4	20 dias (+1)	20 vezes (+1)	4 % (-1)	84,81
5	10 dias (-1)	10 vezes (-1)	8 % (+1)	69,44
6	20 dias (+1)	10 vezes (-1)	8 % (+1)	90,41
7	10 dias (-1)	20 vezes (+1)	8 % (+1)	70,22
8	20 dias (+1)	20 vezes (+1)	8 % (+1)	80,97

9	15 dias (0)	15 vezes (0)	6% (0)	93,72
10	15 dias (0)	15 vezes (0)	2 % (-α)	68,82
11	15 dias (0)	15 vezes (0)	10 % (+α)	72,51
12	15 dias (0)	7 vezes (-α)	6% (0)	74,90
13	15 dias (0)	23 vezes (+α)	6% (0)	71,58
14	5 dias(-α)	15 vezes (0)	6% (0)	36,52
15	25 dias (+α)	15 vezes (0)	6% (0)	88,57
16	15 dias (0)	15 vezes (0)	6% (0)	94,16
17	15 dias (0)	15 vezes (0)	6% (0)	96,43

Fonte: Elaborado pelo autor, (2021).

Com os dados da resposta evidenciados, seus valores e a matriz experimental foram levados à análise no software Statistica® 7.0 sob distribuição t-Student com intervalo de confiança em 95% e alfa bicaudal de 0,05 para inferência dos fatores e modelo de Delineamento Composto Central Rotacionado (DCCR).

No nível de significância de 95% para o teste t-Student retorna como variáveis significativas ao modelo, o modelo matemático completo representado pela Equação 04.

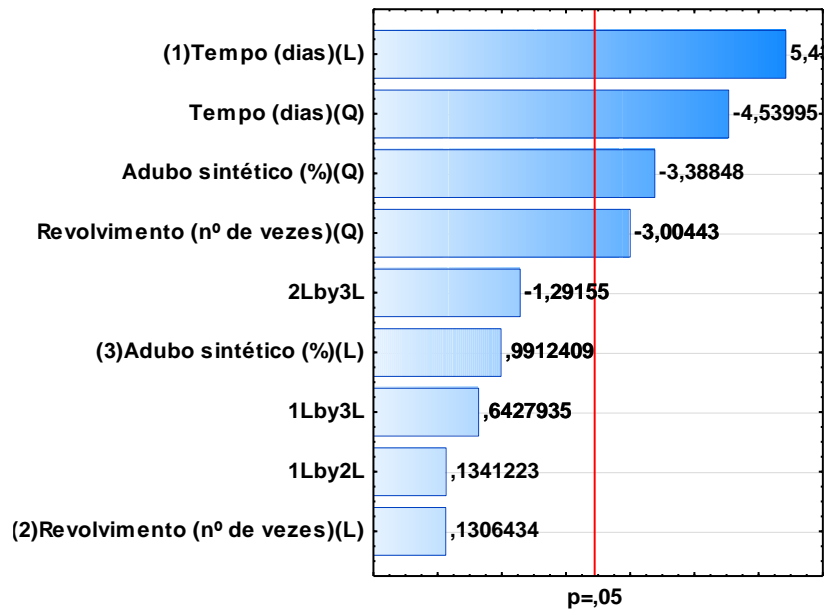
$$E (\%) = -149 -0,320*X_1^2 + 10,364*X_1 - 0,322*X_2^2 + 11,448*X_2 - 1,490*X_3^2 + 21,25*X_3 + 0,013*X_1*X_2 + 0,162*X_1*X_3 - 0,325*X_2*X_3 \quad [4]$$

, onde: E= estabilização; X₁= tempo; X₂= revolvimento; X₃ = NPK.

O ajuste do modelo pelo software retorna um valor de R² de 0,9878 indicando que o modelo matemático obtido pela Equação 04 representa 98,78% dos dados experimentais obtidos. Neto et al. (2013) em seu livro consideram boa aproximação de dados um ajuste de até 90%. A obtenção desta equação permite o ajuste de cada variável de acordo com a necessidade de uso, onde por exemplo, se for desejado um menor ou maior tempo de compostagem, de revolvimentos e de adição de adubo sintético, têm-se a porcentagem de estabilização.

No Diagrama de Pareto apresentado na Figura 17, pode-se observar os efeitos mais significativos no intervalo de confiança de 95%, evidenciando quais são as variáveis de maior influência no experimento e se essa influência atua a favor ou contra o rendimento observado.

Figura 17: Diagrama de Pareto para os efeitos das variáveis de estudo e suas interações.

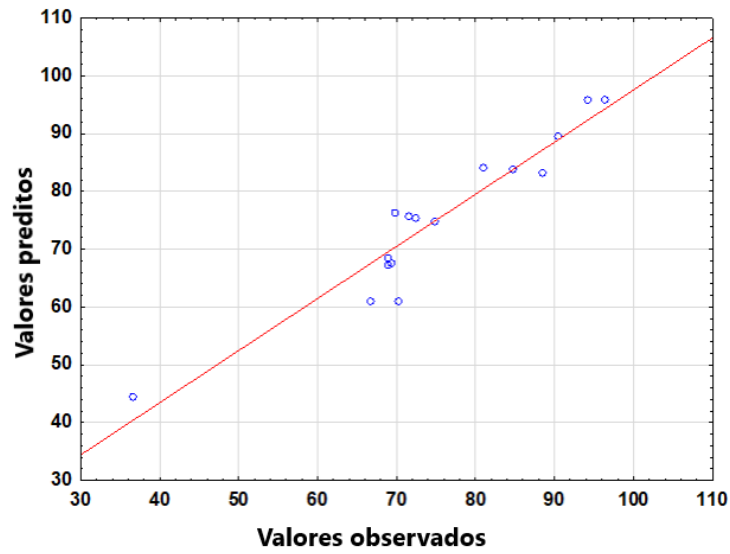


Fonte: Elaborado pelo autor, (2021).

Após a apresentação e análise do gráfico de Pareto podemos apontar que para a estabilização, o efeito linear do tempo (X_1) é mais influente na resposta em caráter positivo, seguido da variável linear do NPK (X_3). O parâmetro quadrático do tempo (X_1^2), juntamente com quadrático do NPK /adubo sintético (X_3^2) e o quadrático do revolvimento (X_2^2) influem de maneira negativa no rendimento.

O modelo aos dados experimentais é corroborado pela Figura 18, com a distribuição dos valores preditos pelos observados em consonância à distribuição normal t-Student.

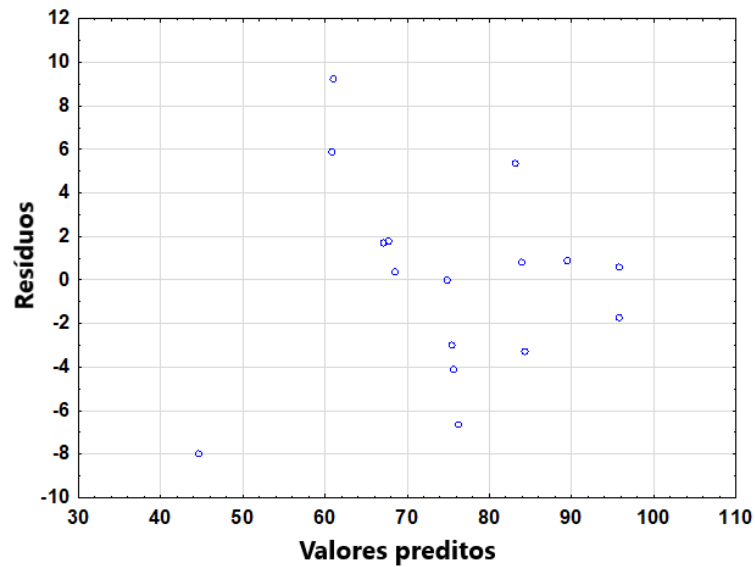
Figura 18: Valores preditos pelo modelo *versus* valores observados em experimentos.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2021).

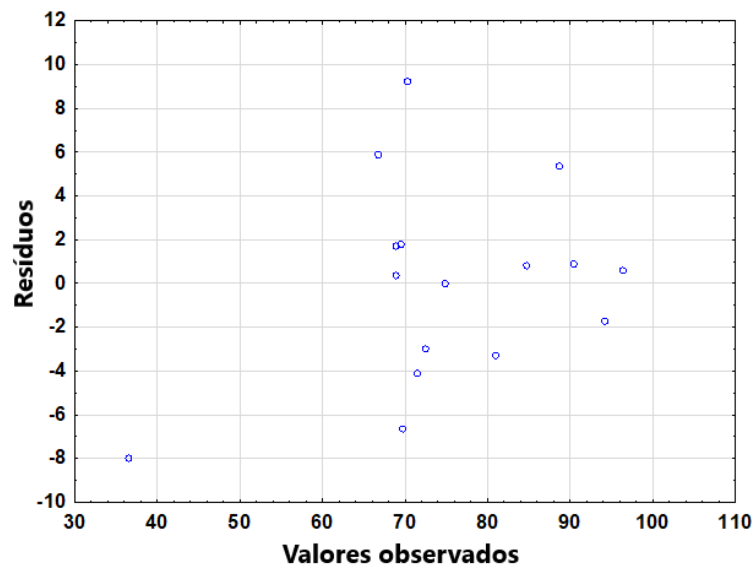
Para que o ajuste seja ideal e não seja influenciado por uma aproximação tendenciosa dos resíduos do modelo, e apresente assim uma dispersão aleatória, as Figuras 19 e 20 confirmam o ajuste sem erros sistemáticos ou embutidos no equacionamento.

