



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO FRRJ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA PROGRAMA DE PÓS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL**

DISSERTAÇÃO

**ANÁLISE DA MATURIDADE PARA USO AGRONÔMICO DE
RESÍDUO SÓLIDO GERADO DA DESIDRATAÇÃO TÉRMICA E
MECÂNICA DE RESTOS DE ALIMENTOS**

Fabiana Loureiro dos Reis

2024



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL

ANÁLISE DA MATURIDADE PARA USO AGRONÔMICO DE RESÍDUO
SÓLIDO GERADO DA DESIDRATAÇÃO TÉRMICA E MECÂNICA DE
RESTOS DE ALIMENTOS

FABIANA LOUREIRO DOS REIS

Sob a Orientação do Professor
Dr. Caio de Teves Inácio

e Co-orientação do professor
Dr. Marco Antônio de Almeida Leal

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestra em Engenharia Agrícola e Ambiental**, no curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental, Área de Concentração em Meio Ambiente.

Seropédica – RJ Maio
de 2024.

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central/Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
Com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R375a Reis, Fabiana Loureiro dos , 1977-
Análise da maturidade para uso agrônômico de
resíduos sólidos gerado da desidratação térmica e
mecânica de restos de alimentos. / Fabiana Loureiro
dos Reis. - Seropédica, 2024.
81 f.

Orientador: Caio de Teves Inácio.
Coorientador: Marco Antônio de Almeida Leal.
Dissertação (Mestrado). -- Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em
Engenharia Agrícola e Ambiental - PGEAAmb/Engenharia
Agrícola e Ambiental, 2024., 2024.

1. Germinação. 2. Substratos. 3. Torta orgânica. 4.
Vigor de semente. I. Inácio, Caio de Teves,
26/05/1974-, orient. II. Leal, Marco Antônio de
Almeida , 20/04/1966-, coorient. III Universidade
Federal Rural do Rio de Janeiro. Programa de Pós
graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental -
PGEAAmb/Engenharia Agrícola e Ambiental, 2024.. IV.
Título.

É permitida a cópia parcial ou total desta Dissertação, desde que seja citada a fonte.

**“O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal
de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001”**

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA E
AMBIENTAL

FABIANA LOUREIRO DOS REIS

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestra**, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental área de Concentração em Meio Ambiente.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 08/05/2024.

Caio de Teves Inácio. Dr. Embrapa Agrobiologia.
(Orientador)

Alexander Silva de Resende. Dr. Embrapa Agrobiologia
(Membro)

Henrique Vieira de Mendonça. Dr. UFRRJ.
(Membro).



ATA Nº ATA 77/2024 - PPGEAAMB (12.28.01.00.00.00.40)
(Nº do Documento: 1583)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 08/05/2024 13:50)
HENRIQUE VIEIRA DE MENDONÇA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
PPGEAAMB (12.28.01.00.00.00.40)
Matricula: ###331#3

(Assinado digitalmente em 08/05/2024 17:01)
ALEXANDER SILVA DE RESENDE
ASSINANTE EXTERNO
CPF: ###.###.497-##

(Assinado digitalmente em 08/05/2024 14:10)
CAIO DE TEVES INÁCIO
ASSINANTE EXTERNO
CPF: ###.###.757-##

(Assinado digitalmente em 09/05/2024 13:02)
FABIANA LOUREIRO DOS REIS
DISCENTE
Matricula: 2021#####4

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrrj.br/documentos/> informando seu número: **1583**, ano: **2024**,
tipo: **ATA**, data de emissão: **08/05/2024** e o código de verificação: **f50d54f797**

“Afagar a terra
Conhecer os desejos da terra Cio
da terra, propícia estação E
fecundar o chão”

Milton Nascimento.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha mãe Elza Loureiro dos Reis, ao meu pai Maurílio Lourenço dos Reis (In memoriam), aos meus irmãos: Alexandre Loureiro dos Reis (In memoriam), Andreia Loureiro dos Reis Teodoro, à minha filha Letícia Albertina Loureiro dos Reis Teodoro. A todos, com muito carinho, que tiveram compreensão, me deram apoio e contribuição para minha formação acadêmica.

AGRADECIMENTOS

“Quem caminha sozinho pode até chegar mais rápido, mas aquele que vai acompanhado, com certeza vai mais longe” (Clarice Lispector).

Em primeiro lugar agradeço a Deus, pelo dom da vida, por mais essa conquista, pela proteção e cuidados a mim dedicados, pela oportunidade de poder estudar, por colocar pessoas maravilhosas no meu caminho e por me dar forças e saúde para lutar pelos meus sonhos.

Aos meus queridos pais Maurílio Lourenço dos Reis (In memoriam) e Elza Loureiro dos Reis, por serem exemplos para mim, por todo amor, incentivo e apoio durante toda minha vida. À minha filha Letícia Albertina Loureiro dos Reis Teodoro, pelo amor, amizade e incentivo.

Aos meus amigos queridos: Fabiana de Araújo, Nélia Dalúvia Camba, Stéffany Aparecida Ribeiro por todo apoio, comprometimento, por acreditarem no projeto e não medirem esforços para ajudar em todas as etapas da pesquisa, tornando essa trajetória mais alegre, leve e feliz. Sem a ajuda de vocês eu não teria conseguido chegar até aqui, contem comigo sempre!

Um agradecimento especial ao meu querido amigo Carlos Wagner Rodrigues do Nascimento, por estar comigo desde o processo seletivo do programa, por me incentivar, me encorajar, por me dar forças e estar presente em todos os momentos. Sem você não teria chagado até aqui. Serei eternamente grata pela sua amizade.

Aos meus familiares e amigos, pelo amor, por acreditarem em mim e por torcerem pelo meu sucesso profissional.

Ao professor Dr. Caio de Teves Inácio, meus agradecimentos por acreditar em mim e por todo apoio, paciência, incentivo e orientação neste trabalho.

Ao meu Co-orientador Dr. Marco Antônio de Almeida Leal pela disponibilidade e apoio.

Ao técnico do Laboratório de Agricultura Orgânica Rosinaldo Feital do Couto, pela amizade, confiança e por todo auxílio.

Aos professores e aos amigos do curso de pós-graduação de Engenharia Agrícola e Ambiental, pelos conhecimentos transmitidos ao longo dessa trajetória.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – código de financiamento 001, pelo apoio financeiro.

Ao Laboratório de Química Agrícola pela disponibilidade de infraestrutura e recursos.

Ao programa de pós-graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental (PGEAAMB), pela oportunidade de realizar o curso e desenvolver esta pesquisa.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, pela disponibilidade de infraestrutura e recursos, e principalmente, por fornecer condições que viabilizaram a realização do meu maior sonho: estudar.

A todos que direta ou indiretamente colaboraram para realização deste trabalho.

RESUMO

REIS, Fabiana Loureiro Dos. **Análise da maturidade para uso agrônômico de resíduo sólido gerado da desidratação térmica e mecânica de restos de alimentos**. 2024. 81p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola e Ambiental, Meio Ambiente). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2024.

O desperdício anual de restos de alimentos é significativo e causa vários impactos negativos ao meio ambiente como a emissão de gases do efeito estufa em aterros sanitários. Uma alternativa para o reaproveitamento desses resíduos é utilizá-los como matéria-prima para a compostagem ou para substratos após estabilização fazendo retornar nutrientes e carbono para o solo e cultivos vegetais. Neste sentido, é importante realizar análises de estabilidade e maturidade do produto final, o composto orgânico, antes de seu uso como insumo na agricultura ou como substrato de mudas. Este trabalho tem como objetivo a análise da maturidade do produto final do tratamento térmico e mecânico de restos alimentares (chamados “composteiras elétricas”). Para isso, foram realizadas análises laboratoriais para determinar o Potencial Hidrogeniônico, a Condutividade Elétrica e composição química do Resíduo Alimentar Processado (RAP) para a determinação dos teores de carbono, nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio. Para análise de estabilidade biológica e maturidade química foram realizados os testes no RAP e no composto orgânico proveniente da compostagem do RAP com bagaço de cana-de-açúcar comparados a substrato comercial Carolina®, composto orgânico Organosolo® e vermiculita. Testes de germinação com sementes de pepino (*Cucumis sativus*) foram realizados em duas etapas: primeiro o teste de germinação realizado em placas de Petri para determinação do Índice de Germinação (IG %), com base no número de sementes germinadas e alongamento da raiz. O segundo teste de germinação e vigor utilizou-se sementeiras com 36 células em três testes: (1): vermiculita, vermiculita com RAP, Carolina®; (2) vermiculita, vermiculita com Organosolo®, Carolina®; (3): vermiculita, vermiculita com composto orgânico, Carolina®. Posteriormente, foram observadas os

I.G. % através do número de sementes germinadas e crescimento das plântulas. O terceiro teste foi a análise da estabilidade dos compostos através do teste de respirometria, que determinou as emissões de CO₂ e NH₃ dos materiais, utilizando armadilhas de NaOH e H₃BO₃. Por fim foi realizado a compostagem em biorreatores de bancada dos materiais RAP com bagaço de cana-de-açúcar para avaliar o potencial como matéria-prima para compostagem do RAP. Foram observadas diferenças significativas nos Índices de Desenvolvimento (%) peso, comprimento e área foliar em ambos os testes em bandeja onde não houve emergência das sementes com o substrato contendo RAP, indicando que o produto apresenta fitotoxicidade. Nos testes de germinação em placa de Petri, o IG% da RAP, apresentou um valor de 29,5%, indicando um composto imaturo. No teste de estabilidade, RAP não apresentou emissão de CO₂ evidenciando ausência de atividade biológica, possivelmente pela acidez e tratamento térmico sofrido no processamento. A compostagem em biorreator de bancada, mostrou-se eficiente para tratamento do RAP, pois o composto final apresentou IG % = 103. Entende-se que as técnicas utilizadas para determinar a maturidade do potencial de uso agrônômico do composto RAP foram eficientes e demonstraram que o composto apresentou fitotoxicidade, isto é, impróprio para uso como substrato em viveiros e apresenta limitação para aplicação no solo

agrícola. Porém com a compostagem houve melhora nas características finais do produto tornando-o próprio para uso.

Palavras-chave: torta orgânica; substratos; germinação; vigor de semente

ABSTRACT

REIS, Fabiana Loureiro Dos. **Analysis of the maturity and potential for agronomic use of solid waste generated from thermal and mechanical dehydration of food waste.** 2024. 81p. Dissertation (Master's in Agricultural and Environmental Engineering, Environment). Institute of Technology, Department of Engineering, Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2024.

The annual waste of food leftovers is significant and causes various negative impacts on the environment, such as the emission of greenhouse gases in landfills. One alternative for the reuse of these residues is to use them as raw material for composting or substrates after stabilization, returning nutrients and carbon to the soil and plant cultivation. In this sense, it is important to carry out analyses of the stability and maturity of the final product, the organic compost, before its use as an input in agriculture or as a seedling substrate. This work aims to analyze the maturity of the final product from the thermal and mechanical treatment of food leftovers (called "electric composters"). For this, laboratory analyses were performed to determine the Hydrogen Potential, Electrical Conductivity, and chemical composition of the Processed Food Residue (PFR) to determine the levels of carbon, nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, and magnesium. For biological stability and chemical maturity analysis, tests were conducted on the PFR and the organic compost derived from the composting of PFR with sugarcane bagasse, compared to commercial substrates Carolina®, Organosolo® organic compost, and vermiculite. Germination tests with cucumber seeds (*Cucumis sativus*) were performed in two stages: first, the germination test conducted in Petri dishes to determine the Germination Index (GI%), based on the number of germinated seeds and root elongation. The second germination and vigor test used seedling trays with 36 cells in three tests: (1): vermiculite, vermiculite with PFR, Carolina®; (2): vermiculite, vermiculite with Organosolo®, Carolina®; (3): vermiculite, vermiculite with organic compost, Carolina®. Subsequently, the G.I.% were observed through the number of germinated seeds and seedling growth. The third test was the stability analysis of the compounds through the respirometry test, which determined the CO₂ and NH₃ emissions from the materials, using NaOH and H₃BO₃ traps. Finally, composting in bench bioreactors of PFR materials with sugarcane bagasse was carried out to evaluate the potential of PFR as a raw material for composting. Significant differences were observed in the Development Indices (%) weight, length, and leaf area in both tray tests, where there was no seed emergence with the substrate containing PFR, indicating that the product presents phytotoxicity. In the germination tests in Petri dishes, the G.I.% of PFR was 29.5%, indicating an immature compound. In the stability test, PFR did not show CO₂ emission, evidencing the absence of biological activity, possibly due to the acidity and thermal treatment undergone in processing. Composting in the bench bioreactor proved efficient for PFR treatment, as the final compost presented GI % = 103. It is understood that the techniques used to determine the maturity and potential agronomic use of the PFR compost were efficient and demonstrated that the compost showed phytotoxicity, making it unsuitable for use as a substrate in nurseries and limiting its application in agricultural soil. However, with composting, there was an improvement in the final characteristics of the product, making it suitable for use.

Key words: organic cake, substrates, germination, seed vigor.