Figura 19: Valores dos resíduos *versus* valores preditos.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2021).

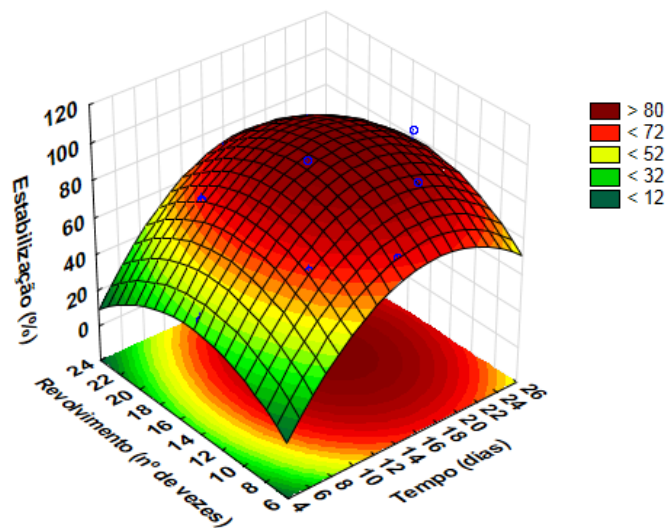
Figura 20: Valores dos resíduos *versus* valores observados.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2021).

A obtenção das superfícies de respostas é utilizada para confirmar a otimização do processo. Estas superfícies são gráficos tridimensionais que possuem no plano duas variáveis de controle e no eixo ortogonal espacial a variável de resposta, que neste estudo é a estabilização do organomineral. A superfície de resposta obtida para a estabilização do organomineral em função do tempo e do revolvimento está disposta na Figura 21.

Figura 21: Estabilização do organomineral: superfície de resposta da estabilização (%) em função das variáveis tempo e revolvimento.



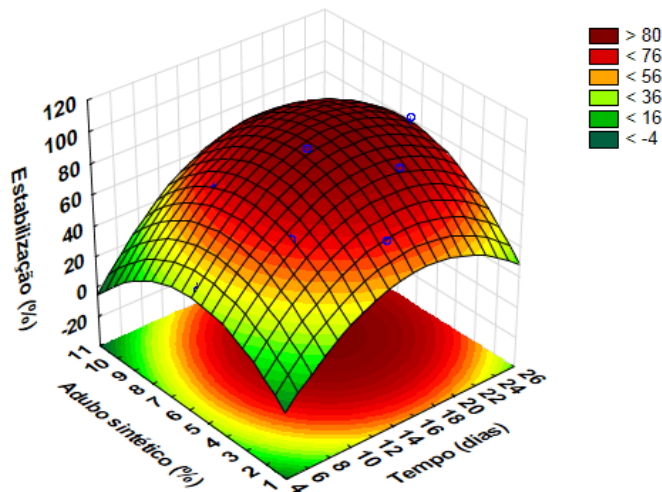
Fonte: Elaborado pelo autor, (2021).

O observado na Figura 21 corrobora com o Gráfico de Pareto anteriormente apresentado, onde a influência quadrática do tempo e do revolvimento é evidenciada pelas curvas parabólicas nos seus correspondentes eixos.

No eixo do tempo vemos o aumento da estabilização do nível inferior até valores médios, indicando a influência do tempo durante o processo e mais uma vez confirmando o apresentado no Gráfico de Pareto (Figura 17), em que o tempo apresentou o efeito mais significativo de influência na variável de resposta. Dos valores médios até o nível superior vê-se o decréscimo na estabilização, indicando que a partir de um determinado tempo, o composto alcança o nível de estabilidade biológica geral, indicando um composto moderadamente estável (CESARO et al., 2019).

Na Figura 22, temos a superfície de resposta da estabilização em função do tempo e da adição do adubo sintético (NPK). No sentido crescente no intervalo da variável tempo, observa-se um aumento na estabilização, o que corrobora com o visto no diagrama de Pareto para a variável tempo (X_1). O observado revela que o equilíbrio da estabilização é atingido nos valores médios do tempo e de adição de adubo sintético (X_3).

Figura 22: Estabilização do organomineral: superfície de resposta da estabilização (%) em função das variáveis tempo e adubo sintético (NPK).

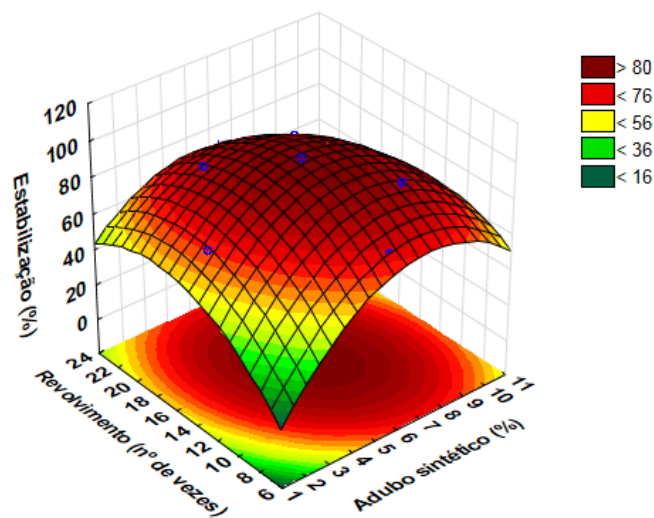


Fonte: Elaborado pelo autor, (2021).

Ao observarmos a resposta da superfície para a variável tempo em interação com a adição do adubo sintético, nota-se diminuição da estabilização para valores superiores de tempo e adição de adubo sintético.

Na Figura 23, observa-se a superfície de resposta da adição de adubo sintético (NPK) e tempo em função da estabilização do organomineral. Assim como no Gráfico de Pareto (Figura 17), a adição de adubo sintético em função do tempo de compostagem apresentou interação linear positiva, no intervalo de confiança de 95%, na estabilização do organomineral. Vale destacar que o adubo sintético diminuiu o tempo de estabilização do processo de compostagem, constituindo assim como um procedimento eficaz para acelerar a degradação e maturação da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (JERÔNIMO et al., 2020).

Figura 23: Estabilização do organomineral: superfície de resposta da estabilização (%) em função das variáveis adubo sintético (NPK) e revolvimento.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2021).

O software Statistica® 7.0 retorna como valores ótimos, os valores que maximizam a resposta estabilização do organomineral, estando estes dispostos na Tabela 6.

Tabela 6 - Valores de máximo rendimento para o intervalo das variáveis em estudo.

Variáveis	Tempo	Revolvimento	NPK
Valores reais	18 dias	15 vezes	6,5 %
Valores codificados	0,60	0	0,25

Fonte: Elaborado pelo autor, (2021).

Os valores codificados fornecidos como pontos de máximo apresentados na Tabela 7 foram levados à substituição no modelo matemático apresentado na Equação 4, o qual retornou valor de rendimento de aproximadamente 99%. Com os valores decodificados realizou-se experimentos em triplicata (Tabela 7), obtendo-se como valor médio de rendimento das amostras $97,94 \pm 0,48$, indicando a boa representatividade do modelo à região maximizada.

Tabela 7: Resultados das análises em triplicata de C, N e a relação C/N do composto estabilizado nas gavetas 1, 2 e 3, considerando os parâmetros otimizados.

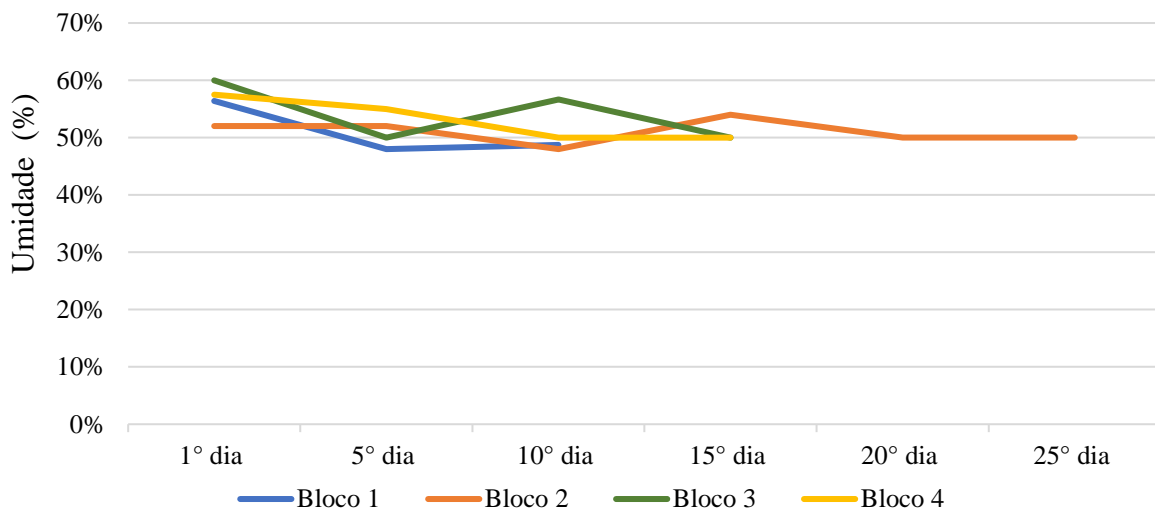
Experimento em	C e N (%)	Relação C/N	Estabilização (%)
triplicata nas condições otimizadas	C = $14,50 \pm 0,68$ N = $1,42 \pm 0,08$	$10,21 \pm 0,10$	$97,94 \pm 0,48$

Fonte: Elaborado pelo autor, (2021).