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Valores de Carbono Orgânico (C) e Capacidade de Troca Catiônica (CTC) expressos em base seca; 2. Valor de Nitrogênio (N) deve se referir ao produto tal qual comercializado. Fonte: MAPA (2020)	19
Tabela 2. Valores de macronutrientes primários, macronutrientes secundários e micronutrientes, quando garantidos isoladamente ou em misturas de nutrientes para os fertilizantes orgânico misto e orgânico composto sólidos (continua).....	19
Tabela 3. Classificação dos indicadores de Maturidade do composto orgânico e taxa de evolução de dióxido de carbono através do teste de estabilidade.....	21
Tabela 4. Valores de pH e CE dos materiais sólidos: RAP, Carolina®, Organosolo® e vermiculita.	35
Tabela 5. Valores da composição elementar do material RAP.....	35
Tabela 6. Valores do Índice de Germinação das sementes de pepino germinadas no extrato do composto em placas de Petri. (continua).	36
Tabela 7. Valores médios do Índice de Desenvolvimento da planta (%): peso, comprimento, do Tratamento 1, obtidas após 3 dias de germinação das sementes de pepino em placas de Petri.....	37
Tabela 8. Valores médios do Índice de Germinação (%), obtidas após 7 dias de germinação das sementes de pepino em bandejas.....	39
Tabela 9. Valores médios do Índice de Desenvolvimento (%): peso, comprimento e Área Foliar, obtidas após 7 dias de germinação das sementes de pepino em bandejas do Tratamento 1.....	40
Tabela 10. Valores médios do Índice de Germinação (%) das plantas, obtidos após 7 e 14 dias de germinação das sementes de pepino em bandejas - Tratamento 2.....	41
Tabela 11. Valores médios do Índice de Desenvolvimento (%) de: peso, comprimento e área foliar das plantas, obtidos após 7 dias de germinação das sementes de pepino em bandejas - Tratamento 2.	43

Tabela 12. Teste de estabilidade de materiais orgânicos por meio de incubação e da captura conjunta de CO₂ e de NH₃..... 45

Tabela 13. Dados relacionados ao valor de MF e MS dos materiais utilizados na compostagem em biorreatores de bancada. (continua)..... 45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Valores de pH comumente encontrados durante a compostagem. Fonte: Kiehl (1985).	10
Figura 2. Curva padrão de temperatura durante a compostagem. Fonte: adaptado de Kiehl (1985)	13
Figura 3. Processo de decisão de Índice de maturidade do composto.....	21
Figura 4. Composteira elétrica para desidratação das sobras de alimentos, frutas e verduras (A). Torta resultante do processo de desidratação na composteira elétrica (B). 24	
Figura 5. Croqui da disposição dos tratamentos nas bandejas para o teste de germinação de sementes de pepino. A disposição dos materiais segue a seguinte ordem: Fileira 1 e 4: vermiculita; Fileira 2 e 5: tratamento; Fileira 3 e 6: substrato comercial Carolina®. 27	
Figura 6. Aparelho LI- C área Meter utilizado para medir a Área Foliar (cm) das plantas germinadas.....	28
Figura 7. Biorreatores utilizados no laboratório de bioprocessos na Embrapa-solos. Foto ilustrativa. Fonte: Ramos (2019)	31
Figura 8. Rotâmetro para ajuste de vazão utilizado no laboratório de bioprocessos na Embrapa solos. Foto ilustrativa. Fonte: Ramos (2019).	32
Figura 9. Controle de diferencial de temperatura Fonte: Ramos (2019).....	33
Figura 10. 300 g de RAP (A) e 300 g de bagaço de cana-de-açúcar (B), colocados em mistura (RAP com bagaço de cana-de-açúcar e água destilada) para compostagem em biorretator de bancada (A).....	34
Figura 11. Teste de germinação das sementes de pepino em placas de Petri. Tratamento com RAP no 1º dia (A). Teste de germinação das sementes de pepino em placas de Petri. Tratamento com RAP no 3º dia (B).	37
Figura 12. Teste de germinação das sementes de pepino em placas de Petri. Tratamento com composto orgânico (compostagem de RAP com bagaço de cana-de-açúcar) 1º dia (A) Tratamento com composto orgânico 3º dia (B)	38

Figura 13. Índice de Germinação (%) de sementes de pepino em placas de Petri no 3º dias do Tratamento 1.	38
Figura 14. Teste de germinação de sementes de pepino em bandejas – Tratamento 1: vermiculita (fileiras 1 e 4), RAP com vermiculita (5:1) (fileiras 2 e 5), carolina® (fileiras 3 e 6). Após 7 dias.	39
Figura 15. Valores de IG (%) das sementes de pepino germinadas em bandejas do Tratamento 1.....	40
Figura 16. Teste de germinação de sementes de pepino em bandejas – Tratamento 2: vermiculita (fileiras 1 e 4), organosolo® com vermiculita (5:1) (fileiras 2 e 5), carolina® (fileiras 3 e 6). Após 7 dias (A) e 14 dias (B).....	41
Figura 17. Valores de IG (%) das sementes de pepino germinadas em bandejas dos Tratamentos 1 aos 7 dias (A) e do Tratamento 2 aos 7 dias (B) e 14 dias (C).	42
Figura 18. Teste de germinação de sementes de pepino em bandejas – Tratamento 3: vermiculita (fileiras 1 e 4), composto orgânico com vermiculita (5:1) (fileiras 2 e 5), carolina® (fileiras 3 e 6). Após 7 dias.....	44
Figura 19. Teste de respirometria após incubação realizado com RAP.	46
Figura 20. Fases do perfil típico de temperatura de um processo de compostagem Fonte: adaptado de RYNK 1992.....	47
Figura 21. Mistura do material RAP com bagaço de cana-de-açúcar antes (A) e após ser inserida em biorreator de bancada (B).....	48
Figura 22. Primeira abertura do biorreator: sexto dia de compostagem. Revolvimento da mistura (A). Mistura inserida em biorreator após revolvimento (B).	48
Figura 23. Segunda abertura do biorreator: décimo terceiro dia de compostagem (A). Revolvimento da mistura do material a ser compostado. Presença de fungos - fase mesofílica. Revolvimento do material (B).	49
Figura 24. Terceira e última abertura do biorreator: décimo nono dia, final da compostagem. Presença de actinomicetos - fase de maturação (A). Composto final (B).	49

Figura 25. Perfis de temperatura apresentados no biorreator ao longo do processo de compostagem dos materiais: RAP e bagaço de cana-de-açúcar..... 50

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública de Resíduos Especiais
AF	Área Foliar
ANOVA	Análise de variância
B	Boro
C	Carbono
Ca	Cálcio
CDT	Coeficiente diferencial de temperatura
CE	Condutividade elétrica
CH ₃	Metano
Cl	Cloro
C/N	Relação C/N
Co	Cobalto
CO ₂	Dióxido de carbono
CTC	Capacidade de troca catiônica
Cu	Cobre
CV	Coeficiente de variância
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DIC	Delineamento inteiramente casualizado
DP	Desvio padrão
FAO	Nações Unidas para Alimentação e Agricultura da ONU
Fe	Ferro
GEE	Gases do efeito estufa
H	Hidrogênio
H ₃ BO ₃	Ácido bórico
ID	Índice de desenvolvimento
IG	Índice de Germinação

IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
K	Potássio
K ₂ O	Potássio
MAPA	Ministério da Agricultura e Pecuária
MF	Massa fresca
Mg	Magnésio
Mn	Manganês
MMA	Ministério do Meio Ambiente
Mo	Mobilidênio
MO	Matéria orgânico
MS	Massa seca
N	Nitrogênio
NaOH	Hidróxido de sódio
NH ₃	Amônia
Ni	Níquel
N ₂ O	Óxido nitroso
O ₂	Oxigênio
P	Fósforo
pH	Potencial hidrogeniônico
PNRS	Política Nacional de Resíduos Orgânicos
P ₂ O ₅	Fósforo
RAP	Resíduo alimentar processado
RAS	Regras para análise de sementes
RSO	Resíduo sólido orgânico
S	Enxofre
Se	Selênio
Si	Silício
TMEEC	Test Method for the Examination of Composting and Compost
Zn	Zinco.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	2
2.1. Resíduos Sólidos Orgânicos (RSO)	2
2.2. Resíduos Low Cost	3
2.3. Compostagem	4
2.3.1. Etapas da compostagem	6
2.3.2. Fatores que determinam o processo de compostagem	8
2.3.2.1. Parâmetros biológicos	8
2.3.2.2. Potencial hidrogeniônico (pH)	9
2.3.2.3. Condutividade Elétrica (CE)	11
2.3.2.4. Relação C/N	12
2.3.2.5. Temperatura e umidade	12
2.3.2.6. Granulometria	15
2.3.2.7. Aeração e altura da leira	16
2.4. Maturação	16
2.4.1. Teste de germinação e fitotoxicidade	20
2.5. Fertilizantes orgânicos e a qualidade do composto	22
3 MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1. Área de estudo	23
3.1.1 Coleta do material de estudo RAP	23
3.1.2. Análises laboratoriais	24
3.1.2.1. pH e CE	24
3.2. Determinação da fonte de matéria orgânica e da sua composição química	24
3.2.1. Descrição do procedimento experimental	24
3.2.1.1. Ensaio 1 – Teste de germinação na placa de Petri	24
3.2.1.2. Análise Estatística	25
3.2.1.3. Ensaio 2: Teste de germinação em bandejas	26
3.2.1.3.1. Análise Estatística	28

3.2.1.4. Ensaio 3: Teste de estabilidade do composto.....	28
3.2.1.4.1. Coleta das amostras	29
3.2.1.4.2. Cálculos	29
3.2.1.5. Ensaio 4: Compostagem em biorreator de bancada	30
3.2.1.5.1. Sistema de fluxo de ar	31
3.2.1.5.2. Sistema de controle diferencial de temperatura (CDT).....	32
3.3. Experimento de compostagem.....	33
3.3.1. Balanço de massa	34
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	34
4.1. Análises laboratoriais	34
4.2. Teste de germinação em placas de Petri.....	36
4.3. Teste de germinação em sementeiras.....	38
4.3.1. Tratamento 1: Carolina® (controle positivo), RAP com vermiculita + Vermiculita (controle negativo)	38
4.3.2. Tratamento 2: Carolina® (controle positivo), Organosolo® com vermiculita + Vermiculita (controle negativo).....	41
4.3.3. Tratamento 3: Carolina® (controle positivo) + Composto resultado da compostagem de	44
4.4. Teste de Respirometria	45
4.5. Compostagem em biorreator de bancada	45
4.5.1. Mistura base	45
5 CONCLUSÃO	50
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51

INTRODUÇÃO

O Impacto ambiental decorrente da produção anual de resíduos, incluindo os restos de alimentos desperdiçados, é significativo e tem várias ramificações. De acordo com a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO, 2017), a cada ano 1,3 bilhões de toneladas de alimentos são desperdiçados no mundo, o que corresponde a cerca de 30% da produção total mundial. As perdas também impactam a economia, com cerca de 750 bilhões de dólares por ano. Dentro dessa perspectiva é importante criar alternativas para reduzir a quantidade de resíduos alimentares que vão parar em aterros sanitários.

Dados fornecidos pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2022), indicam que cerca de 81,8 milhões de toneladas de resíduos sólidos foram gerados em 2022, o que corresponde a 224 mil toneladas diárias. Com isso, cada brasileiro gerou, em média, 1,043 kg de resíduos por dia e 381 kg por ano.

Esse desperdício evidencia uma falta de conscientização na sociedade sobre a significativa quantidade de resíduos orgânicos gerados, os quais poderiam ser reaproveitados de maneira mais eficiente. A gestão sustentável desses resíduos é crucial para reduzir o impacto ambiental e promover uma abordagem mais responsável em relação aos recursos alimentares (Busato; Ferigollo, 2018).

Uma das formas mais adequadas de reaproveitamento é a utilização desses resíduos como matéria-prima para substratos e fertilizantes úteis. Atualmente, nas propriedades rurais, diversos materiais orgânicos são utilizados na composição de diferentes substratos agrícolas (Ribeiro, 2023).

Nesse sentido, a compostagem destaca-se como uma alternativa biotecnológica de tratamento de resíduos Sólidos Orgânicos (RSO) com finalidades agronômicas bem-sucedida, especialmente em culturas hortícolas de alto valor, é essencial que os compostos sejam estáveis e tenham maturidade ideal (Wang *et al.*, 2004).

A utilização de diferentes parâmetros adequados para determinar a maturidade e/ou estabilidade dos compostos permitirá ampliar o nosso conhecimento sobre o processo de compostagem.

O material trabalhado nessa dissertação é um Resíduo Alimentar Processado (RAP), que é proveniente de restos de alimentos que passa por um tratamento térmico e mecânico, realizado através de uma “composteira elétrica”, onde o material é desidratado. Esse processo é uma alternativa para reduzir o volume de resíduos alimentares e é utilizado como

adubo orgânico, mas pouco se sabe sobre sua qualidade e estabilidade do produto final para esse fim.

O presente estudo apresenta a seguinte hipótese científica: 1) O material resíduo sólido gerado da desidratação térmica e mecânica de restos de alimentos tem a mesma qualidade (maturidade) de um composto orgânico resultante da compostagem.

O trabalho teve como objetivo então realizar testes padronizados e reconhecidos para avaliar também avaliar material resíduo sólido gerado da desidratação térmica e mecânica de restos de alimentos (RAP) do ponto de vista dos requisitos exigidos para classificação da maturidade de compostos orgânicos oriundos da compostagem.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Resíduos Sólidos Orgânicos (RSO)

Segundo duas diretrizes relacionadas à origem e composição química, os resíduos podem ser classificados como orgânicos ou inorgânicos. Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2004), RSO são aqueles provenientes de organismos vivos, como animais e plantas. Isso inclui resíduos de frutas, vegetais, especialmente em termos de Carbono (C), Oxigênio (O), Hidrogênio (H), Nitrogênio (N) e Enxofre (S), é essencial para compreender a matéria orgânica (MO) presente neles. Essa análise determina a capacidade de degradação e a qualidade do composto resultante, além de considerar aspectos ambientais e regulatórios (Russo, 2003). A MO alimenta e ao mesmo tempo protege nosso solo, então é preciso explorar dessa riqueza de forma sustentável (Kiehl, 2004).

De acordo com informações do Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2017), os RSO constituem uma parte significativa da quantidade total de resíduos sólidos gerados, representando cerca de 50% dos resíduos urbanos produzidos no Brasil. Devido sua alta biodegradabilidade, os RSO são facilmente recicláveis. Eles podem ser submetidos a processos como a compostagem, que permitem sua utilização como condicionador e melhorador de solos. No entanto, se esses resíduos orgânicos não forem gerenciados adequadamente, podem resultar em impactos ambientais e sociais negativos. (Zago; Barros, 2019).

A capacidade de rápida de decomposição dos resíduos orgânicos, geralmente ricos em nutrientes, permite que esses nutrientes voltem a estar disponíveis no solo por meio de processos naturais, caso sejam aplicados no ambiente. Esse processo é conhecido como ciclagem de nutrientes e contribui significativamente para a qualidade do solo, enriquecendo-

o com elementos essenciais para o crescimento das plantas e promovendo a fertilidade do solo (MMA, 2018).

Dentre as variáveis de resíduos gerados, os provenientes das atividades agropecuárias e da silvicultura ganham destaque devido à sua qualidade expressiva. Projeções indicam um crescimento significativo na geração de biomassa dessas atividades, citando que, em 2005, a oferta no Brasil era de 558 milhões de toneladas e que, em 2030, espera-se que alcance 1402 milhões de toneladas (Morais *et al.* 2017).

A técnica de compostagem foi desenvolvida para acelerar e melhorar a decomposição da matéria orgânica. Enquanto na natureza esse processo (decomposição) ocorre de forma indefinida, dependendo das condições ambientais e da qualidade dos resíduos, a compostagem oferece um ambiente controlado que facilita uma decomposição rápida e eficiente (Amlinger *et al.*, 2008).

A gestão de resíduos sólidos no Brasil ainda é uma área que enfrenta dificuldades, seja pelo desinteresse de muitos governantes ou pela falta de consciência ambiental da sociedade. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) criou uma série de mecanismos para ajudar a reduzir o impacto dos resíduos no meio ambiente e criar empregos para milhares de pessoas. No entanto, dado o pouco tempo durante o qual a política foi implementada, não podem ser apresentados resultados significativos em termos do impacto da política e da melhoria real da situação dos resíduos (Szigethy *et al.* 2020).

No entanto, os resíduos orgânicos também representam uma oportunidade valiosa para a sociedade. Do ponto de vista da economia circular, estes materiais podem ser transformados em fertilizante orgânico através da compostagem, fechando assim o ciclo dos nutrientes e reduzindo a dependência de recursos não renováveis.

2.2. Resíduos Low Cost

De acordo com Correia *et al.* (2003), resíduos agroindustriais estão sendo cada vez mais utilizados como substrato para minimizar seus potenciais impactos ambientais. Quando os resíduos sólidos orgânicos apresentam elevados teores de C e nutrientes, sua utilização como condicionador de solos na agricultura torna-se uma opção viável e desejável. Isso ocorre porque sua aplicação nos cultivos fornece nutrientes essenciais e melhora as características físicas e químicas do solo, como aumento da capacidade de troca de cátion (CTC), neutralização da acidez e maior retenção de umidade. Essas melhorias resultam em aumento na produtividade e qualidade dos produtos agrícolas, ao mesmo tempo em que reduzem os custos de produção (Abreu, 2005).

A utilização de co-substratos (agentes de volume e aditivos) na compostagem é uma estratégia eficaz para otimizar o processo de compostagem, melhorando o valor nutricional do composto final e minimizando os impactos ambientais. Uma mistura adequada para a co-compostagem deve atender aos seguintes objetivos principais: Otimizar as Condições de Aeração, Evitar a Compactação das Pilhas de Compostagem. Alcançar um Equilíbrio Eficiente da Relação C/N (Carbono/Nitrogênio), Garantir Frações de Carbono Biodegradáveis e Fonte de Energia para Microrganismos, Reduzir a Perda de N durante o Processo: (Cayuela *et al.*, 2009; Haug, 1993).

Os compostos orgânicos podem ser uma excelente matéria-prima alternativa para a formulação de substratos utilizados no cultivo de mudas de diversas espécies vegetais. Esses substratos, quando preparados corretamente, podem oferecer uma série de benefícios para o desenvolvimento das mudas (Marques, 2016; Paiva, 2017, Watthier *et al.*, 2017). A fibra de coco, casca de arroz, casca de pinus, compostos orgânicos, bagaço de cana-de-açúcar, húmus de minhoca, biossólidos, biochar, serragem dentre outros são amplamente utilizados na composição desses substratos (Kratz & Wendling, 2016; Silva, 2018).

A utilização de compostos provenientes da reciclagem de resíduos orgânicos como adubo recupera elementos essenciais para o solo, como nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K) e elementos traço. Esses compostos melhoram a estrutura do solo, sua capacidade de retenção de água e fornecimento de nutrientes, resultando em aumento da produtividade e qualidade dos alimentos (IPEA, 2012).

Entretanto, para que os resíduos sólidos possam ser efetivamente utilizados na agricultura, eles devem ser aplicados ao solo após passar por um certo nível de estabilização. A compostagem é um dos processos que promovem essa estabilização, tornando-se uma alternativa viável para o manejo, destinação e reciclagem de resíduos. (Dores-Silva *et al.*, 2013). Segundo Lim; Lee; Wu (2016) este método se destaca devido seus benefícios sociais e ambientais aliados à um baixo custo de operação.

2.3. Compostagem

De acordo com Kiehl (1998), a compostagem é uma técnica praticada desde a antiguidade como forma de fertilizar o solo. Antes mesmo da era cristã, chineses, gregos e romanos já devolviam os restos de plantas e resíduos animais ao solo. O termo "compostagem" está associado ao processo de tratamento e/ou estabilização de resíduos orgânicos, independentemente de sua origem, seja urbana, industrial, agrícola, florestal, entre outras.

Esse processo é um excelente método para reciclagem de resíduos orgânicos e produção de subprodutos com valor agregado. Basicamente, é o processo pelo qual a matéria orgânica complexa é degradada em substâncias orgânicas menos complexas e substâncias inorgânicas, que podem ser utilizadas como nutrientes pelas plantas (Stanley & Turner, 2010).

Segundo Pereira Neto (1987), Oliveira, Satori & Garcez (2008), a compostagem é considerada um processo de decomposição oxidativa biológica aeróbia de resíduos orgânicos sob condições adequadas. Esse processo é mediado por uma população diversificada de microrganismo termófilos e mesófilos, que degradam a matéria orgânica.

Como resultado, são produzidos compostos mineralizados ou matéria orgânica bioestabilizada na forma de substâncias húmicas, que possuem propriedades e características muito diferentes daqueles materiais que deram origem ao processo. Durante a decomposição biológica, há produção de calor e liberação de dióxido de carbono (CO₂) e vapor d'água, conforme evidencia a Figura 1 (Kiehl, 1998).

Além disso a compostagem reduz a fitotoxicidade, volume e umidade dos resíduos, transformando-os em fontes de matéria orgânica para uso na agricultura e no enriquecimento da fertilidade do solo. A eficácia desse composto como condicionador de solo ou fertilizante depende das propriedades químicas, físicas e biológicas do substrato utilizado (González-Fernandes *et al.*, 2015).

Para obter um substrato de qualidade por meio da compostagem, é essencial considerar fatores como aeração, ambiente, temperatura e tempo de execução do processo. Antes de iniciar a compostagem, é crucial analisar o local para determinar qual método é mais viável e trará os melhores resultados. Esse planejamento inicial ajuda a garantir condições ideais para o desenvolvimento eficaz dos microrganismos responsáveis pela decomposição da matéria orgânica, resultando em um composto de alta qualidade (MMA, 2017).

Na compostagem, a decomposição da matéria orgânica ocorre em duas fases distintas. Na primeira, chamada de bioestabilização, ocorrem reações bioquímicas intensas, predominantemente termofílicas e eliminação de bactérias patogênicas. Na segunda fase, denominada de maturação, ocorre a humificação, onde a matéria orgânica é estabilizada e se transforma em composto orgânico estável e rico em nutrientes (Gouveia, 2012).

O processo de reciclagem de resíduos e a geração de composto orgânico são impulsionados pelo metabolismo microbiano, que utiliza os elementos presentes no material.

Os nutrientes, especialmente o C e o N, são essenciais para a atividade microbiana, sendo o C a principal fonte de energia e o N indispensável para a síntese celular (Fernandes, 1999). Durante a compostagem, os microrganismos atuam em conjunto para liberar elementos químicos como N, P, K (potássio), Ca e Mg (magnésio) da forma orgânica (forma imobilizada) e passam para a forma de nutrientes mineralizados (forma mineralizada), tornando-os disponíveis para as plantas (Kiehl 1998);

O tempo de compostagem é variável e depende das características da mistura compostada especialmente da relação (C/N) no início do processo (Kiehl, 2010), sendo o monitoramento da temperatura o parâmetro mais utilizado para indicar a finalização do processo (Matos, 2014),

A eficiência da compostagem está diretamente ligada às condições ideais para a multiplicação e atuação de microrganismos aeróbios. Fatores como temperatura, umidade, aeração, pH, relação C/N e granulometria do material desempenham papéis essenciais nesse processo (Valente *et al.*, 2009).

Diante desse contexto, a compostagem emerge como um método de tratamento essencial na gestão de resíduos orgânicos, tanto em ambientes urbanos quanto rurais, independentemente do tamanho do município. Inácio & Miller (2009) destacam que essa prática não apenas contribui para a resolução de questões ambientais, mas também resulta em um produto benéfico para o solo na agricultura tropical brasileira. Portanto, a compostagem se revela como uma estratégia indispensável no manejo sustentável de resíduos, proporcionando benefícios tanto para o meio ambiente quanto para a produção agrícola local.

Como resultado da compostagem, obtém-se um composto orgânico estabilizado, com aspecto escuro semelhante ao húmus, combinado com sais minerais e nutrientes. Este composto atua como fertilizante ou condicionador natural, melhorando as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo e das plantas (Kiehl, 2010).

2.3.1. Etapas da compostagem

A compostagem constitui-se em quatro etapas, sendo elas a fase inicial, termofílica, mesofílica e de maturação. A fase inicial dura de dois a quatro dias, é caracterizado pela liberação de calor e rápida elevação da temperatura (até 45°C) devido à ação de microrganismos mesófilos que se multiplicam e iniciam a decomposição (Costa Filho, 2021).

Na fase termofílica da compostagem, a temperatura varia de 50°C a 70°C. Neste intervalo, predominam os microrganismos termofílicos aeróbios, principalmente bactérias. Essa etapa é caracterizada pela intensa decomposição, formação de água metabólica e vapor

d'água. A elevada atividade biológica pode levar à perda de oxigênio, e o pH diminui devido à volatilização da amônia (NH_3). Para lidar com esses processos, ocorre uma intensificação da aeração por meio do processo de convecção, onde o ar quente, sendo menos denso, sobe, permitindo a entrada de ar frio mais denso pela parte inferior da leira (Shueler; Mahler; Guião., 2012; MMA, 2017).

Na fase mesofílica, a temperatura começa a diminuir e estabiliza por volta de 45°C devido à diminuição da atividade bacteriana. Nesse estágio, há um aumento na presença de fungos e actinomicetos. Essa fase é caracterizada pela degradação da matéria orgânica mais resistente e pela perda de umidade. Se o processo de compostagem for natural, sem intervenção externa, a digestão completa pode levar de 60 a 90 dias. No entanto, o uso de técnicas como revolvimento e oxigenação forçada pode reduzir esse período (Shueler; Mahler; Guião Jr., 2012; MMA, 2017).

Para Hassen *et al.* (2001), ocorre uma quarta fase conhecida como fase de resfriamento e maturação. Nessa etapa, a temperatura da leira de compostagem diminui, atingindo valores em torno de 30°C no interior da pilha. Durante a fase de resfriamento e maturação da compostagem, a relação C/N tende a estabilizar, o que significa que a pilha de compostagem atinge um equilíbrio adequado para a atividade microbiana eficiente. Além disso, há o ressurgimento das bactérias e fungos mesofílicos, que são microrganismos adaptados a temperaturas moderadas e desempenham um papel importante na decomposição adicional da matéria orgânica durante essa fase. Essa atividade microbiana complementar ajuda a finalizar o processo de compostagem, resultando em um composto orgânico estável e rico em nutrientes.

Em síntese, no início da compostagem, os organismos degradam os compostos mais simples, como amidos, açúcares e aminoácidos. Em seguida, trabalham na decomposição de hemiceluloses e proteínas, substâncias mais resistentes, como algumas hemiceluloses, gorduras e óleos, que se decompõem mais lentamente (Pereira Neto, 2007). O produto resultante da decomposição da lignina, dos produtos mineralizados e das células mortas de microrganismos é o húmus, considerado o produto mais estável da transformação de substâncias orgânicas (Pereira Neto, 2007).

Além disso a eficiência da compostagem é determinada pela ação e interação dos microrganismos, tornando-a um processo biotecnológico. Essa eficiência está condicionada à ocorrência de condições favoráveis dos fatores parâmetros biológicos, pH, CE, relação C/N, temperatura, umidade, granulometria, aeração e altura da leira q maturação. Cada um desses

fatores tem implicações específicas na realização da compostagem de resíduos orgânicos e estão descritos a seguir.

2.3.2. Fatores que determinam o processo de compostagem

Os fatores a serem monitorados e controlados na compostagem estão relacionados à formulação inicial da matéria a ser degradada, como o tamanho da partícula e a relação C/N, bem como ao manejo e condução do processo, como a temperatura, o teor de água e a aeração (Bernal; Albuquerque; Moral, 2009; Kiehl, 2010; Li *et al.*, 2013; Juárez *et al.*, 2015). Esses elementos são essenciais para garantir que o ambiente de compostagem seja adequado para a atividade microbiana eficiente e para a produção de compostos orgânicos de alta qualidade.

O processo compostagem tem duas fases principais: a fase ativa, caracterizada por altas temperaturas e intensa decomposição, com liberação de calor, CO₂ e vapor d'água; e a fase de acabamento, em que a temperatura se equilibra com a ambiente, os organismos alcançam um equilíbrio dinâmico e ocorre a síntese de substâncias húmicas. O afinamento do composto corresponde à fase de pós-processamento mecânico, que visa melhorar as características granulométricas e remover contaminantes inertes não removidos na primeira etapa (Cerri, 2008; Cordeiro, 2010).

A eficiência do processo de compostagem está diretamente relacionada aos fatores que proporcionam condições ótimas aos microrganismos aeróbios para sua reprodução e sua atividade na transformação da matéria orgânica (Fernandes, 2021).

2.3.2.1. Parâmetros biológicos

As características físicas e químicas da matéria orgânica são completamente alteradas devido à intensa atividade microbiológica. Os microrganismos envolvidos na compostagem possuem peculiaridades que lhes permitem ser específicos na decomposição de diferentes tipos de materiais em várias etapas do processo (Pereira Neto, 2014).

Inácio & Miller (2009) dividem a matéria orgânica da compostagem em grandes grupos: substâncias com biodegradabilidade mais simples como carboidratos, açúcares, proteínas e gorduras, e; substâncias que apresentam uma decomposição mais lenta, são elas: hemicelulose, celulose e lignina que apresentam uma decomposição mais lenta. Segundo os autores as substâncias mais simples são fontes primárias de C e energia, importante no início da fase termofílica, enquanto que os grupos mais complexos, apesar de não serem fontes de C e energia prontamente disponíveis, são cruciais ao longo de todo o processo de compostagem.

O processo de decomposição é caracterizado por uma mudança contínua das espécies de microrganismos envolvidos. Isso ocorre devido às modificações nas condições do meio. Devido à complexidade e à dinâmica do ambiente compostado, é praticamente impossível identificar todas as espécies de microrganismos presentes durante o processo de compostagem (Miller, 1992).

Bactérias, fungos e actinomicetos são os principais microrganismos envolvidos na transformação da matéria orgânica em composto. Durante o processo de compostagem, a predominância desses microrganismos alterna-se, dependendo de vários fatores, como: relação C/N, pH, umidade, temperatura, disponibilidade de O₂ e natureza do material que está sendo decomposta no momento (Kiehl, 1985).

As bactérias constituem o grupo mais participante nas fases inicial e termofílica da compostagem. Esses microrganismos são altamente eficientes na decomposição de compostos de fácil degradação biológica, como açúcares, amidos e proteínas. (Massukado, 2008). Os actinomicetos e fungos desempenham papéis fundamentais na decomposição de compostos orgânicos mais complexos durante o processo de compostagem. (Inácio; Miller, 2009).