4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS PARÂMETROS: UMIDADE, TEMPERATURA, PH E RELAÇÃO C/N

A Figura 24 demonstra os valores de umidade obtidos dos Blocos 1, 2, 3 e 4 no 1°, 5°, 10°, 15°, 20° e 25° dia do processo. Os resultados diários do parâmetro umidade estão dispostos no Apêndice A.

Figura 24: Gráfico de Umidade *versus* Tempo dos Blocos 1, 2, 3 e 4 no 1°, 5°, 10°, 15°, 20° e 25° dia.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2021).

Pode-se observar que a faixa ótima de umidade descrita por Merkel (1981) foi estabelecida, entre 50 e 60% durante a maior parte do tempo da realização dos experimentos, conforme demonstrado no gráfico acima. Gurusamy et al. (2021) em seus estudos sobre a influência do teor de umidade na estabilização do composto afirmam que quando a manipulação da faixa de umidade esteve entre 40 e 60% obtiveram um impacto positivo para algumas amostras, enquanto para outras, a faixa ideal foi de 50 e 60%.

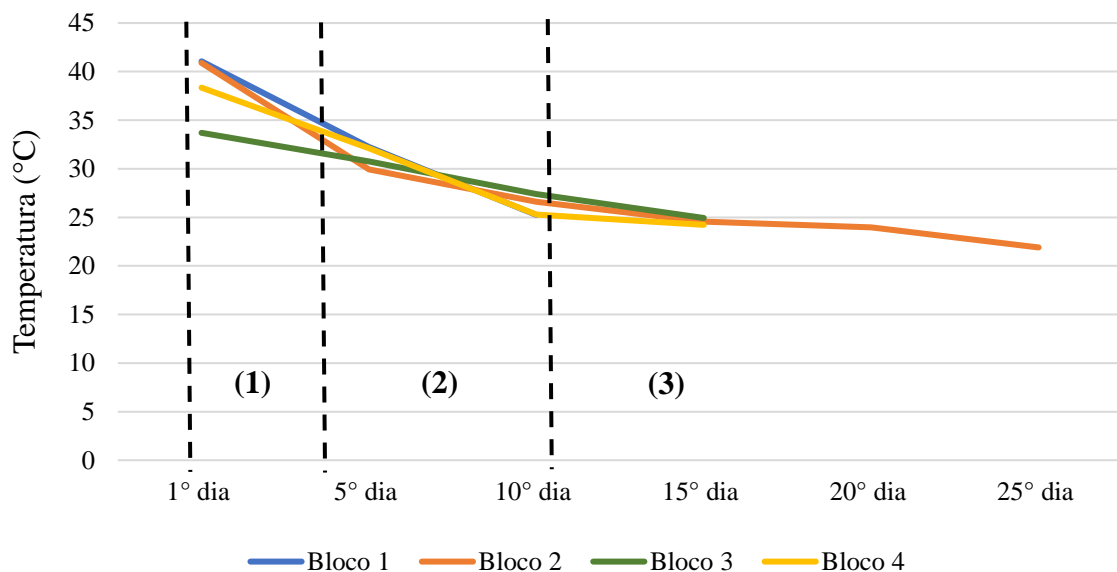
Estudos recentes de Feng et al. (2021) investigam a relação do teor de umidade na remoção de contaminantes químicos durante o processo de compostagem. Os resultados apontam que, valores de umidade superiores a 65% foram mais propícios à degradação dessas substâncias e benéficos à maturidade do composto em comparação com os índices inferiores.

Em contrapartida, haveria um acréscimo na volatilização da amônia ao promover a nitrificação em comparação a valores menores que 65%.

Li et al. (2021) avaliaram de que maneira diferentes faixas de umidade (45-61%) impactam na função de agentes microbianos inoculados durante o processo de compostagem. Os autores obtiveram como condição ideal a faixa de 53% de umidade, onde os efeitos de decomposição, nitrosação, nitrificação, e valores de temperatura de compostagem e proporção de carbono-nitrogênio (C/N) foram otimizados.

Na Figura 25 estão dispostos os resultados de temperatura dos Blocos 1, 2, 3 e 4 no 1°, 5°, 10°, 15°, 20° e 25° dia de experimentos. Os resultados diários do parâmetro Temperatura estão dispostos no Apêndice B.

Figura 25: Gráfico de Temperatura *versus* Tempo Blocos 1, 2, 3 e 4 no 1°, 5°, 10°, 15°, 20° e 25° dia.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2021).

Os valores obtidos estão em concordância com o descrito por Cunha Queda (1999), onde a evolução da temperatura durante o processo de compostagem pode ser desmembrada em três fases: fase mesófila inicial (1) que aconteceu entre o 1° e 5° dia, fase termófila (2), do 6° ao 11° dia aproximadamente e fase mesófila final (3) do 12° ao 20° e 25° dia.

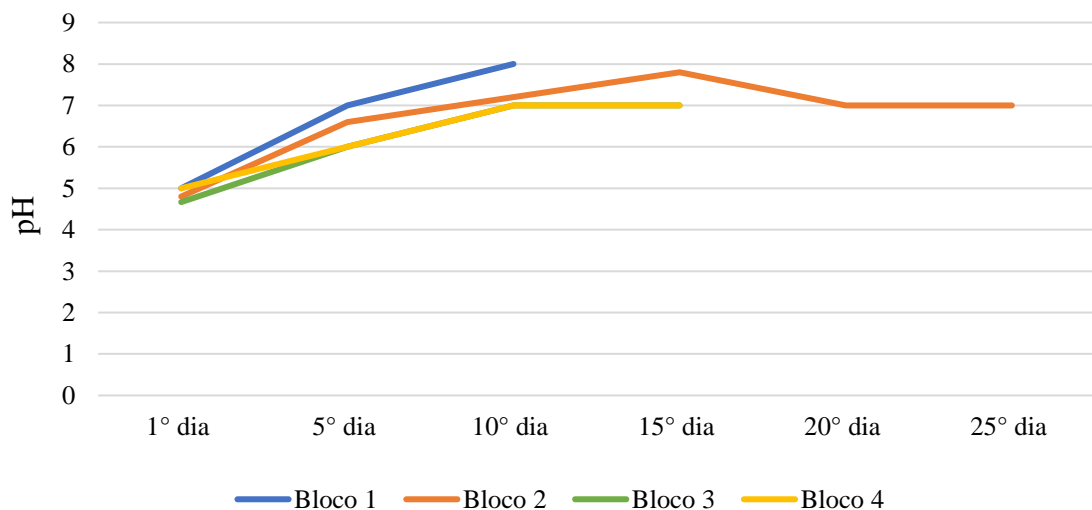
Resultados semelhantes foram expostos por Zhou et al. (2020), onde altas temperaturas (18 ° a 60° C) estiveram presentes nos primeiros dias do processo, e a estabilização dela foi obtida após os 10 primeiros dias de experimentos. A fase termofílica foi atingida em 21 dias em todos os compostos, com um intervalo de 42 a 49 °C nos estudos de Lalremruati e Devi (2021).

Neste estudo, a temperatura máxima atingida foi de aproximadamente 44 °C. Isso se deve principalmente à quantidade pequena de resíduos que foram dispostos nos compartimentos, não sendo suficientes para propiciar temperaturas acima de 50 °C. Contudo, embora esse fato tenha ocorrido, não houve prejuízo quanto a outros parâmetros, como relação C/N, que apresentaram resultados satisfatórios que comprovam a eficiência do tratamento destes resíduos orgânicos.

A combinação de diferentes métodos de compostagem também pode garantir o aumento da temperatura durante o processo e pode acarretar benefícios, como demonstram Wei et al. (2021). Os autores combinaram os métodos de biosecagem inteligente e calha dinâmica contínua, que apresentaram temperaturas mais altas, maior redução de umidade do que a compostagem em leira, aumento da matéria orgânica do solo e do nitrogênio disponível. Outro exemplo foi a utilização de compostadores internos rápidos (CIRs) para compostagem de resíduos orgânicos compreendendo resíduos de cozinha, tendo como objetivo avaliar a temperatura operacional ideal adequada para a ação rápida de microrganismos. Neste estudo, temperaturas iniciais próximas de 55 °C produziram um bom composto (MANDPE et al., 2021).

Na Figura 26 estão dispostos os resultados de pH dos Blocos 1, 2, 3 e 4 no 1°, 5°, 10°, 15°, 20° e 25° dia de experimentos. Os resultados diários do parâmetro pH estão dispostos no Apêndice C.