De acordo com Kiehl (1985), os resíduos orgânicos possuem naturalmente uma quantidade significativa de microrganismos que se multiplicam rapidamente, iniciando o processo de decomposição. Esses microrganismos são suficientes para iniciar e manter a compostagem sem a necessidade de inoculantes adicionais. Para Inácio & Miller (2009), compostos orgânicos, seja em estado pronto ou não, podem ser utilizados como material inoculante. O uso de inoculantes tem como objetivo acelerar a fase inicial do processo de compostagem

Segundo Chang *et al.* (2008), ajustar os fatores ambientais cria condições ideais para o desenvolvimento da microbiota original do material a ser decomposto na compostagem. Isso resulta na liberação de metabólitos e energia térmica, elevando e mantendo a temperatura dos resíduos em decomposição.

2.3.2.2. Potencial hidrogeniônico (pH)

O pH desempenha um papel crucial no processo de compostagem de resíduos orgânicos, sendo um indicador significativo do estado do material. Sua influência abrange tanto as reações físico-químicas quanto as biológicas durante o processo, sendo resultado da atividade microbiana que atua no composto ao degradar os resíduos, o que gera subprodutos ácidos ou básicos.

Valores de pH fora da faixa ideal (4,5-9,5) não limitam definitivamente o processo de compostagem, pois os microrganismos têm a capacidade de regular o ambiente através da degradação de compostos, produzindo subprodutos ácidos ou básicos conforme necessário (Pereira Neto, 2007).

Quando os níveis de pH estão abaixo de 4,5, é provável que ocorra uma redução significativa na atividade microbiana, o que pode impedir a fase termofílica do processo de compostagem. (Andreoli *et al.*, 2001). Segundo Russo (2003), materiais orgânicos com pH entre 3 e 11 podem ser compostados, porém os microrganismos se adaptam melhor em resíduos próximos à neutralidade, com variação entre 5,5 e 8. Quando os valores de pH estão acima de 9,5, há várias consequências negativas no processo de compostagem, incluindo deficiência de micronutrientes e P, bem como perdas de N por volatilização. (Massukado, 2008).

O processo de compostagem pode ser prejudicado se o pH estiver com valores muito extremos (seja para mais ou para menos).

Russo (2003) observa que controlar os valores de pH durante a compostagem é desafiador. No entanto, os microrganismos automaticamente ajustam o pH, produzindo subprodutos ácidos ou básicos conforme necessário, de acordo com o meio ambiente (Pereira Neto, 2014).

Após o início da compostagem, há uma fase conhecida como fitotóxica, caracterizada pela formação de ácidos orgânicos e uma diminuição de pH na massa compostada. No entanto, posteriormente, os ácidos reagem com as bases liberadas da matéria orgânica, resultando na formação de compostos com reação alcalina (Maragno; Trombin. Viana, 2007).

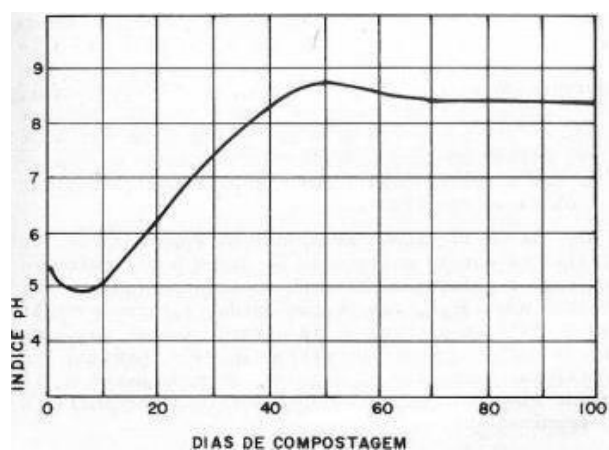


Figura 1. Valores de pH comumente encontrados durante a compostagem. Fonte: Kiehl (1985).

Fonseca (2012) destaca que o fator pH torna-se mais significativo em relação às perdas de N durante a compostagem. Isso ocorre devido a uma maior volatilização da amônia quando o valor de pH ultrapassa 7,5, especialmente em condições de altas temperaturas.

Durante o processo de compostagem, a decomposição microbiana dos resíduos orgânicos no leito de compostagem pode resultar na produção de ácidos orgânicos, como ácido acético, ácido cítrico e ácido lático (Zago & Barros, 2020). No entanto, a compostagem bem sucedida requer um equilíbrio entre os processos ácidos e alcalinos, e o resultado final geralmente é um pH próximo da neutralidade. Além disso, os ácidos orgânicos formados e vestígios de ácidos minerais reagem com as bases liberadas das substâncias orgânicas, criando compostos com reação alcalina (Pereira & Fiore, 2022).

A compostagem também pode ocorrer na faixa de pH entre 4,5 e 9,5, valores extremos são regulados automaticamente pelos microrganismos através da quebra de compostos que produzem subprodutos ácidos ou alcalinos, dependendo das necessidades do ambiente (Inácio & Miller, 2020). Todavia, um pH muito baixo ou alto reduz a atividade microbiana. Durante o processo, o valor do pH flutua devido à diferente composição do material orgânico. Ao final do processo, o pH se estabiliza, o que não é um fator crítico para a compostagem

2.3.2.3. Condutividade Elétrica (CE)

CE é outro parâmetro relacionado à qualidade do composto orgânico e ao grau de fitotoxicidade deste (Massukado, 2008). Ela também é usada para avaliar a salinidade de resíduos ou fertilizantes orgânicos. Durante a compostagem, os valores podem variar até atingir um ponto estável, indicando que o composto está pronto para uso (Kiehl, 2004). Segundo Araújo Neto *et al.* (2009) existem escalas para a avaliação dos valores ideais de CE em substratos, valores entre 2,0 e 4,0 dS m⁻¹ são considerados altos para substratos, valores de 1,0 a 2,0 dS m⁻¹ são considerados normais e valores abaixo de 1,0 dS m⁻¹ são considerados baixos. Já Minami & Salvador (2010), afirmam que valores de CE >0,14 dS m⁻¹ são considerados muito baixos, valores entre 0,15 e 0,49 dS m⁻¹ são considerados baixos, valores entre 0,5 e 1,79 dS m⁻¹ são considerados moderados, valores entre 1,8 e 2,24 dS m⁻¹ são considerados ligeiramente altos, valores entre 2,25 e 3,39 dS m⁻¹ são considerados altos e valores >3,4 dS m⁻¹ são considerados muito altos. Valores. Segundo consta em Test Method for the Examination of Composting and Compost (TMEEC) 05.05, (Thompson, 2001), mudas de pepino cultivadas em um composto com uma leitura de CE relativamente alta (>8 dS m⁻¹).

2.3.2.4. Relação C/N

A relação C/N é um indicador para avaliar o grau de maturidade da matéria orgânica e seu impacto no crescimento microbiano, uma vez que a atividade dos microrganismos heterotróficos envolvidos no processo depende tanto do teor de C como fonte de energia quanto do teor de N para síntese de proteínas (Sharma *et al.*, 2020).

De acordo com Pereira Neto (1996) Os microrganismos necessitam da presença de macro e micronutrientes para realizar suas atividades metabólicas durante o processo de compostagem. Entre os nutrientes mais importantes, destacam-se o C e o N, cuja concentração e disponibilidade biológica influenciam significativamente o desenvolvimento e a eficiência do processo de compostagem.

O equilíbrio da relação C/N é essencial na compostagem, pois cria as condições para a fixação dos nutrientes. Quanto mais diversos os nutrientes disponíveis, mais eficiente será a decomposição da matéria orgânica. O C é necessário para a produção de energia e o N para a síntese de proteínas e o crescimento celular. O equilíbrio desta relação é alcançado misturando resíduos alimentares ricos em N com matéria seca rica em C. A proporção ideal é uma mistura que produza uma relação C/N de 30:1 (Guermandi, 2015).

A relação C/N deve, portanto, ser determinada em função do equilíbrio de nutrientes do material a ser compostado e da qualidade do composto no produto final. A quantidade de N necessária por unidade de C varia dependendo do tipo de microrganismo envolvido no processo, e o tempo necessário para decomposição e mineralização é em grande parte determinado pela concentração de N do material orgânico.

2.3.2.5. Temperatura e umidade

A temperatura é considerada por muitos pesquisadores o mais importante indicador da eficiência do processo de compostagem e está intimamente relacionada com a atividade metabólica dos microrganismos, que é diretamente influenciada pelo grau de aeração (Fernandes, 2021; Kiehl, 2004; Tuomela *et al.*, 2000).

A temperatura desempenha um papel crucial na atividade microbiana durante o processo de compostagem e é um fator determinante para o sucesso do tratamento de resíduos orgânicos, ela influencia diretamente no fluxo de ar e perda da umidade. As faixas termofílicas são altamente desejáveis no processo de compostagem devido aos benefícios que proporcionam, especialmente no que diz respeito à destruição de patógenos e larvas de moscas (Inácio, Miller, 2009). Temperaturas acima de 60°C são consideradas especialmente

eficazes na eliminação de sementes de plantas invasoras, bem como de patógenos prejudiciais ao homem e às plantas durante o processo de compostagem (Kiehl, 1985).

Além disso, a temperatura é um indicador para analisar em que fase o processo está ocorrendo, sendo elas termofílica, mesofílica e de maturação.

Os organismos envolvidos na compostagem têm faixas ideais de temperatura para o desenvolvimento e variações deste fator podem afetar negativamente a atividade microbiana. Quando as leiras são construídas de acordo com critérios técnicos, espera-se observar temperaturas na faixa termofílica (acima de 40 °C) nas primeiras 12 a 24 horas após a montagem (Pereira Neto, 2014).

Esses valores devem ser mantidos ao longo da fase de degradação ativa até a transição para a fase de maturação, quando as temperaturas caem para valores abaixo de 40 °C. Este controle térmico é crucial para garantir um processo eficiente de compostagem.

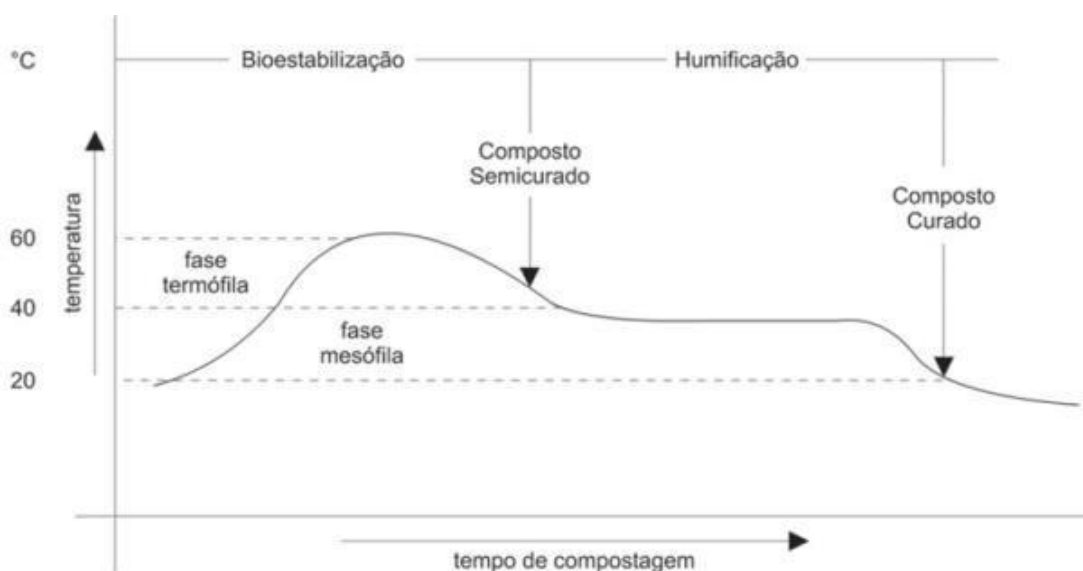


Figura 2. Curva padrão de temperatura durante a compostagem. Fonte: adaptado de Kiehl (1985).

Segundo Inácio & Miller (2009), na fase inicial as colônias de microrganismos mesófilos se expandem e a decomposição se intensifica, liberando calor e aumentando rapidamente as temperaturas. Esta fase dura até 24 horas antes que a temperatura no interior da massa de resíduos atinja 45°C. Pode ser mais longo (3 dias) ou mais curto (15 horas) dependendo das propriedades do material orgânico utilizado (Guermandi, 2015).

A fase termofílica é caracterizada por temperaturas acima de 45 °C, principalmente na faixa entre 50 e 65 °C, quando os microrganismos termofílicos (bactérias) estão plenamente ativos, com intensa decomposição do material, formação de água, armazenamento de calor e formação de vapor d'água. Na fase mesófila, os materiais mais resistentes são degradados por microrganismos mesófilos (fungos e actinomicetos), a atividade microbiana diminui e consequentemente a temperatura diminui e a umidade é perdida (Pereira & Fiore, 2022).

A etapa final é caracterizada pela maturação do composto com formação de substâncias húmicas, onde a atividade biológica é baixa e o composto perde sua capacidade de auto aquecimento (Zago & Barros, 2020).

Contudo, uma vez que o desenvolvimento da temperatura durante a compostagem, entre outras coisas, é influenciado por fatores como umidade do substrato, disponibilidade de nutrientes e tamanho da leira, não se pode dizer que o composto esteja maduro quando a temperatura da biomassa atinge valores próximos à temperatura ambiente (Carvalho, 2022).

O teor de umidade é essencial para a atividade metabólica e fisiológica dos microrganismos, sendo que a faixa ideal para compostagem está entre 50 e 60%. Um material com teor de umidade de 30% inibe a atividade microbiana, enquanto um meio com teor de umidade acima de 65% leva à decomposição lenta, condições anaeróbicas e lixiviação de nutrientes (Guermandi, 2015).

Entretanto, é importante evitar níveis de umidade abaixo de 40% na compostagem, pois isso pode reduzir a atividade biológica e retardar o desenvolvimento do processo (Valente *et al.*, 2009) Quando a umidade estiver baixa na pilha de compostagem, é importante irrigar a leira, preferencialmente durante o momento do revolvimento dos materiais. Isso garante que a água seja distribuída de forma uniforme por toda a pilha, promovendo uma umidade equilibrada e proporcionando as condições ideais para a decomposição eficiente dos materiais orgânicos (Massukado, 2008).

O teste da mão é uma técnica simples e rápida para determinar o grau de decomposição e maturidade do composto na compostagem. Consiste em umidificar e esfregar um pouco do composto entre as palmas das mãos. Se o composto estiver pronto, ele deixará as mãos sujas, mas se soltará facilmente. (Nunes, 2009).

A correção da umidade é feita misturando resíduos alimentares e matéria seca. A umidade também tem efeito indireto na temperatura do processo de compostagem, o que é consequência da atividade metabólica dos microrganismos na fase aquosa. Leite (2015) analisou a atividade biológica durante a compostagem do lodo de esgoto e descobriu que a

diminuição do teor de umidade afeta diretamente a atividade metabólica dos microrganismos e, conseqüentemente, a temperatura.

2.3.2.6. Granulometria

A granulometria refere-se ao tamanho das partículas dos resíduos a serem compostados. Ela desempenha um papel crucial no processo de compostagem, pois influencia diretamente o movimento de gases e líquidos na leira de compostagem (Kiehl, 2004).

Partículas menores proporcionam maior superfície de contato para os microrganismos, facilitando a degradação do material (Bernal; Albuquerque Moral, 2009). No entanto, podem causar problemas de aeração e compactação na leira de compostagem, levando à formação de condições anaeróbicas. Já partículas grossas, podem prolongar a degradação (Kiehl, 2010; Onwosi *et al.*, 2017) Para Inácio & Miller (2009), o tamanho ideal das partículas está entre 0,3 e 1,5 cm, já para Kiehl (2010), deve estar entre 2,5 e 7,5 cm. É essencial encontrar um equilíbrio na granulometria para garantir uma boa aeração e degradação eficiente do material orgânico (Fernandes & Silva, 1999; Inácio *et al.*, 2009).

O tamanho das partículas na pilha de compostagem tem um impacto significativo na proporção de água e ar no interior da pilha. Partículas maiores tendem a criar espaços vazios maiores, o que pode permitir uma melhor circulação do ar, mas também pode levar à drenagem excessiva da água. Por outro lado, partículas menores podem compactar mais facilmente, dificultando a difusão do ar e resultando em uma maior retenção de água nos poros (Rynk, 1992; Kiehl, 1998; Inácio; Miller, 2009 *apud* Pereira, 2017).

Alto teor de umidade e baixo tamanho de partícula são parâmetros que podem contribuir para o aumento da densidade da fração orgânica em decomposição dos resíduos. Sabe-se que à medida que a densidade aumenta, a eficiência do processo diminui, o que pode estar relacionado às dificuldades na distribuição de microrganismos, enzimas e outros produtos metabólicos microbianos, o que se deve ao alto grau de compactação do substrato e ao alto teor de umidade (Giacomini, 2016).

Portanto, a granulometria dos resíduos orgânicos deve estar adequada; assim, a adição de agentes de volume auxilia na homogeneização da massa em decomposição e na aeração das leiras de compostagem.

2.3.2.7. Aeração e altura da leira

A compostagem é um processo fundamentalmente aeróbico, o que significa que requer a presença de oxigênio para a atividade microbiana e a decomposição eficiente da matéria orgânica (Kiehl, 1985).

Kiehl (2004), Barreira (2005) & Massukado (2008) afirmam que os revolvimentos são essenciais em certas situações, como quando a temperatura da compostagem está acima de 70°C. Isso ajuda a dissipar o calor acumulado, evitando danos aos microrganismos e mantendo um ambiente propício para o processo de decomposição. Os revolvimentos também são necessários quando a umidade na pilha de compostagem está acima de 55-60% ou quando há presença de moscas e maus odores. Porém, Kiehl (2004) ressalta que mesmo em condições de aparente normalidade, é recomendável fazer o revolvimento da pilha de compostagem em intervalos regulares. Isso é importante para introduzir ar rico em O₂ na pilha e liberar o ar saturado de dióxido de carbono (CO₂). Assim, a proposição de intervalos prefixados para o revolvimento também é válida. O mesmo autor ainda ressalta que durante o revolvimento da pilha de compostagem, as partes mais externas, expostas ao sol e ao vento, geralmente merecem maior atenção. Essas áreas tendem a estar mais secas e frias em comparação com o centro da pilha.

A aeração é o fator mais importante a considerar na decomposição de material orgânico. É considerado um mecanismo fundamental para evitar altas temperaturas durante o processo de compostagem, aumentar a taxa de oxidação, reduzir a liberação de odores e diminuir o excesso de umidade no composto (Silva *et al.*, 2017).

No entanto, ao compostar resíduos orgânicos, o objetivo é criar um ambiente aeróbio no qual os microrganismos possam prosperar, reduzindo assim os odores e as emissões de gases do efeito estufa (GEE), como o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O). Além disso, a presença de O₂ na massa leva a uma decomposição mais rápida da matéria orgânica, ao contrário da compostagem anaeróbica. A rotação mais intensa dos canteiros encurta o tempo de compostagem (Prá *et al.*, 2009).

2.4. Maturação

Para garantir a produção de composto de alta qualidade, é crucial compreender as transformações que o material sofre durante o processo de compostagem. A estabilidade e maturidade do composto são elementos essenciais para sua aplicação bem-sucedida, especialmente quando destinado a culturas hortícolas de alto valor (Wang *et al.*, 2004).

Os termos "estabilidade" e "maturidade" são frequentemente utilizados de forma intercambiável para caracterizar o grau de decomposição e transformação da matéria orgânica no composto (Zmora-Nahum *et al.*, 2005), embora representem propriedades distintas do substrato de compostagem. A estabilidade está intimamente ligada à taxa de atividade microbiana no composto e é avaliada por meio de diversas medidas respirométricas (Lasaridi & Stentiford, 1998), bem como pelo estudo das transformações nas características químicas do composto orgânico. A fase de maturação, ou simplesmente o termo "maturado", está relacionada à qualidade do composto orgânico. De acordo com Bernal *et al.* (2009), a maturação se refere ao processo de melhoria da qualidade do composto, resultante do "envelhecimento" ou "cura" do material produzido durante a fase de estabilização. Durante a maturação, há uma degradação das substâncias orgânicas fitotóxicas, o que contribui para a qualidade final do composto. (Said-Puliccino *et al.*, 2007; Bernal *et al.*, 2009; Azim *et al.*, 2018).

Durante a fase de maturação, a atividade microbiana diminui, o que resulta em uma redução na degradação do C e outros componentes orgânicos. Isso ocorre porque muitos dos microrganismos responsáveis pela decomposição dos materiais orgânicos são sensíveis às mudanças nas condições do ambiente, como a diminuição da disponibilidade de nutrientes e a estabilização da temperatura (Bohacz, 2018) e as diferentes propriedades físico-químicas dos resíduos orgânicos iniciais têm um grande impacto no processo de compostagem e nas características do composto final produzido (Villar, *et al.*, 2016; Asses *et al.*, 2018).

A maturação de compostos orgânicos é um processo complexo que não pode ser avaliado apenas por um único parâmetro. Uma avaliação abrangente envolve a consideração de vários aspectos físicos, químicos e biológicos do composto. Isso inclui a temperatura, cor, textura, odor, pH, presença de patógenos, estabilidade e outros fatores (Bernal; Albuquerque; Moral, 2009; Onwost *et al.*, 2017; Cerda *et al.*, 2017). Ao avaliar a maturação de compostos orgânicos, é fundamental considerar diversas variáveis para obter resultados confiáveis. Devido à grande variedade de resíduos orgânicos compostados e às diferentes condições ambientais em que a compostagem pode ocorrer, uma abordagem multifacetada é necessária para uma avaliação completa (Raut *et al.*, 2008; Lazcano; Gómez-Brandón; Domínguez, 2008).

A relação C/N é um dos parâmetros utilizados na indicação da maturidade do composto (Iglesias-Jimenez & Perez-Garcia, 1992; Bernal; Albuquerque; Moral, 2009; Awasthi *et al.*, 2014; Chen *et al.*, 2015; Onwost *et al.*, 2017) A redução na relação C/N pode

indicar a maturidade do composto orgânico. Os valores da relação C/N devem estar em torno de 18/1 ou um pouco menores, quando o composto atinge esses valores ele pode ser usado como fertilizante orgânico, já para o composto com elevado nível de maturidade, os valores da relação C/N estão em torno de 10/1. (Kiehl, 2004). A Instrução Normativa N° 61 do MAPA (2020) estabelece que uma relação C/N adequada para substratos orgânicos deve ser de no máximo 20.

O processo de maturação do composto orgânico culmina na humificação da matéria orgânica, que é a transformação em húmus. Durante a humificação, ocorrem diversas reações bioquímicas que resultam na formação de grupos funcionais carboxílicos e fenólicos. Esses grupos funcionais são importantes porque conferem propriedades químicas específicas ao húmus, como a CTC, evitando a oxidação da matéria orgânica (Butler *et al.*, 2001; Bernal; Albuquerque; Moral, 2009).

A CTC pode ser utilizada como um indicador do grau de maturação de compostos orgânicos (Harada; Inoko, 1980; Butler *et al.*, 2001; Bernal; Albuquerque; Moral, 2009; Onwosi *et al.*, 2017) uma CTC acima de 60 cmolc/kg, de acordo com Bernal, Albuquerque e Moral (2009) é considerada adequada para a maioria das culturas, enquanto uma CTC acima de 67 cmolc/kg é considerada ideal para solos mais férteis e produtivos, segundo o Iglesias-Jiménez & Pérez-García (1992).

Alguns elementos como os teores de C, N, P, K, Ca e Mg são importantes e devem ser considerados na compostagem, pois desempenham papéis fundamentais na fertilidade do composto resultante.

A observação dos valores de Ca em substratos em relação aos parâmetros estabelecidos por Gonçalves & Poggiani (1996) é crucial para avaliar a qualidade desses substratos em termos de disponibilidade desse nutriente para as plantas. Estudos indicam que os níveis de Ca adequados para substratos devem variar entre 2,00 e 4,00 g kg⁻¹S⁻¹. Para o nutriente K, o estudo de Gonçalves & Poggiani (1996) estabelecem que os níveis adequados do nutriente deviam variar entre 1,17 e 3,91 g kg⁻¹; elevados variando entre 6,95 e 14, 10 g kg⁻¹. O estudo desenvolvido por Gonçalves & Poggiani (1996) estabelecem também níveis adequados para o nutriente Mg que devem variar entre 6,07 e 12,16 g kg⁻¹. Para o nutriente P, os autores definiram como valores adequados os que variam entre 0,40 e 0,80 g kg⁻¹.

O carbono orgânico é normalmente utilizado na estimativa dos teores de matéria orgânica (Machado *et al.*, 2003). Levando em consideração a premissa de que a matéria orgânica possui 58% de carbono orgânico, Schmitz *et al.* (2002) estabeleceu que de 50 a 60%

da matéria orgânica é constituída por C, o autor afirma ainda que existem teores ideais de carbono orgânico para substratos usados em recipientes devem ficar acima de 25%, a Instrução normativa Nº 61 do MAPA (2020) impõe limites para alguns parâmetros analisados em compostos orgânicos. Estes limites são apresentados na tabela 2.

Tabela 1. Valores de Carbono Orgânico (C) e Capacidade de Troca Catiônica (CTC) expressos em base seca; 2. Valor de Nitrogênio (N) deve se referir ao produto tal qual comercializado. Fonte: MAPA (2020).

Garantia	Misto/composto
Umidade (máx.)	50%
N total (mín.)	0,5%
Carbono Orgânico – CO (mín.)	15%
CTC (mín.)	Conforme declarado
pH mínima	Conforme declarado
pH máxima	Conforme declarado
Relação C/N (máx.)	20
Relação CTC/C mínima	Conforme declarado
Outros nutrientes	Conforme declarado

Tabela 2. Valores de macronutrientes primários, macronutrientes secundários e micronutrientes, quando garantidos isoladamente ou em misturas de nutrientes para os fertilizantes orgânico misto e orgânico composto sólidos (continua).

COMPONENTE	TEOR MÍNIMO (%)
	<i>Produto Fluído</i>
Nitrogênio (N)	1
Fósforo (P ₂ O ₅)	1
Potássio (K ₂ O)	1
Cálcio (Ca)	1
Magnésio (Mg)	1
Enxofre (S)	1
Boro (B)	0,01
Cloro (Cl)	0,1
Cobalto (Co)	0,005

Tabela 2. Continuação.

Cobre (Cu)	0,02
Ferro (Fe)	0,02
Manganês (Mn)	0,02
Molibdênio (Mo)	0,005
Níquel (Ni)	0,005
Selênio (Se)	0,003
Sílicio (Si)	0,05
Zinco (Zn)	0,1

Para a soma de macronutrientes primários, soma de macronutrientes secundários e soma de micronutrientes *Fonte:* MAPA (2020).

2.4.1. Teste de germinação e fitotoxicidade

Alguns testes são utilizados para verificar a maturação de compostos, dentre os quais podem-se destacar o teste de germinação de sementes e o teste de fitotoxicidade.

Segundo, Zhu *et al.* (2004), o IG é um parâmetro usado para avaliar a fitotoxicidade de compostos, solos ou substratos. Ele mede a capacidade de germinação das sementes e o crescimento das raízes em condições controladas. Comparando o desempenho das sementes e das plântulas em diferentes concentrações do composto, é possível identificar possíveis substâncias fitotóxicas. Essa avaliação é essencial para garantir a qualidade e a segurança dos materiais antes do uso na agricultura. Este teste de IG é um método biológico que avalia a maturidade e a fitotoxicidade de compostos orgânicos. Ele envolve semear sementes em substratos tratados com extratos líquidos dos compostos e observar o crescimento das raízes das plântulas. Um alto IG e um crescimento saudável das raízes indicam maturidade do composto e baixa fitotoxicidade, enquanto resultados opostos podem sugerir imaturidade ou presença de substâncias prejudiciais (Zucconi *et al.*, 1981; Bernal; Albuquerque; Moral, 2009; Guidoni *et al.*, 2018). Compostos orgânicos que apresentam um IG acima de 50% geralmente indicam a ausência de componentes fitotóxicos, sugerindo sua maturação adequada (Bustamante *et al.*, 2008; Bernal; Albuquerque; Moral, 2009). O IG pode ser dividido em faixas para avaliar a fitotoxicidade e a maturação dos compostos orgânicos, sendo menor que 30%; muito fitotóxico; entre 80% e 100%: não fitotóxico e maturado; acima de 100%: Fitoestimulante para a germinação e crescimento das raízes das plantas.

A avaliação do IG pode ser usada para verificar a bioestabilização de compostos orgânicos. Um alto IG indica que o composto está menos fitotóxico e mais estável, tornando-

o seguro e eficaz para uso agrícola. Essa avaliação ajuda a garantir a qualidade e a segurança do composto antes de sua aplicação no solo ou nas plantas, sendo recomendado por Bustamante *et al.* (2008) e Bernal, Albuquerque & Moral (2009). Os autores recomendam valores superiores a 50% de IG, que indicam a ausência de compostos fitotóxicos, enquanto que Belo (2011) recomenda que valores inferiores a 80% de IG podem indicar presença de compostos fitotóxicos.