Figura 26: Gráfico de pH *versus* Tempo dos Blocos 1, 2, 3 e 4 no 1°, 5°, 10°, 15°, 20° e 25° dia.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2021).

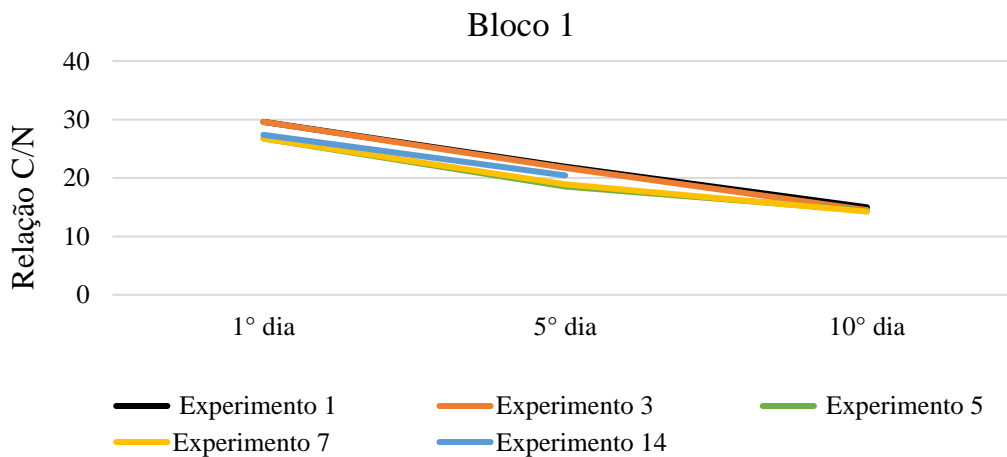
No gráfico acima é notório que na fase inicial do processo de compostagem os valores de pH se apresentaram fracamente ácido durante os estágios de inicialização e então aumentou durante os estágios de aquecimento e termofílicos. Comportamento semelhante foi descrito por Zhou et al. (2020), onde afirmam que mudanças no pH podem ser atribuídas ao desequilíbrio entre acidez e alcalinidade causado pela atividade metabólica microbiana.

Wang et al. (2017) trabalharam com o ajuste inicial do pH na faixa de 4, 5 e 6, buscando esclarecer a influência deste parâmetro na compostagem de resíduos de grãos, e como resultado, para os valores iniciais de pH 5 e 6 constataram a degradação de sólidos voláteis e as propriedades físico-químicas melhoradas, obtendo um produto de qualidade ao final da compostagem.

A alteração de pH de ácido para alcalino e posteriormente na fase de estabilização para neutro, durante o processo de compostagem, também foi descrito por Waqas et al. (2019), que justificam essas alterações inicialmente devido à formação de ácidos orgânicos, que com o tempo foi elevado a alcalino devido à bioxidação dos materiais de compostagem, formação de amônia e consumo de ácido.

A seguir estão dispostas as Figuras 27, 28, 29 e 30, onde respectivamente estão apresentados os resultados da Relação C/N dos Blocos 1, 2, 3 e 4. Os resultados diários do parâmetro Relação C/N estão dispostos no Apêndice D. Na primeira, Figura 27, as análises foram realizadas no 1º, 5º e 10º dia de experimento. Na segunda, Figura 28, as análises foram realizadas no 1º, 5º, 10º, 15º, 20º e 25º dia de experimento. Na terceira, Figura 29, assim como na Figura 30 as análises foram realizadas no 1º, 5º, 10º e 15º dia de experimentos.

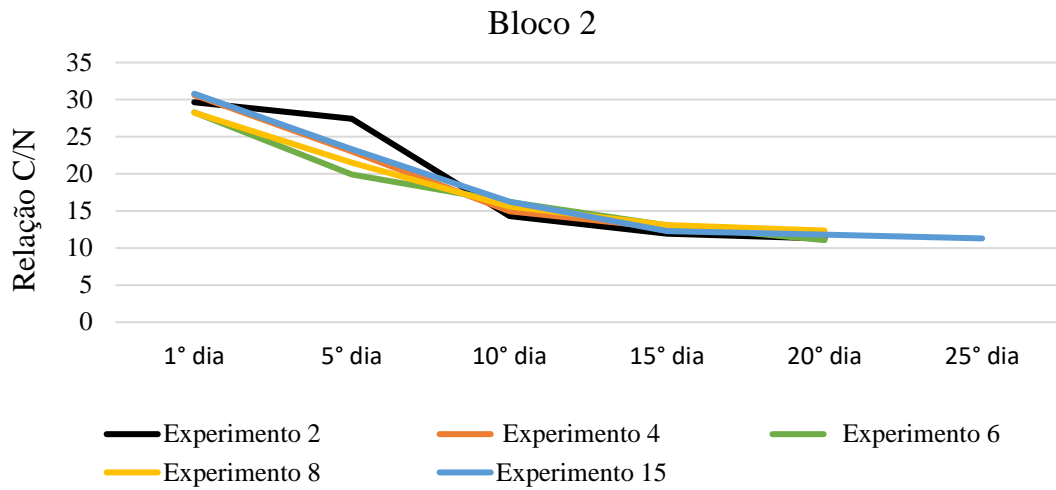
Figura 27: Gráfico da Relação C/N *versus* Tempo do Bloco 1 no 1º, 5º e 10º dia.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2021).

Nota: Teor de Carbono Orgânico Total em mg L^{-1} e o Teor de Nitrogênio Total em mg L^{-1} (N-NH_4^+).

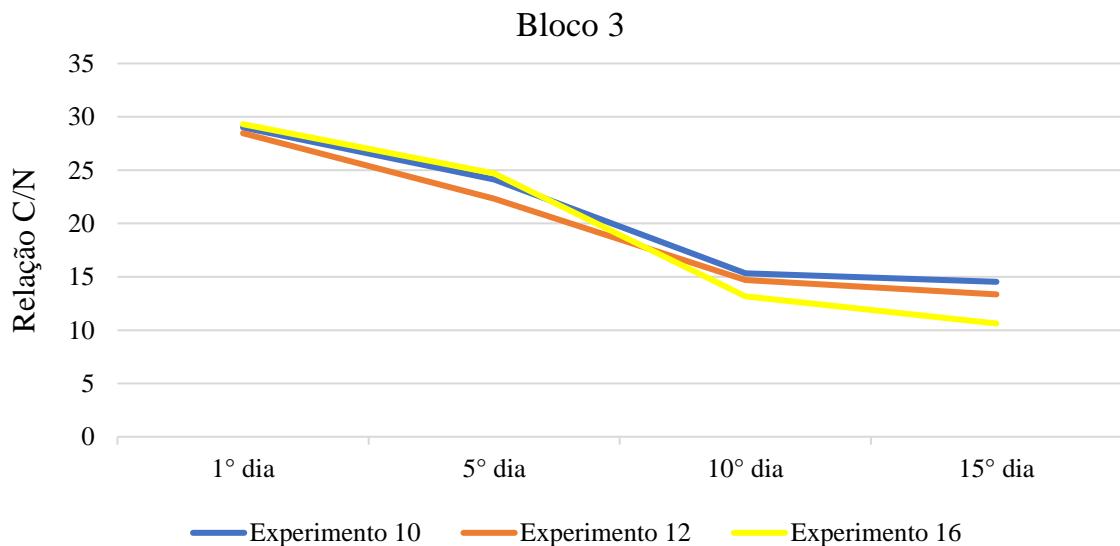
Figura 28: Gráfico da Relação C/N *versus* Tempo do Bloco 2 no 1º, 5º, 10º, 15º, 20º e 25º dia.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2021).

Nota: Teor de Carbono Orgânico Total em mg L^{-1} e o Teor de Nitrogênio Total em mg L^{-1} (N-NH_4^+).

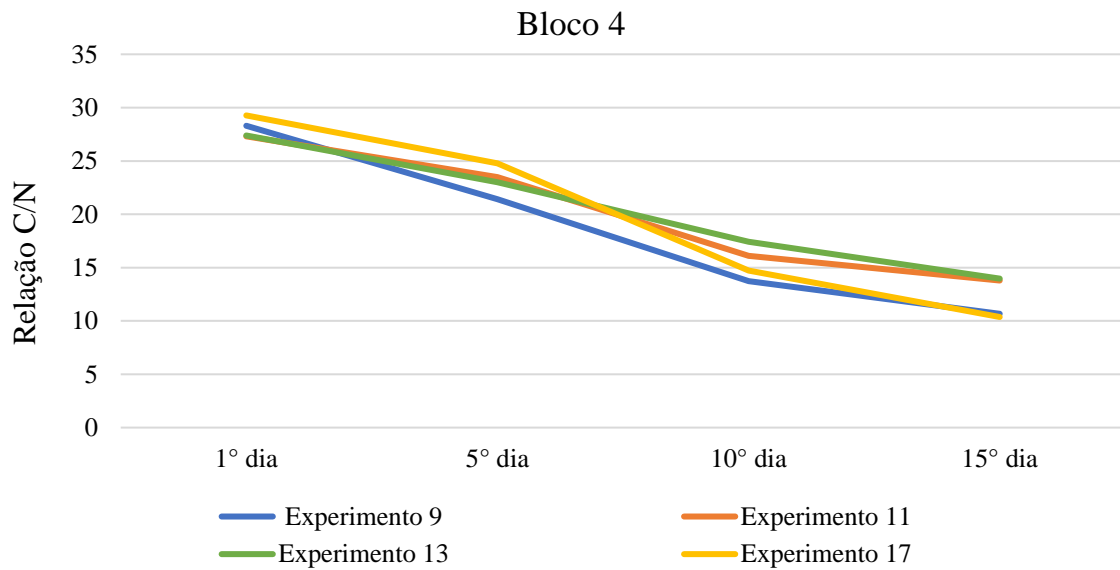
Figura 29: Gráfico da Relação C/N *versus* Tempo do Bloco 3 no 1º, 5º, 10º e 15º dia.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2021).

Nota: Teor de Carbono Orgânico Total em mg L^{-1} e o Teor de Nitrogênio Total em mg L^{-1} (N-NH_4^+).

Figura 30: Gráfico da Relação C/N *versus* Tempo do Bloco 4 no 1º, 5º, 10º e 15º dia.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2021).

Nota: Teor de Carbono Orgânico Total em mg L^{-1} e o Teor de Nitrogênio Total em mg L^{-1} (N-NH_4^+).

Nas figuras acima pode-se observar valores iniciais da relação C/N variando entre 26:1 a 30:1. Para Vallini (1995) o intervalo ótimo para a relação C/N no início da compostagem deve estar compreendido entre 25:1 e 30:1, e o intervalo de compatibilidade (susceptível de ser utilizado) entre 20:1 e 40:1, estando os resultados dentro da faixa de valores aceitáveis.

Zhang et al. (2020) em seus estudos acerca da influência da relação C/N na sucessão de comunidades bacterianas durante a compostagem também encontraram a razão 30:1 como ideal para se iniciar o processo de compostagem e garantir menores perdas de carbono e nitrogênio no decorrer do tempo, o que indica que o ajuste desta relação inicial pode afetar as bactérias transformadoras de nitrogênio e melhorar a qualidade do composto. A compostagem com relação C/N inicial de 28:1 manteve uma temperatura superior a 55 °C por mais de 3 dias e provocou uma maior estabilidade (GAO et al., 2010).

Segundo Kiehl (1998) o composto quando atinge a maturidade, ou seja, transformou-se em produto humificado, a relação C/N se situa em torno de 10:1. Sendo assim, os experimentos com duração de 20 a 25 dias, presentes no Bloco 2, retornaram valores mais aproximados do que cita o autor. Lalremruati e Devi (2021) também observaram esse decréscimo da relação C/N e afirmam ser essa relação um indicador da fase em que o processo de compostagem se encontra.

4.5 CARACTERIZAÇÃO DO BIOFERTILIZANTE MATURADO

A caracterização do composto organomineral foi realizada pelo Laboratório de Solos da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Campus Santa Mônica, situado na cidade de Uberlândia, em Minas Gerais. Na Tabela 8 estão dispostos os resultados destas análises, bem como a caracterização de um composto orgânico comercial, do tipo “terra vegetal” fabricado pela empresa Holanda do município de Rio Claro – SP (Holanda, 2018), a título comparativo da qualidade do composto produzido no experimento com os parâmetros otimizados.

Tabela 8: Caracterização do composto estabilizado nas gavetas 1, 2 e 3, considerando os parâmetros otimizados.

Sigla	Determinação	Unidade	Composto Organomineral	Composto Comercial (Holanda)
pH	Potencial Hidrogeniônico	em água	7,10	6,8
Ca²⁺	Cálcio	mmol _c dm ⁻³	2,85	3,1
Mg²⁺	Magnésio	mmol _c dm ⁻³	2,11	3,5
Fe	Ferro	mmol _c dm ⁻³	39	9989
∑ bases	Soma de bases	mmol _c dm ⁻³	5,10	-----
K⁺	Potássio	mmol _c dm ⁻³	8,05	0,67
Zn	Zinco	mmol _c dm ⁻³	19	45
CTC	Capacidade de troca catiônica	mmol _c dm ⁻³	340	280
V	Saturação por bases	%	71	-----
MO	Matéria Orgânica	g dm ⁻³	19,78	16,8
P	Fósforo	mg dm ⁻³	3,07	-----
N	Nitrogênio	mg dm ⁻³	2,34	1,1

Fonte: Elaborado pelo autor, (2021).

A caracterização do organomineral apresentou resultados satisfatórios quando comparado ao composto comercial. Nutrientes essenciais como Potássio (K⁺), Fósforo (P) e Nitrogênio (N) são benéficos quando aplicados no solo e estes estão suficientemente presentes no organimineral produzido. Resultados semelhantes são descritos por Jain e Kalamdhad (2020), onde afirmam que os micro e macro nutrientes característicos do composto produzido em seus estudos, aumentou o conteúdo de nitrogênio em solo, além de aumentar sua capacidade de retenção de água e capacidade de troca catiônica. Os autores recomendam então a aplicação do novo composto, como forma de melhorar a condição agronômica do solo. Da mesma forma, Zhou et al. (2020) em seus estudos descrevem o composto produzido em uma composteira doméstica como dentro dos padrões de qualidade do solo e como sendo adequado para o plantio de gramados, flores, e remediação de solos contaminados.

5 CONCLUSÃO

A composteira doméstica desenvolvida se mostrou eficiente como opção de tratamento da fração orgânica gerada em residências de pequeno porte. Isso pode ser confirmado através da qualidade do composto produzido e dos resultados satisfatórios dos parâmetros de acompanhamento durante o processo, estando na maioria do tempo dentro das faixas descritas na literatura.

Os resultados obtidos do parâmetro temperatura evidenciaram que este não se demonstrou um fator comprometedor no correto andamento do processo de compostagem, bem como na qualidade final do organomineral, uma vez que, apesar de não terem sido atingidos valores acima de 50 °C, foram preservadas características ótimas do produto. Além disso, a quantidade de resíduos orgânicos tratados também não se apresentou como um fator impactante nesse método de tratamento, sendo que, apesar da composteira limitar a massa de resíduos a serem tratados, estes resultaram em um organomineral de qualidade. Com isso, os resultados da relação C/N obtidos durante os experimentos, comprovaram que o equipamento foi capaz de mineralizar os resíduos sem obter altas temperaturas e com pequenas quantidades de massa orgânica.

Os experimentos realizados demonstraram as melhores condições para a maximização da estabilização do organomineral quando o processo foi realizado em 18 dias, com 15 vezes de revolvimento do composto dentro das gavetas do equipamento, com a adição de 6,5% de adubo sintético (NPK). O modelo foi confirmado como eficiente ao retornar um valor de 99% o que foi afirmado com a realização em triplicata do experimento nas condições ótimas, onde o valor obtido da estabilização foi de aproximadamente 98%.

Sendo assim, como proposta futura espera-se reduzir os custos de produção da composteira doméstica, por meio de melhorias em seu design, funcionamento e materiais, buscando torná-la acessível a uma parcela significativa da população, aplicação em larga escala.

REFERÊNCIAS

- ABRELPE (São Paulo). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2018/2019**. São Paulo, 2020. 68 p. Disponível em: < <https://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acesso em: 23 mai. 2021.
- ALEJANDRA, Adriana; FONT, Cerda Artola Xavier; BARRENA, Raquel; GEA, Teresa; SÁNCHEZ, Antoni. Composting of food wastes: Status and challenges. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 248, p. 57-67, jan. 2018. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.133>.
- ALELUIA, João; FERRÃO, Paulo. Assessing the costs of municipal solid waste treatment technologies in developing Asian countries. **Waste Management**, [s.l.], v. 69, p. 592-608, nov. 2017. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.047>.
- ALEXANDER, Martin. 1977. **Introduction to soil microbiology**. 2 ed. New York, John Wiley & Sons, 467 p.
- AL-HAMAMRE, Zayed; SAIDAN, Motasem; HARARAH, Muhanned; RAWAJFEH, Khaled; ALKHASAWNEH, Hussam E.; AL-SHANNAG, Mohammad. Wastes and biomass materials as sustainable-renewable energy resources for Jordan. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 67, p. 295-314, jan. 2017. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.035>.
- ANDREOLI, Cleverson. V. **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. Rede Cooperativa de Pesquisas. Rio de Janeiro: Rima, ABES, 2001.
- ARMINGTON, William. R.; CHEN, Roger. B. Household food waste collection: Building service networks through neighborhood expansion. **Waste Management**, [s.l.], v. 77, p. 304-311, jul. 2018. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.04.012>.
- ASHWOOD, Frank; BUTT, Kevin. R.; DOICK, Kieron. J.; VANGUELOVA, Elena. I. Effects of composted green waste on soil quality and tree growth on a reclaimed landfill site. **European Journal of Soil Biology**, [s.l.], v. 87, p. 46-52, maio 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejsobi.2018.05.003>.
- BEKCHANOV, Maksud; MIRZABAEV, Alisher. Circular economy of composting in Sri Lanka: opportunities and challenges for reducing waste related pollution and improving soil health. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 202, p. 1107-1119, nov. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.186>.
- BOLDRIN, Alessio; HARTLING, Karin. R.; LAUGEN, Maria; CHRISTENSEN, Thomas. H. Environmental inventory modelling of the use of compost and peat in growth media preparation. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. L.], v. 54, p.1250-1260, out. 2010. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.04.003>.
- BONG, Cassandra. P. C; LIM, Li. Y; HO, Wai. S; LIM, Jeng. S; KLEMEŠ, Jiří. J; TOWPRAYOON, Sirintornthep; HO, Chin S; LEE, Chew E. A review on the global warming potential of cleaner composting and mitigation strategies. **Journal of Cleaner Production**, [s. L.], v. 146, p.149-157, mar. 2017. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.066>.
- BOX, George. E.; HUNTER, J. Stuart. **Statistics for experiments to design, data analysis and model building**, Nova Iorque, 1978.