Antes de determinar quais os testes serão utilizados para verificar a maturação há que se testar e classificar como “muito maduro, maduro ou imaturo, de acordo com o Índice de Maturidade do Composto.

A Figura 3 é ilustrado a classificação de maturidade. O composto é testado e classificado como "muito maduro, maduro ou imaturo" de acordo com o Índice de Maturidade do Composto. O índice de maturidade do composto é implementado usando um processo de decisão de três níveis.

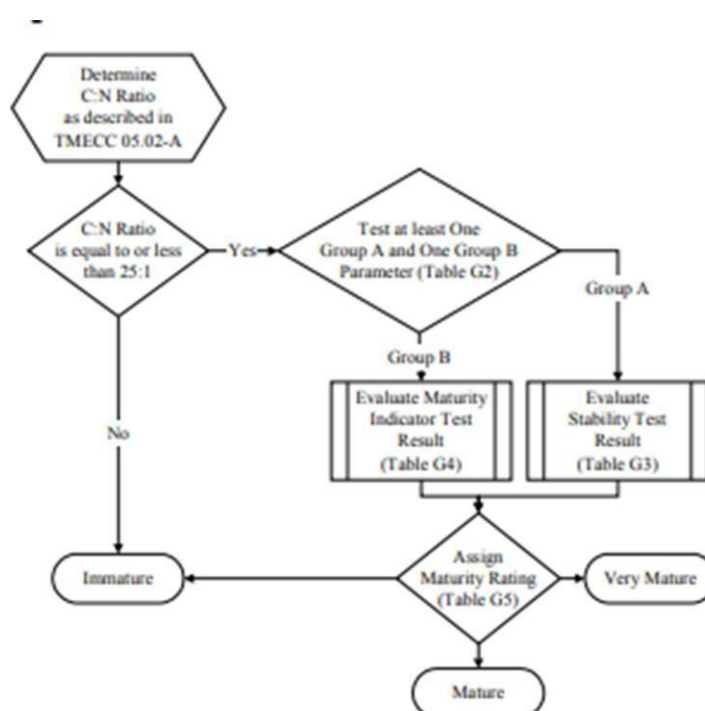


Figura 3. Processo de decisão de Índice de maturidade do composto. Uma adaptação das Tabelas TMECC 05.02-G Compound stability (Thompson, 2002).

A Tabela 3 apresenta a análise se dos dados relacionados ao teste de germinação *In-Vitro* e Enlongamento da Raíz.

Tabela 3. Classificação dos indicadores de Maturidade do composto orgânico e taxa de evolução de dióxido de carbono através do teste de estabilidade.

Maturidade	Muito Maduro	Maduro	Imaturo
%	>90	80-90	<80
Grupo A (estabilidade)	Muito estável	Estável	Instável
Taxa de evolução de dióxido de carbono			
(mg CO₂-C por d)	<2	2-4	>4

Uma adaptação das Tabelas TMECC 05.08-1 Compound stability index e TMECC 05.05-B In-Vitro Germination and Root Elongation (Thompson, 2002).

O IG, juntamente com a fitotoxicidade de compostos orgânicos, são testes utilizados para expressar o grau de maturação do composto (Bustamante *et al.*, 2008; Bernal; Albuquerque; Moral, 2009; Rashad; Saleh; Moselhy, 2010; Belo, 2011; Guidoni *et al.*, 2018).

Não existe um método universal definido para identificar o grau de maturação dos compostos orgânicos devido à grande variação na condução e tecnologia de compostagem. Portanto, é necessário utilizar um conjunto de vários parâmetros para uma avaliação abrangente e precisa. A combinação de diferentes critérios, como parâmetros físicos, químicos, biológicos e testes de fitotoxicidade, permite uma análise mais completa da qualidade e maturidade do composto orgânico. Isso garante uma avaliação mais precisa, levando em consideração as diversas variáveis envolvidas no processo de compostagem e na composição dos resíduos orgânicos utilizados (Rashad; Saleh; Moselhy, 2010; Raj; Antil, 2011).

2.5. Fertilizantes orgânicos e a qualidade do composto

O composto orgânico, caracterizado por sua cor escura e riqueza em húmus, contém de 50 a 70% de matéria orgânica. Ele é classificado como adubo orgânico, uma vez que é preparado a partir de esterco de animais e/ou restos de vegetais em estado natural. Apesar de seu alto teor de matéria orgânica, o composto não tem valor agrícola direto, mas é altamente benéfico para melhorar as propriedades do solo e sua fertilidade quando aplicado como adubo. (Oliveira *et al.*, 2004).

Segundo Feam (2002), para ser denominado composto orgânico e ser utilizado como fertilizante orgânico, a matéria orgânica contida nele deve ser estabilizada até atingir a humificação. No entanto, quando utilizado antes de atingir a maturação completa, o composto pode causar diversos efeitos indesejáveis:

- 1- Liberação de amônia no solo, que pode danificar as raízes das culturas.

- 2- Problemas de odor durante sua utilização, o que pode ser indesejável em ambientes próximos a áreas urbanas ou residenciais.
- 3- Alta relação C/N, levando à imobilização microbiana de N presente no solo para oxidação da matéria orgânica remanescente do composto, o que pode prejudicar temporariamente o crescimento das plantas.
- 4- Produção de toxinas inibidoras do metabolismo das plantas e germinação de sementes, o que pode comprometer o desenvolvimento das culturas.
- 5- Possibilidade de contaminação por patógenos, representando um risco para a saúde das plantas e dos seres humanos que entram em contato com o composto.

Segundo a autor é crucial garantir que o composto orgânico esteja completamente estabilizado e maduro antes de ser utilizado como fertilizante para evitar esses efeitos negativos.

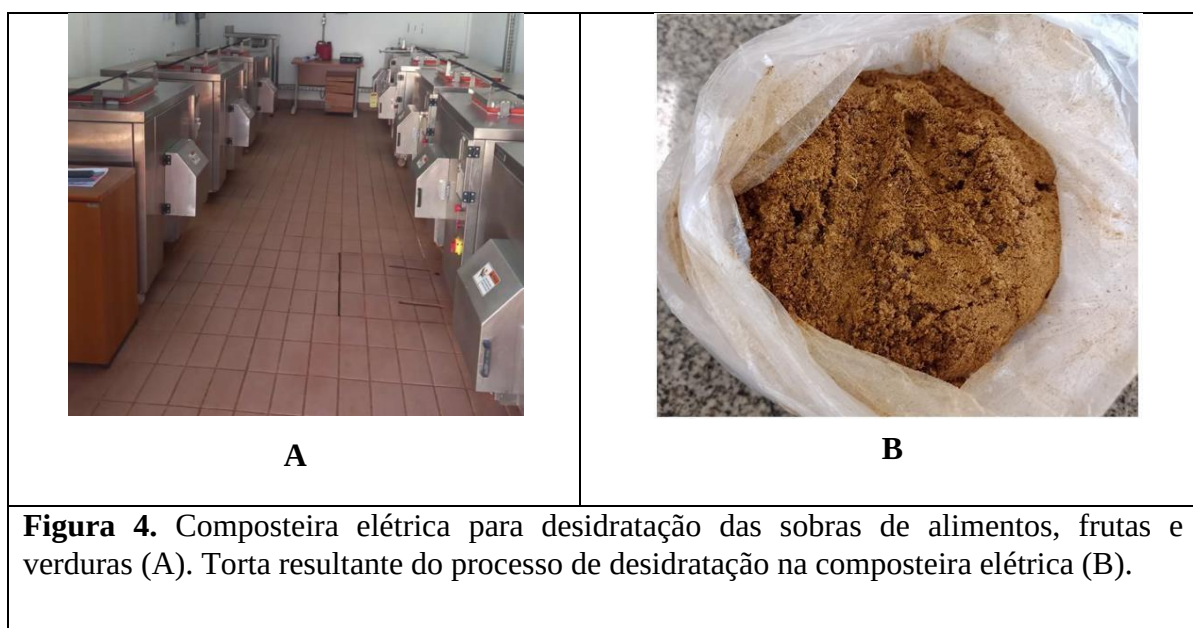
3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área de estudo

Os experimentos foram conduzidos em casa de vegetação e em câmara de crescimento no Laboratório de Agricultura Orgânica, instalados na sede da Embrapa Agrobiologia, localizada no município de Seropédica, RJ. A altitude local é de 33,0 m e o clima é classificado como Aw, com chuvas concentradas no período de novembro a março, com precipitação anual média de 1.213 mm e temperatura média anual de 24,5°C.

3.1.1 Coleta do material de estudo RAP

O resíduo sólido escolhido para os testes de maturidade foram restos de resíduos de restaurante que triturados e desidratados em composteiras elétricas para a redução de volume. As temperaturas da composteira elétrica, são: Temperatura do óleo: 129,4 °C, temperatura do ar: 4401 °C e temperatura do tanque: 67,8 °C, esse processo dura de 8 a 12 horas. (Figura 4 a). O resultado final deste processo é um substrato chamado de Resíduo Alimentar Processado (RAP) que apresenta aspecto gorduroso, cheiro típico adocicado forte, porém não repugnante e cor castanho-amarelada (Figura 4 b). Este material também pode-se classificar como uma “torta orgânica” (MAPA, IN nº 61, 2020). Tais equipamentos são opção de tratamento de resíduos orgânicos (basicamente sobras alimentares ou sobras de frutas e verduras) de diversas empresas que possuem restaurantes e refeitórios e, também, supermercados.



3.1.2. Análises laboratoriais

3.1.2.1. pH e CE

As amostras coletadas foram analisadas no Laboratório de Agricultura Orgânica para determinação de pH e C.E, de acordo com a metodologia do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA (BRASIL, 2007). Para determinação desses parâmetros, pesou-se 10g de amostra *in natura*, adicionando 50 mL de água destilada (Tedesco *et al.*, 1995). Posteriormente o material foi agitado por 30 minutos a 250 rpm. As leituras foram realizadas com auxílio de pHmetro e condutivímetro de bancada.

3.2. Determinação da fonte de matéria orgânica e da sua composição química

O teste de maturidade foi realizado a partir da utilização de materiais sólidos, dentre eles o RAP, descrito anteriormente. Para a determinação dos teores de C, N, P, K, Ca e Mg, quatro amostras de cada material foram secas em estufa de ventilação forçada a temperatura de 65° por 72 horas e, posteriormente, moídas em moinhos de faca e rolo antes de serem enviadas para o Laboratório de Química Agrícola e para o Laboratório de Ciclagem de Nutrientes da Embrapa Agrobiologia para análise química.

3.2.1. Descrição do procedimento experimental

3.2.1.1. Ensaio 1 – Teste de germinação na placa de Petri

Os testes de germinação aqui descrito está fundamentado no TMECC (2001) 05.05-B: *In-vitro Germination and Root Elongation* (Thompson, 2002).

Para a determinação do Índice de Germinação (IG %) adicionaram-se 10 mL dos extratos de diluição em cada placa de Petri contendo papel de filtro de celulose e dez sementes (Vione, 2016). de pepino (*Cucumis Sativus*) cultivar pepino aodai melhorado. O

pepino é uma boa espécie indicadora para este teste devido à sua alta tolerância ao sal, tamanho grande de semente, forma distinta de cotilédones e intolerância a ácidos graxos voláteis. As placas de Petri contendo os tratamentos com as sementes foram incubadas na DBO a 25 °C por 72 h (adaptado de Zucconi *et al.*, 1981) em uma câmara de germinação. Placas Petri para controle foram preparadas com água destilada. Foram realizadas cinco repetições para cada tratamento. Após este período, foi contabilizado o número de sementes germinadas por placa e foram medidos, com régua graduada em cm, os comprimentos referentes à radícula de cada semente germinada. Considerou-se uma semente germinada quando a sua raiz era visível e mensurável (> 1 mm) e os comprimentos radiculares das sementes não germinadas foram considerados como zero (Avidov *et al.* 2017). O IG foi calculado como o produto do número de sementes germinadas e o crescimento das raízes após 72 h por placa. Além disso, como medição complementar foram pesadas as sementes germinadas em balança analítica de cinco casas decimais.

O índice de germinação é definido pela fórmula (adaptado de Zucconi *et al.*, 1981)

$$IG (\%) = (NG_{ext} \cdot LR_{ext} / NG_{cont} \cdot LR_{cont}) \cdot 100$$

Onde:

NG_{ext} - número de sementes germinadas no extrato;

NG_{cont} - número de sementes germinadas no controle;

LR_{ext} - comprimento médio das radículas do extrato (cm);

LR_{cont} - comprimento médio das radículas do controle (cm).

Os tratamentos realizados foram:

T1: RAP;

T2: Carolina orgânico®;

T3: Organosolo®;

T4: Vermiculita;

T5: Composto produzido através da compostagem de RAP com bagaço de cana-de-açúcar (composto orgânico);

Controle: Água destilada.

3.2.1.2. Análise Estatística

Foi realizada análise de variância (ANOVA) com Delineamento Inteiramente Casualizados (DIC), com cinco tratamentos e cinco repetições. Os resultados foram comparados pelo teste F e nas análises em que este foi positivo, procedeu-se ao teste Tukey a

5% de probabilidade estatística para comparação das médias. As análises estatísticas foram realizadas com o software R, versão 4.3.0.

3.2.1.3. Ensaio 2: Teste de germinação em bandejas

O teste de germinação aqui descritos são fundamentados o *Test Method for the Examination of Composting and Compost* (TMECC, 2001) 05.05-A: Biological Tests, Seedling Emergence and Relative Growth (Thompson, 2002).

Para o experimento foram utilizados os seguintes materiais sólidos: RAP, substrato comercial da marca Carolina Orgânico®, composto orgânico da marca Organosolo®, vermiculita, e sementes de pepino (*Cucumis Sativus*) cultivar pepino aodai melhorado. Para a condução do teste de germinação em sementeira, utilizaram-se três bandejas de poliestireno com dimensões de 27 cm x 27 cm x 3,5 cm. Cada bandeja, contendo 36 células com volume de 35 ml cada, foram colocados três tipos de combinações de substratos.

Para o teste nas bandejas foram feitas 3 repetições para os materiais sólidos: Carolina®, Organosolo®, RAP. Nas sementeiras (alvéolos) foram dispostos os seguintes substratos: Fileiras 1 e 4: Substrato comercial (carolina®), Fileira 2 e 5: substrato teste com vermiculita (1:1), Fileiras 3 e 6: vermiculita. A figura 5 descreve a disposição dos materiais sólidos nas bandejas.