BRUNNER, Paul. H.; RECHBERGER, Helmut. Waste to energy – key element for sustainable waste management. **Waste Management**, [s.l.], v. 37, p. 3-12, mar. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2014.02.003>.

CARLINI, Maurizio; MOSCONI, Enrico. M; CASTELLUCCI, Sonia; VILLARINI, Mauro; COLANTONI, Andrea. Economical evaluation of anaerobic digestion plants fed with organic agro-industrial waste. **Energies**, Viterbo, v. 10, n. 8, p. 1165-1179, ago. 2017.

CERDA, Alejandra; ARTOLA, Adriana; FONT, Xavier; BARRENA, Raquel; GEA, Teresa; SÁNCHEZ, Antoni. Composting of food wastes: status and challenges. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 248, p. 57-67, jan. 2018. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.133>.

CESARO, Alessandra; CONTE, Anna; BELGIORNO, Vincenzo; SICILIANO, Antonietta; GUIDA, Marco. The evolution of compost stability and maturity during the full-scale treatment of the organic fraction of municipal solid waste. **Journal of Environmental Management**, [S.L.], v. 232, p. 264-270, fev. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.121>.

CHATTERJEE, Biswabandhu; MAZUMDER, Debabrata. Role of stage-separation in the ubiquitous development of anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 104, p. 439-469, apr. 2019. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.026>.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução 358**, de 29 de abril de 2005. Dispõe sobre o tratamento e a disposição final dos resíduos dos serviços de saúde e dá outras providências. Brasília, DF, 04 maio 2005. Seção 1, p. 63-65. Disponível em: < <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=462>> Acesso em: 24 mai. 2020.

CONCEIÇÃO, Priscila. S. **Avaliação da tratabilidade da cama de frango por processos aeróbios de compostagem visando sua reutilização**. Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de Magister Scientiae). Viçosa, p. 12, 2012.

CUNHA QUEDA, Ana. C. F. **Dinâmica do nitrogênio durante a compostagem de materiais biológicos putrescíveis**. Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Agro-Industrial. Universidade Técnica de Lisboa. Instituto Superior de Agronomia. .257 pp. Lisboa. Portugal, 1999.

DHAMODHARANA, Kondusamy; VARMA, Vempalli. S.; VELUCHAMY, Chitraichamy; PUGAZHENDHI, Arivalagan; RAJENDRAN, Karthik. Emission of volatile organic compounds from composting: A review on assessment, treatment, and perspectives. **Science of the Total Environment**, [s. L.], v. 695, p.01-14, ago. 2019. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133725>.

EPA. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Advancing sustainable materials management: 2018 fact sheet**: assessing trends in material Generation and Management in the United States. Washington: Epa, 2020. 25 p. Disponível em: < <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/advancing-sustainable-materials-management> >. Acesso em: 07 jul. 2021.

ERMOLAEV, Evgheni; SUNDBERG, Cecilia; PELL; Mikael; SMARS, Sven; JÖNSSON Hakan. Effects of moisture on emissions of methane, nitrous oxide and carbon dioxide from

food and garden waste composting. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 240, p.118165, dez. 2019. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118165>.

EUROPEAN COMMISSION. **Report from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee, and the committee of the regions**. Brussels, 2019. 14 p. Disponível: <<https://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2019Add190:FIN:EN:PDF>>. Acesso em: 05 dez. 2020.

EUROSTAT. STATISTICAL OFFICE OF THE EUROPEAN UNION. **The EU in the world – environment**. Luxemburgo: Eurostat,2020. Disponível em: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Main_Page. Acesso em: 18 jun. 2020.

FENG, Yao; WANG, Gui-Zhen; LIU, Yuan-Wang; CHENG, Deng-Miao; FAN, Shuang-Hu; ZHAO, Quan-Sheng; XUE, Jianming; ZHANG, Shu-Qing; LI, Zhao-Jun. The impacts of oxytetracycline on humification during manure composting can be alleviated by adjusting initial moisture contents as illustrated by NMR. **Journal of Integrative Agriculture**, [S.L.], v. 20, n. 8, p. 2277-2288, ago. 2021. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s2095-3119\(20\)63332-9](http://dx.doi.org/10.1016/s2095-3119(20)63332-9).

FERNANDES, Fernando; SILVA, Sandra M.C. P. da. **MANUAL PRÁTICO PARA A COMPOSTAGEM DE BÍOSSÓLIDOS**. Londrina: Prosab - Programa de Pesquisa em Saneamento Básico, 1999. 91 p.

FERREIRA, Ana. K. da C; DIAS, Nildo. da S; SOUSA JUNIOR, Francisco. S. de; FERREIRA, Daianni. A. da C; FERNANDES, Cleyton. dos S; LEITE, Tiago. de S. Composting of household organic waste and its effects on growth and mineral composition of cherry tomato. **Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, [s.l.], v. 13, n. 3, p. 1, 29. Maio 2018. Instituto de Pesquisas Ambientais em Bacias Hidrográficas (IPABHi). <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.2141>.

FREITAS, Luciane M. C; WIESER, Claudia. J; STEFANUTTI, Ronaldo. Variação da temperatura e redução da massa na compostagem doméstica. **Blucher Engineering Proceedings**. São Paulo, v. 4, p. 1542-1551, jul. 2017.

GAO, Mengchun; LIANG, Fangyuan; YU, An; LI, Bing; YANG, Lijuan. Evaluation of stability and maturity during forced-aeration composting of chicken manure and sawdust at different C/N ratios. **Chemosphere**, [S.L.], v. 78, n. 5, p. 614-619, jan. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.10.056>.

GARFÍ, Marianna; MARTÍ-HERRERO, Jaime; GARWOOD, Anna; FERRER, Ivet. Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 60, p. 599-614, jul. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.071>.

GE, Mianshen; ZHOU, Haibin; SHEN, Yujun; MENG, Haibo; LI, Ran; ZHOU, Jun; CHENG, Hongsheng; ZHANG, Xi; DING, Jingtao; WANG, Jian; WANG, Jiarui. Effect of aeration rates on enzymatic activity and bacterial community succession during cattle manure

composting. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 304, p. 122928, may. 2020. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122928>.

GURUSAMY, Nisha. N.; PUFFER, Natalie; JONGH, Coen. de; GIL, Cristina. R; ASPRAY, Thomas. J. Effect of initial moisture content and sample storage duration on compost stability using the ORG0020 dynamic respiration test. **Waste Management**, [S.L.], v. 125, p. 215-219, abr. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2021.02.048>.

HOLANDA - Fabricante de compostos orgânicos. **Parâmetros do composto comercializado como terra vegetal**. Rio Claro. Brasil, 2018.

HYMAN, Jasmine; BAILIS, Rob. Assessment of the Cambodian National Biodigester Program. **Energy for Sustainable Development**, [s.l.], v. 46, p. 11-22, out. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2018.06.008>.

IGUCHI, Carolina.Y. **Considerações gerais sobre a aplicação de esterco no processo de compostagem dos resíduos de poda e capina**. (Monografia apresentada à Comissão do Trabalho de Formatura do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental, Instituto de Geociências e Ciências Exatas). UNESP, Campus de Rio Claro, 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Sinopse do censo demográfico de 2010**. Uberaba 2010. Disponível em: <<https://censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?uf=31&dados=8>>. Acesso em: 04 jun. 2020.

JAIN, Mayur. S; KALAMDHAD, Ajay. S. Soil revitalization via waste utilization: compost effects on soil organic properties, nutritional, sorption and physical properties. **Environmental Technology & Innovation**, [S.L.], v. 18, p. 100668, maio 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eti.2020.100668>.

JERÔNIMO, Guilherme. J.; SENHUK, Ana. P. M. dos S; LUZ, Mário. S. da; GONÇALVES, Júlio. C. de S. I; FERREIRA, Deusmaque. C. Efficiency of biocompost potentiated with chemical fertilizer and facilitated aeration. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 42, e31, jun. 2020. DOI: 10.5902 / 2179460X41908.

JIAQIN, Wang; LIU, Zhiping; XIA, Jiashuai; CHEN, Youpeng. Effect of microbial inoculation on physico chemical properties and bacterial community structure of citrus peel composting. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 291, p. 121843, nov. 2019. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121843>.

JYOTHILAKSHMI, Ramaswamy; PRAKASH, S.V. Design, fabrication, and experimentation of a small scale anaerobic biodigester for domestic biodegradable solid waste with energy recovery and sizing calculations. **Procedia Environmental Sciences**, [s. l.], v. 35, p. 749-755, 4 ago. 2016.

KARNCHANAWONG, Somjai; NISSAIKLA, Siriwan. Effects of microbial inoculation on composting of household organic waste using passive aeration bin. **International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture**, [S.L.], v. 3, n. 4, p. 113-119, 4 set. 2014. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s40093-014-0072-0>.

KENG, Zi. X.; CHONG, Siewhui; NG, Chee. G; NUR, Izzati. R.; HANSON; Svenja; PAN, Guan-Ting; LAU, Phei. L.; SUPRAMANIAM, Christina. V; SINGH, Ajit; CHIN, Chiew. F; LAM; Hon. L. Community-scale composting for food waste: A life-cycle assessment-

supported case study. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 261, p. 121220, jul. 2020. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121220>.

KIEHL, Edmar. J. **Manual de Compostagem: maturação e qualidade do composto**. Piracicaba,:E. J.Kiehl, Piracicaba. Brasil, 1998.

LACERDA, Maria. J. R; FREITAS, Karina. R; SILVA, José. W. da. Determinação da matéria seca de forrageiras pelos métodos de microondas e convencional. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 25, n. 3, p. 185-190, jun. 2009.

LALREMRUATI, Mary; DEVI, Angom. S. Changes in physico-chemical properties during composting of three common household organic solid wastes amended with garden soil. **Bioresource Technology Reports**, [S.L.], v. 15, p. 100727, set. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100727>.

LI, Ming-Xing; HE, Xiao-Song; TANG, Jian; LI, Xing; ZHAO, Rui; TAO, Yi-Qian; WANG, Can; QIU, Zhong-Ping. Influence of moisture content on chicken manure stabilization during microbial agent-enhanced composting. **Chemosphere**, [S.L.], v. 264, p. 128549, fev. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128549>.

LI, Yun; LUO, Wenhai; LI, Guoxue; WANG, Kun; GONG, Xiaoyan. Performance of phosphogypsum and calcium magnesium phosphate fertilizer for nitrogen conservation in pig manure composting. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 250, p. 53-59, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.172>.

LIU, Yan; MA, Ruonan; LI, Danyang; QI, Chuanren; HAN, Lina; CHEN, Mei; FU, Feng; YUAN, Jing; LI, Guoxue. Effects of calcium magnesium phosphate fertilizer, biochar and spent mushroom substrate on compost maturity and gaseous emissions during pig manure composting. **Journal Of Environmental Management**, [s.l.], v. 267, p. 110649, ago. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110649>.

LOMBARDI, Lidia; CARNEVALE, Ennio; CORTI, Andrea. A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste. **Waste Management**, [s.l.], v. 37, p. 26-44, mar. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2014.11.010>.

LOUREIRO, Diego. C; AQUINO, Adriana. M. de; ZONTA, Everaldo; LIMA, Eduardo. Compostagem e vermicompostagem de resíduos domiciliares com esterco bovino para a produção de insumo orgânico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S.L.], v. 42, n. 7, p. 1043-1048, jul. 2007. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2007000700018>.

MAKARICHI, Luke; JUTIDAMRONGPHAN, Warangkana; TECHATO, Kua-anan. The evolution of waste-to-energy incineration: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 91, p. 812-821, ago. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.088>.

MANDPE, Ashootosh; TYAGI, Lakshay; PALIYA, Sonam; CHAUDHRY, Smita; MOTGHARE, Ankit; KUMAR, Sunil. Rapid-in-house composting of organic solid wastes with fly ash supplementation: performance evaluation at thermophilic exposures. **Bioresource**

Technology, [S.L.], v. 337, p. 125386, out. 2021. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125386>.

MANU, M.K; KUMAR, Rakesh; GARG, Anurag. Decentralized composting of household wet biodegradable waste in plastic drums: Effect of waste turning, microbial inoculum and bulking agent on product quality. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 226, p. 233-241, jul. 2019. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.350>.

MASSUKADO, Luciana. M. Desenvolvimento do processo de compostagem em unidade descentralizada e proposta de software livre para o gerenciamento municipal dos resíduos sólidos domiciliares. 2008. 182 p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

MAYER, Felix; BHANDARI, Ramchandra; GÄTH, Stefan. Critical review on life cycle assessment of conventional and innovative waste-to-energy Technologies. **Science of The Total Environment**, [s.l.], v. 672, p. 708-721, jul. 2019. Elsevier BV.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.449>.

MERKEL, James. A. **Managing livestock wastes**. [S. L.]: Avi Pub. Co, 1981. 419 p.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Resíduos Sólidos**. Disponível em:
 <<https://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos>>. Acesso em: 22 mai. 2021.

MINISTRY OF THE ENVIRONMENT GOVERNMENT OF JAPAN. **Municipal solid waste emissions and disposal in FY2019**. Disponível em: <
<https://www.env.go.jp/en/headline/2504.html> >. Acesso em: 8 jun. 2021.

MOREDA, Iván. L. The potential of biogas production in Uruguay. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 54, p. 1580-1591, fev. 2016. Elsevier BV.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.099>.

MUSCOPE, Felipe. P. **Compostagem de resíduos agroindustriais através da inoculação de microrganismos eficientes: uma alternativa para a compostagem em pequena escala**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal da Fronteira do Sul. Erechim. Brasil, 2017.

NETO, Waldomiro. B.; SILVA, Tatiana. A. R. Estudo da redução de acidez do óleo residual para a produção de biodiesel utilizando planejamento fatorial fracionado. **Revista Virtual de Química**, v.5, n.5, p.828-839, 2013.

NEUGEBAUER, Maciej; SOŁOWIEJ, Piotr. The use of green waste to overcome the difficulty in small-scale composting of organic household waste. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 156, p. 865-875, jul. 2017. Elsevier BV.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.095>.

OLIVEIRA, Francisco. N. S; LIMA, Hermínio. J. M.; CAJAZEIRA, João. P. **Uso da compostagem em sistemas agrícolas orgânicos**. Fortaleza: Embrapa, 2004. 17 p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPAT-2010/9207/1/Dc-089.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2021.

OLIVEIRA, Emídio. C. A. de; SARTORI, Raul. H; GARCEZ, Tiago. B. **Compostagem**. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2008. 19 p.

- OLIVEIRA, Luiza. S.B.L.; OLIVEIRA, Deborah. S.B.L.; BEZERRA, Barbara. S; PEREIRA, Bárbara. S; BATTISTELLE, Rosane. A. G. Environmental analysis of organic waste treatment focusing on composting scenarios. **Journal of Cleaner Production**, [s. L.], v. 155, p.229-237, jul. 2017. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.093>.
- PERGER, Alja . Organic waste management in Canada: Building a sustainable circular economy. **Mednarodno inovativno poslovanje: Journal of Innovative Business and Management**, v. 11, n. 1, p. 84-92, 15 May 2019.
- QU, Jisong; ZHANG, Lijuan; ZHANG, Xu; GAO, Lihong; TIAN, Yongqiang. Biochar combined with gypsum reduces both nitrogen and carbon losses during agricultural waste composting and enhances overall compost quality by regulating microbial activities and functions. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 314, p. 123781, out. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123781>.
- RAJAEIFAR, Mohammad. A; GHANAVATI, Hossein; DASHTI, Behrouz. B.; HEIJUNGS, Reinout; AGHBASHLO, Mortaza; TABATABAEI, Meisam. Electricity generation and GHG emission reduction potentials through different municipal solid waste management technologies: a comparative review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 79, p. 414-439, nov. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.109>.
- RIOS, Mario; KALTSCHMITT, Martin. Electricity generation potential from biogas produced from organic waste in Mexico. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 54, p. 384-395, fev. 2016. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.033>.
- RODRIGUES, Mário. S. **Resíduos orgânicos como matéria – prima para compostagem**. In: SIMPÓSIO SOBRE COMPOSTAGEM – “Ciência e Tecnologia”, 2004. Botucatu. Universidade Estadual Paulista, p. 01-27. 2004.
- SANCHEZ, Antoni; ARTOLA, Adriana; FONT, Xavier; GEA, Teresa; BARRENA, Raquel; GABRIEL, David, MONEDERO, Miguel. Á. S; ROIG, Assunção; CAYUELA, Maria. L; MONDINI, Claudio. Greenhouse gas emissions from organic waste composting. **Environmental Chemistry Letters**, [s. L.], v. 13, p.223-238, set. 2015. Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1007/s10311-015-0507-5>.
- SHIMIZU, Naoto; KARYADI, Joko. N. W; HARANO, Michio; IWABUCHI, Kazunori; KIMURA, Toshinor. Cattle manure composting in a packed-bed reactor with forced aeration strategy. **Engineering in Agriculture, Environmenta nd Food**, [s.l.], v. 11, p. 65-73, apr. 2018. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2018.01.002>.
- SIDDIQUE, Md. Nurul. I; WAHID, Zularisam. A. Achievements and perspectives of anaerobic co-digestion: A review. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 194, p. 359-371, sep. 2018. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.155>.
- SIQUEIRA, Thais. M. O. de; ASSAD, Maria. L. R. C. L. Compostagem de resíduos sólidos urbanos no estado de São Paulo (Brasil). **Ambiente & Sociedade**, [s.l.], v. 18, n. 4, p. 243-264, dez. 2015. Fap UNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4422asoc1243v1842015>.
- SNIS- Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (Brasília). Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos. Brasília, 2020. 246 p. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/diagnosticos>>. Acesso em: 23 jul. 2021.
- SOUZA, Andreza. G. de; JÚNIOR, João. C. A territorialização da produção agroindustrial canavieira na mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba. **Horizonte Científico**,

Uberlândia, v. 6, n. 2, p. 1-22, 07 fev. 2013. Disponível em:

<http://www.seer.ufu.br/index.php/horizontecientifico/issue/view/819>. Acesso em: 05 maio 2020.