6	6	6	6	6	6
5	5	5	5	5	5
4	4	4	4	4	4
3	3	3	3	3	3
2	2	2	2	2	2
1	1	1	1	1	1
FILEIRA 1	FILEIRA 2	FILEIRA 3	FILEIRA 4	FILEIRA 5	FILEIRA 6

Figura 5. Croqui da disposição dos tratamentos nas bandejas para o teste de germinação de sementes de pepino. A disposição dos materiais segue a seguinte ordem: Fileira 1 e 4: vermiculita; Fileira 2 e 5: tratamento; Fileira 3 e 6: substrato comercial Carolina®.

Os tratamentos foram constituídos de dois controles (positivo e negativo), mais um tratamento com substratos:

- ✓ T 1: Vermiculita (controle negativo), vermiculita com RAP (tratamento), substrato comercial carolina® (controle positivo);
- ✓ T 2: Vermiculita (controle negativo), vermiculita com Organosolo® (tratamento), substrato comercial Carolina® (controle positivo).
- ✓ T 3: Vermiculita (controle negativo), vermiculita com composto orgânico, substrato comercial Carolina® (controle positivo).

Os materiais foram umedecidos com água destilada e, posteriormente, misturados e colocados nas bandejas, com células de 35 mL cada, com volume total de 1,26 L. Foram semeadas duas sementes de pepino por célula na profundidade de 5 mm, fazendo a cobertura com uma camada utilizando o próprio substrato. Após o semeio, as bandejas foram

aconditionadas em casa de vegetação, onde permaneceram durante todo o teste (14 dias). Cada alvéolo foi irrigado de dois em dois dias com 10 mL de água destilada.

A porcentagem de emergência das plântulas, foram avaliadas ao sétimo e décimo quarto dias, considerando normais aquelas plântulas que apresentaram características condizentes com as prescritas pelo R.A.S. (Brasil, 2009). O critério utilizado foi o de plântulas emersas, sendo os resultados expressos em percentagem. Nesta avaliação foram feitas análises com todas as plântulas da sementeira.

Comprimento de Plântulas: ao final do teste de germinação, a parte aérea e a raiz primária foram medidas com o auxílio de uma régua graduada em centímetros;

Testes complementares: Além dos testes sugeridos na literatura, foram incluídos peso da plântula (cm), realizados em balança analítica de cinco casas decimais e medida da área foliar (cm), que foi indicada através do aparelho LI-3100C Área Meter (Adaptado por Inácio, 2013).



Figura 6. Aparelho LI- C área Meter utilizado para medir a Área Foliar (cm) das plantas germinadas.

3.2.1.3.1. Análise Estatística

Foi realizada análise de variância (ANOVA) com Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC), com três tratamentos e três repetições. Os resultados foram comparados pelo teste F e nas análises em que este foi positivo, procedeu-se ao teste Tukey a 5% de probabilidade estatística para comparação das médias. As análises estatísticas foram realizadas com o software R, versão 4.3.0.

3.2.1.4. Ensaio 3: Teste de estabilidade do composto

O processo de respirometria foi conduzido nas dependências do Laboratório de Agricultura Orgânica da Embrapa Agrobiologia. O delineamento experimental foi o Inteiramente Casualizado (DIC) com cinco tratamentos e três repetições.

Os tratamentos realizados foram:

T1: RAP;

T2: Carolina®;

T3: Organosolo®;

T4: Vermiculita;

T5: Composto orgânico.

Para o experimento foram necessários: potes para servirem de recipiente de incubação – 1 pote para cada amostra + 3 potes para os “brancos”. Obs.: os potes utilizados para este experimento foram potes plástico de 1,0 L com tampa de pressão, vedados com filme plástico (Rolopack®), para as soluções de captura de CO₂ e NH₃ (NaOH e H₃BO₃ respectivamente), foram utilizados recipientes de plástico transparente com capacidade de 70 mL com tampa rosqueável, como os coletores universais.

3.2.1.4.1. Coleta das amostras

Foram coletadas 10 g de massa seca de cada material analisado, as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos.

Para a pré-incubação, as amostras foram umedecidas entre 70 a 85% e armazenadas por 72 horas mantidas em temperatura ambiente. Adição das soluções de captura (10 mL da solução de ácido bórico e 30 mL de NaOH) em dois recipientes que foram colocados dentro dos potes de incubação que foram levados para a câmara de incubação por 72 horas em temperatura de 30°C. Após este período os potes foram retirados da câmara cuidadosamente e as amostras foram tituladas para a medição da emissão de CO₂ e NH₃.

Os ensaios foram conduzidos em dois blocos, entre os dias 11 a 15 de dezembro de 2023.

O teste de estabilidade do composto para a determinação das emissões de CO₂ e NH₃ em amostras dos materiais sólidos: vermiculita, organosolo®, RAP e carolina® umedecidos, conforme Leal (2014). Foram utilizadas soluções de captura para cada gás: Hidróxido de sódio (NaOH) 1,0 mL.L - 1 para capturar CO₂ e ácido bórico (H₃BO₃) 1,0% para capturar NH₃. As soluções de captura foram acondicionadas em pequenos potes, sem tampa, que ficaram dentro do pote maior de incubação da amostra. A incubação foi realizada em câmara mantida sob a temperatura de 25°C e ausência de luz.

3.2.1.4.2. Cálculos

A quantidade de CO₂ emitida é calculada pela seguinte fórmula:

$$CO_2 = ((Vb - Va) \times M \times 22) / MS / T.$$

Sendo:

CO_2 ($mg\ g^{-1}\ MS\ dia^{-1}$) = Emissão pela amostra, em miligrama de CO_2 por grama de massa seca de amostra por dia;

V_b (mL) = volume de ácido clorídrico gasto na titulação da solução controle (branco);

V_a (mL) = volume gasto na titulação da solução de NaOH utilizada na incubação da amostra;

M = concentração molar ($mol.L^{-1}$) = volume gasto na titulação da solução de NaOH utilizada na incubação da amostra;

M = concentração molar ($mol.L^{-1}$) exata do HCl;

22 = peso molecular do CO_2 (44) dividido por 2, pois são necessários 2 mols de HCl para reagir com 1 mol de Na_2CO_3 ($Na_2CO_3 + 2\ HCl = 2\ NaCl + H_2O + CO_2$) ou de $BaCO_3$ ($BaCO_3 + 2\ HCl = BaCl_2 + H_2O + CO_2$);

MS = massa seca da amostra, em gramas;

T = tempo de incubação da amostra em dias.

A quantidade de amônia emitida é calculada utilizando-se a seguinte fórmula:

$$NH_3 = ((V \times M \times 34) / MS) / T$$

Sendo:

NH ($mg\ g^{-1}\ MS\ dia^{-1}$) = Emissão pela amostra, em miligrama de NH por grama de massa seca de amostra por dia;

V = volume do H_2SO_4 utilizado na titulação (mL);

M = concentração molar ($mol. L^{-1}$) exata do H_2SO_4 ;

34 = peso molecular da amônia multiplicada por 2, pois são necessários 2 mols de NH_3 para reagir com 1 mol de H_2SO_4 ($H_2SO_4 + 2\ NH_3 = (NH_4)_2\ SO_4$);

MS (g) = massa seca da amostra, em gramas;

T = tempo de incubação da amostra, em dias.

3.2.1.5. Ensaio 4: Compostagem em biorreator de bancada

Os biorreatores são produzidos em polipropileno (Figura 7) e cada reator é constituído de duas partes: uma casca cilíndrica externa e uma câmara de reação que se encaixa na cavidade interna da casca cilíndrica.

Figura 7. Laboratório de bioprocessos Embrapa Solos. Fonte: Ramos (2019).

- ✓ A casca cilíndrica possui 40cm de altura e 20cm de diâmetro, no interior de sua parede há uma resistência elétrica e um sensor de temperatura, na sua face superior existem dois pares de furos por onde passam dois sensores de temperatura e as mangueiras de entrada e

saída de ar. A casca cilíndrica tem a função de isolamento térmico e de, através do acionamento da resistência elétrica em seu interior, compensar as perdas de calor da câmara de reação para o meio externo.

✓ A câmara de reação possui 30cm de altura e 16cm de diâmetro, a 7cm do fundo da câmara há um disco perfurado de polipropileno com uma prensa cabo em seu centro. Na tampa da câmara há um par de conexões de engate rápidos para as mangueiras de entrada e saída de ar e um par de prensa cabos para a passagem dos sensores de temperatura. Uma mangueira liga a prensa cabo do disco de polipropileno à conexão de entrada de ar na tampa da câmara garantindo um fluxo ascendente de ar dentro do reator.



Figura 7. Biorreatores utilizados no laboratório de bioprocessos na Embrapa-solos. Foto ilustrativa. Fonte: Ramos (2019).

3.2.1.5.1. Sistema de fluxo de ar

Nos reatores o suprimento de O_2 requerido pela microbiota responsável pela compostagem é fornecido por um compressor externo ao laboratório. O fluxo contínuo é regulado por um fluxômetro de baixa vazão, de até 10L/h (rotâmetro modelo 1900 APPLIETCH) (Figura 8). Ao entrar na câmara de reação, o ar é conduzido por uma mangueira de poliuretano de 8mm de diâmetro até o espaço existente entre o fundo da câmara de reação e o disco perfurado de polipropileno (*bottom space*). A massa de ar ascendente passa pela mistura em decomposição sendo, então, modificado em sua

composição e se acumulando na região entre a superfície superior da mistura em decomposição e a tampa da câmara (*head space*) de onde é retirada do reator por outra mangueira de 8mm de diâmetro.



Figura 8. Rotômetro para ajuste de vazão utilizado no laboratório de bioprocessos na Embrapa solos. Foto ilustrativa. Fonte: Ramos (2019).

3.2.1.5.2. Sistema de controle diferencial de temperatura (CDT)

O sistema de diferencial de temperatura é baseado nos termômetros presentes no biorreator. Os sensores térmicos na câmara de reação são posicionados de forma que um sensor, chamado S1, fique na altura média da câmara, no meio do resíduo em compostagem. O segundo sensor, chamado S2, é posicionado junto à parede da câmara de reação, na mesma altura do sensor S1.

O controle diferencial de temperatura funciona de acordo com os seguintes parâmetros:

- ✓ Quando a diferença de temperatura entre os sensores S1 e S2 é maior que 1,2° C a resistência elétrica presente na casca cilíndrica é acionada impedindo que o material em compostagem venha a perder calor para o ambiente.
- ✓ Quando a diferença de temperatura entre os sensores S1 e S2 é menor que 0,9° C a resistência elétrica da casca cilíndrica é desligada.
- ✓ A resistência da casca cilíndrica nunca é acionada quando a temperatura registrada pelo sensor S1 é superior a 55°C.

A calibração correta do sistema ilustrado na Figura 9 impede que a massa seja aquecida de forma artificial ou perca calor para o meio externo enquanto a atividade microbiológica ainda estiver em andamento. Todos os parâmetros do CDT podem ser alterados pelo Sitrad.

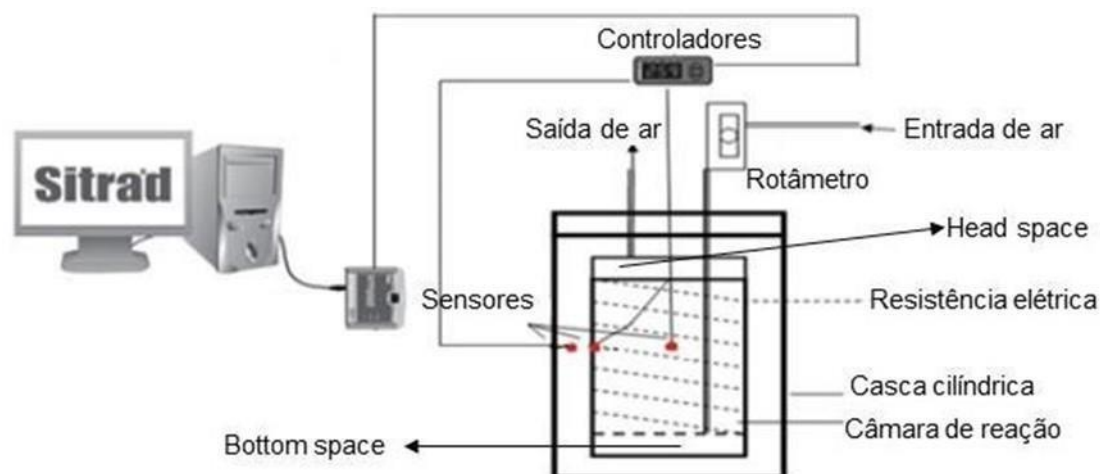


Figura 9. Controle de diferencial de temperatura Fonte: Ramos (2019).

3.3. Experimento de compostagem

O experimento consistiu-se na montagem de um biorreator contendo uma mistura de dois constituintes: bagaço de cana-de-açúcar e RAP. Os resíduos antes de serem utilizados na mistura tiveram suas umidades removidas após passar dois dias em estufa de recirculação a 60°C, e depois a mistura foi umedecida a 60 % para o experimento.

O experimento teve duração de dezenove dias e durante esse período as informações de temperatura dos sensores eram coletadas a cada 10,5 segundos e armazenadas pelo Sitrad. No entanto uma falta de luz nas instalações da Embrapa Agrobiologia impediu que alguns dados fossem coletados ocasionando uma lacuna nos registros de temperatura. A vazão de ar fornecida a cada reator foi ajustada diariamente para 120mL/min.