SUN, Yue; REN, Xiuna; PAN, Junting; ZHANG, Zengqiang; TSUI, To-hung; LUO, Liwen; WANG, Quan. Effect of microplastics on greenhouse gas and ammonia emissions during aerobic composting. **Science of the Total Environment**, [s.l.], v. 737, p. 139856, out. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139856>.

TAN, Sie Ting; HASHIM, Haslenda; LIM, Jeng Shiun; HO, Wai Shin; LEE, Chew Tin; YAN, Jinyue. Energy and emissions benefits of renewable energy derived from municipal solid waste: analysis of a low carbon scenario in malaysia. **Applied Energy**, [s.l.], v. 136, p. 797-804, dez. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.06.003>.

TELLO-ANDRADE, Adriana. F.; JIMENEZ-MOLEON, María.C.; SANCHEZ-GALVAN, Glória. Management of sewage sludge by composting using fermented water hyacinth. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, p. 14781-14792, 20 mai. 2015. Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4683-4>.

THE OHIO STATE UNIVERSITY. **Home Composting** (2019). Disponível em:

<https://lake.osu.edu/program-areas/master-gardener-volunteers/home-composting>. Acesso em: 8 jul. 2020.

THOMAS, Corinna; IDLER, Christine; AMMON, Christian; AMON, Thomas. Effects of the C/N ratio and moisture content on the survival of ESBL-producing *Escherichia coli* during chicken manure composting. **Waste Management**, [s.l.], v. 105, p. 110-118, mar. 2020. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.01.031>.

TYAGI, Vinay. K.; FDEZ-GÜELFO, Luis. A.; ZHOU, Yan; ALVAREZ-GALLEGO, Carlos. J.; GARCIA, Luis. I. R.; NG, WunJern. Anaerobic co-digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW): Progress and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 93, p. 380-399, oct. 2018. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.051>.

VALENTE, B.S.; XAVIER, E.G.; MORSELLI, T.B.G.A.; JAHNKE, D.S.; BRUM JÚNIOR, B.S.; CABRERA, B.R.; MORAES, P.O.; LOPES, D.C.N. Fatores que afetam o desenvolvimento da compostagem de resíduos orgânicos. **Archivos de Zootecnia**, Córdoba, Espanha, v.58, p. 59-85, 2009.

VALLINI, Giovanni. **Il Compostaggio**. In: La protezione dell'ambiente in Italia. Ed. Bertini, I., Cipollini, R., Tundo, P. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Società Chimica Italiana e Consorzio Interuniversitario Chimica per l'Ambiente. 83-134 pp. Bologna. Itália, 1995.

VÁZQUEZ, Marcos. A; SOTO, Manuel. The efficiency of home composting programmes and compost quality. **Waste Management**, [s.l.], v. 64, p. 39-50, jun. 2017. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.03.022>.

VILJOEN, Jacoba; BLAAUW, Derick; SCHENCK, Catherina. The opportunities and value-adding activities of buy-back centres in South Africa's recycling industry: a value chain analysis. **Local Economy: The Journal of the Local Economy Policy Unit**, [s.l.], v. 34, n. 3, p. 294-315, maio 2019. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0269094219851491>.

WAN, Leibing; WANG, Xitao; CONG, Cong; LI, Jingbo; XU, Yongping; LI, Xiaoyu; HOU, Fuqin; WU, Yanyan; WANG, Lili. Effect of inoculating microorganisms in chicken manure

composting with maize straw. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 301, p. 122730, abr. 2020. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122730>.

WANG, Shi-Peng; ZHONG, Xiao-Zhong; WANG, Ting-Ting; SUN, Zhao-Yong; TANG, Yue-Qin; KIDA, Kenj. Aerobic composting of distilled grain waste eluted from a Chinese spirit-making process: The effects of initial pH adjustment. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 245, p. 778-785, dez. 2017. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.051>.

WAQAS, Muhammad. M.; NIZAMI, Abdul. S.; ABURIAZAIZA, Asad. S.; BARAKAT, MA; ASAM, Zaki. U. Z; KHATTAK, Baharullah; RASHID, Muhammad.I. Untapped potential of zeolites in optimization of food waste composting. **Journal Of Environmental Management**, [S.L.], v. 241, p. 99-112, jul. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.014>.

WEI, Yuquan; WANG, Ning; LIN, Yongfeng; ZHAN, Yabin; DING, Xiaoyan; LIU, Yongdi; ZHANG, Ake; DING, Guochun; XU, Ting; LI, Ji. Recycling of nutrients from organic waste by advanced compost technology- A case study. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 337, p. 125411, out. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125411>.

WU Junqiu; ZHAO, Yue; YU, Huimin; WEI, Dan; YANG, Tianxue; WEI, Zimin; LU, Qian; ZHANG, Xu. Effects of aeration rates on the structural changes in humic substance during co-composting of digestates and chicken manure. **Science of The Total Environment**, [s.l.], v. 658, p. 510-520, mar. 2019. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.198>.

YANG, Fan; LI, Guo Xue; YANG, Qing Yuan; LUO, Wen Hai. Effect of bulking agents on maturity and gaseous emissions during kitchen waste composting. **Chemosphere**, [s.l.], v. 93, p.1393-1399, oct. 2013. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.07.002>.

YUA, Jing; GU, Jie; WANG, Xiaojuan; GUO, Honghong; WANG, Jia; LEI, Liusheng; DAI, Xiaoxia; ZHAO, Wenya. Effects of inoculation with lignocellulose degrading microorganisms on nitrogen conversion and denitrifying bacterial community during aerobic composting. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 313, p.123664, oct. 2020. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123664>.

YU, Keifei; LI, Suyan; SUN, Xiangyang; KANG, Yue. Maintaining the ratio of hydro soluble carbon and hydro soluble nitrogen within the optimal range to accelerate green waste composting. **Waste Management**, [s.l.], v. 105, p. 405-413, mar. 2020. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.02.023>.

YU, Yanshuang; CHEN, Longjun; FANG, Yu; JIA, Xianbo; CHEN, Jichen. High temperature scan effectively degrades residual tetracyclines in chicken manure through composting. **Journal of Hazardous Materials**, [s.l.], v. 380, 120862, dez. 2019. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120862>.

ZHANG, Lu; SUN, Xiangyang. Effects of rhamnolipid and initial compost particle size on the two-stage composting of green waste. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 163, p. 112-122, jul. 2014. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.04.041>.

ZHANG, Quanguo; HU, Jianjun; LEE, Duu-jong. Biogas from anaerobic digestion processes: research updates. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 98, p. 108-119, dez. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.029>.

ZHANG, Wenming; YU, Chenxu; WANG, Xujie; HAI, Long. Increased abundance of nitrogen transforming bacteria by higher C/N ratio reduces the total losses of N and C in

chicken manure and corn stover mix composting. *Bioresource Technology*, [S.L.], v. 297, p. 122410, fev. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122410>.

ZHOU, Xule; YANG, Jiaqian; XU, Shuning; WANG, Jiade; ZHOU, Qingqing; LI, Yiren; TONG, Xinyi. Rapid In-situ composting of household food waste. **Process Safety and Environmental Protection**, [s.l.], v. 141, p. 259-266, sep. 2020. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.05.039>.

ZHOU, Zhaozhi; TANG, Yuanjun; DONG, Jun; CHI, Yong; NI, Mingjiang; LI, Nan; ZHANG, Yongfang. Environmental performance evolution of municipal solid waste management by life cycle assessment in Hangzhou, China. **Journal of Environmental Management**, [s.l.], v. 227, p. 23-33, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.083>.

APÊNDICE D – Tabela de resultados do parâmetro Relação C/N
(Teor de Carbono Orgânico Total em mg L-1 e o Teor de Nitrogênio Total em mg L-1 (N-NH₄⁺))

Experimento/ Tempo	1º dia	5º dia	10º dia	15º dia	20º dia	25º dia
1	29,6	21,93	14,98			
2	29,65	27,42	14,31	11,93	11,28	
3	29,6	21,73	14,5			
4	30,63	23,04	14,94	12,72	11,79	
5	26,75	18,51	14,4			
6	28,29	19,92	16,19	13,04	11,06	
7	26,75	18,92	14,24			
8	28,25	21,5	15,62	13,08	12,35	
9	28,3	21,43	13,73	10,67		
10	29	24,13	15,32	14,53		
11	27,31	23,5	16,09	13,79		
12	28,46	22,33	14,69	13,35		
13	27,39	23,01	17,43	13,97		
14	27,38	20,44				
15	30,8	23,33	16,26	12,28	11,79	11,29
16	29,31	24,68	13,16	10,62		
17	29,27	24,77	4,72	10,37		