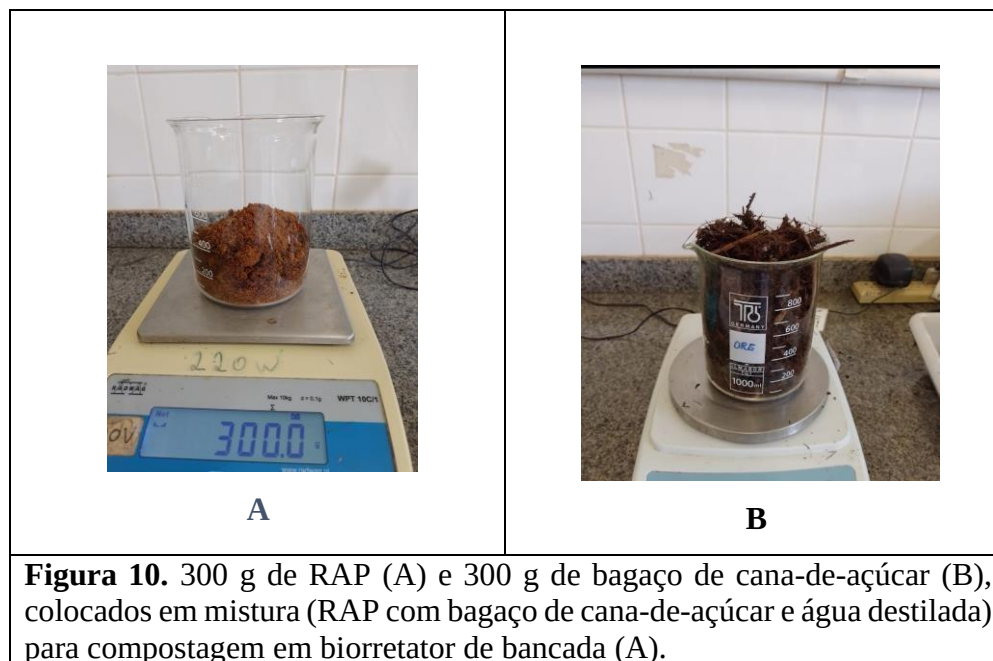


Figura 10. 300 g de RAP (A) e 300 g de bagaço de cana-de-açúcar (B), colocados em mistura (RAP com bagaço de cana-de-açúcar e água destilada) para compostagem em biorretador de bancada (A).

3.3.1. Balanço de massa

Ao longo dos dezenove dias de experimento, tanto no início quanto no final uma amostra foi coletada para a determinação de sua umidade.

A umidade do material, e consequentemente o percentual de massa seca, de cada reator foram obtidos após o material coletado para amostragem permanecer em uma estufa de recirculação com temperatura fixa de 60°C por 48h.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Análises laboratoriais

As análises dos parâmetros pH, CE, foram realizadas conforme descrito nos itens 2.3.2.2 e 2.4, levando em consideração os valores adequados de pH descritos por Ferraz *et al.* (2005), tem-se que a vermiculita, que se enquadra como substrato mineral comercial, apresentou pH 7,37. O substrato comercial Carolina®, apresentou pH 5,54, valor este que favorece uma adequada disponibilidade de nutrientes no solo (Pereira Neto, 2007). O organosolo® apresentou pH 5,22, um valor fora da faixa ideal (Pereira Neto, 2007), enquanto que RAP apresentou um pH 5,14, considerado também baixo se classificado como composto orgânico (Kiehl, 2004).

A Tabela 4 descreve os valores médios da caracterização físico-química dos materiais sólidos utilizados nesta pesquisa. A CE é a propriedade que diz respeito à capacidade de um meio, como solo, água ou solução, de conduzir corrente elétrica e estes valores são diretamente proporcionais a concentrações de sais da solução. Levando em consideração os parâmetros estabelecidos por Minami & Salvador (2010), os valores CE encontradas nos

materiais de estudo sugerem que a vermiculita e o substrato Carolina Orgânica ® apresentaram valores elevados. O Organossolo® apresentou um valor baixo e RAP apresentou um valor também alto ($>8 \text{ dS m}^{-1}$). Sendo assim, o Organossolo® que apresentou um valor baixo e a carolina orgânica® que apresentou um valor alto, demonstraram um grau de toxicidade e, conseqüentemente baixa qualidade como composto orgânico (Minami & Salvador, 2010). A vermiculita e o RAP, apresentaram valores de CE considerados adequados para o cultivo de sementes de pepino.

Tabela 4. Valores de pH e CE dos materiais sólidos: RAP, Carolina®, Organossolo® e vermiculita.

Amostras	Potencio Hidrogeniônico (pH)	Condutividade Elétrica (CE)
		(ds m^{-1})
RAP	5,14	6,06
Carolina®	5,54	378*
Organossolo®	5,22	2,23
Vermiculita	7,37	10,93

*Valores de CE são frequentemente exageradas em amostras onde as concentrações de carbonatos e/ou amônio mais amônia-nitrogênio são altas (TMECC 05.05, 2001).

As taxas de composição elementar do material RAP então descritos na Tabela 5.

Tabela 5. Valores da composição elementar do material RAP.

Amostra	Composição Elementar 1 (%)										
	C	N	O	Na	Ca	Mg	P	K	Cd	Zn	C/N
RAP	43,5	3,35	12,9	-	0,84	0,64	2,55	5,32	-	-	12,9

¹ Valores sinalizados com traço não foram detectados

Ao analisar os dados dos materiais apresentados na Tabela 4, o material apresentou valor adequado de nitrogênio para se classificar como fertilizante orgânico ($> 0,5 \%$ de N total), conforme Instrução normativa Nº 61 do MAPA (2020). Quanto ao nível de Ca, os valores variam entre 0,2 e 0,84, números muito menores do que os estabelecidos Gonçalves & Poggiani (1996), visto que os substratos devem estar na faixa entre 0,2 e 0,84 g kg^{-1} . O estudo desenvolvido por Gonçalves & Poggiani (1996) estabelece também níveis adequados

para o nutriente Mg que devem estar entre 6,07 e 12,16 g kg⁻¹. Os dados obtidos na Tabela 4 para esse nutriente apresentam teores de Ca abaixo do que é considerado adequado (entre 2e 8,4 gkg⁻¹). Para o nutriente K, o estudo de Gonçalves & Poggiani (1996) determina que os valores devem estar entre 1,17 e 3,91 g kg⁻¹. O RAP foi o substrato que apresentou o valor mais elevado, sendo de 0,532 g kg⁻¹. Os valores da relação C/N do RAP, são considerados ótimos para substratos orgânicos que, segundo a Instrução Normativa N° 61 do MAPA (2020) deve ser de no máximo 20.

4.2. Teste de germinação em placas de Petri.

As taxas dos percentuais de germinação de sementes de pepino, após 3 dias, são demonstradas na Tabela 6. É possível observar que os tratamentos que tiveram um maior IG, quando comparadas com o padrão, foram Organosolo®, composto do biorreator e Carolina®, 143,728%, 106,31 e 99,36 respectivamente, sendo consideradas não fitotóxicos e maduros (Bustamante *et al.* 2008; Thompson, 2002). Os substratos vermiculita e RAP apresentaram o valor de 33,03 e 29,5 %, respectivamente, sendo considerados imaturos (Belo, 2011; Thompson, 2002).

Tabela 6. Valores do Índice de Germinação das sementes de pepino germinadas no extrato do composto em placas de Petri. (continua).

Amostras	IG (%)	DP
Vermiculita®	33,03	1,4
Carolina	99,36	1,3
Organosolo®	143,72	1,52
RAP	29,5	4,28
Composto orgânico	106,31	0,84
CV (%)	24,44	-

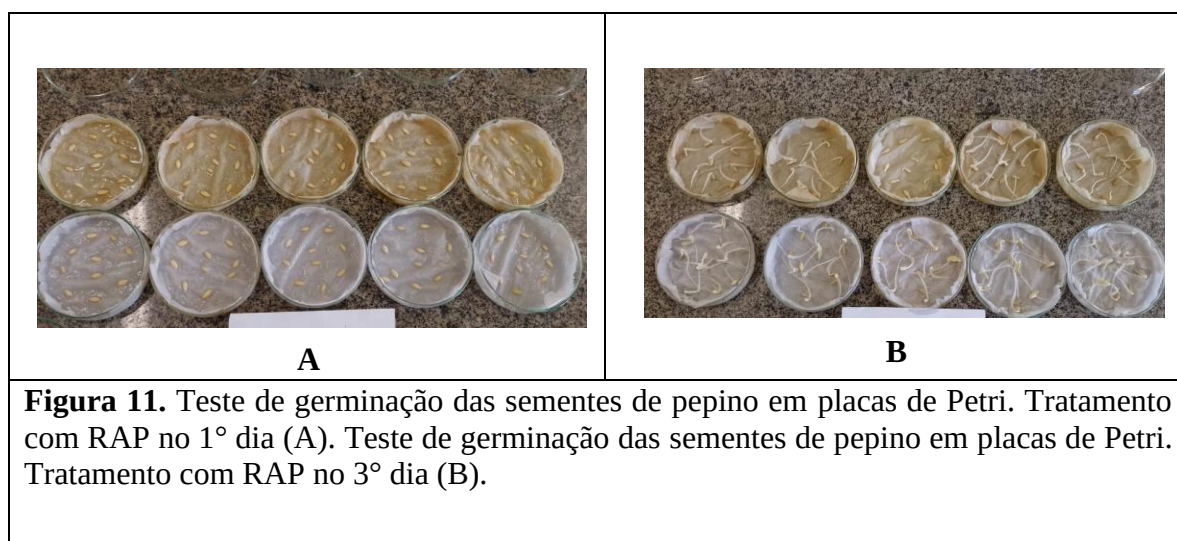
*DP (Desvio Padrão)

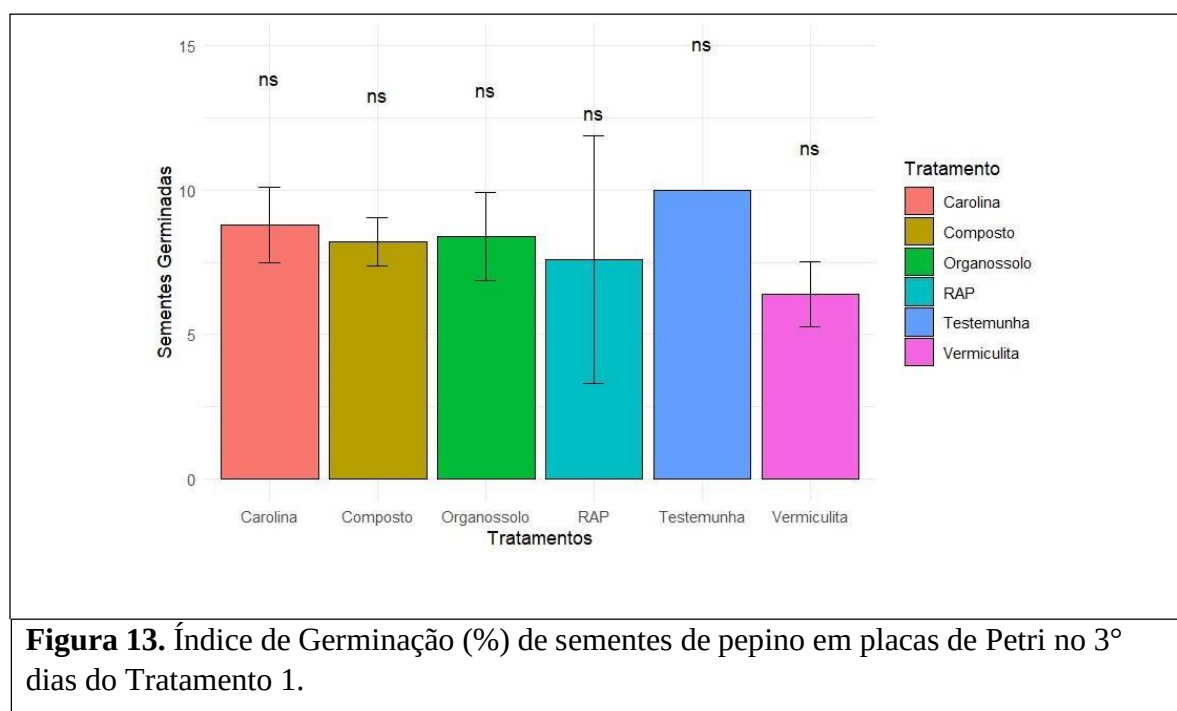
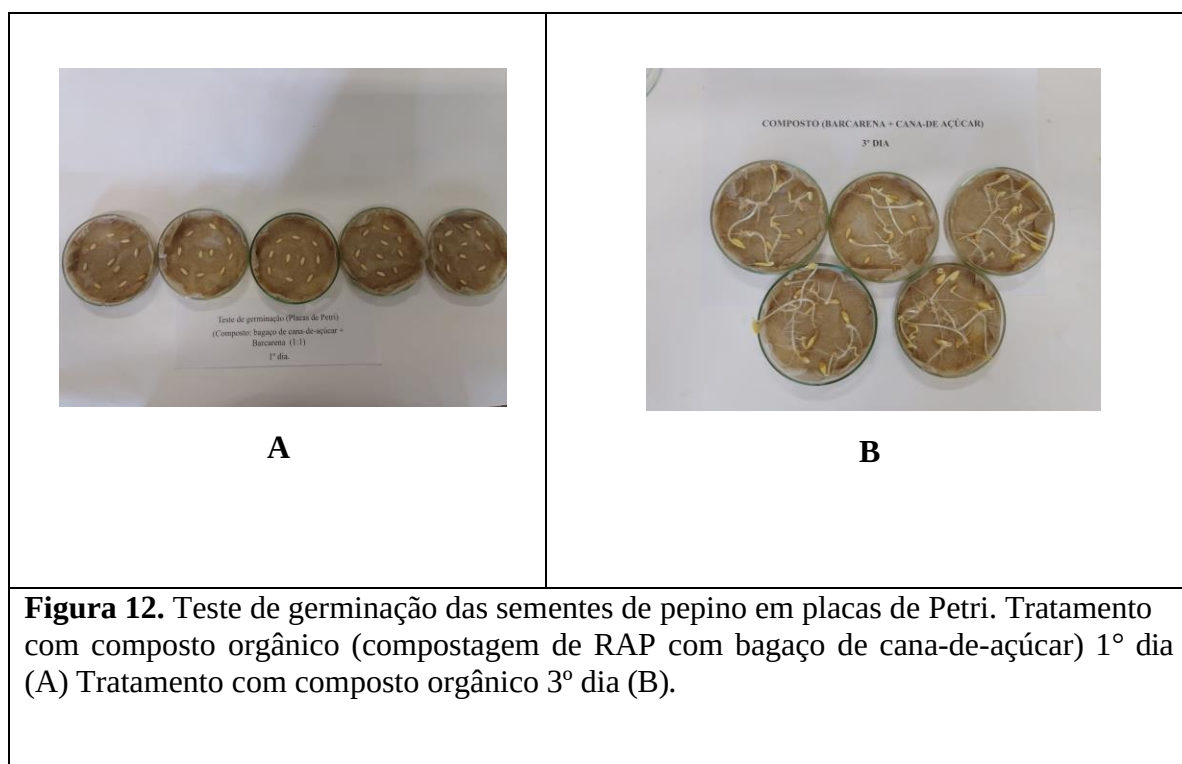
Na Tabela 7 estão apresentados os valores médios dos *Índice de Desenvolvimento (ID)* de peso e comprimento das plântulas de pepino dos cinco tratamentos. Comparando o peso das plantas nos cinco tratamentos, foi observada uma diferença significativa, onde Carolina® e Organosolo® apresentaram uma média maior, seguida do composto do biorreator e por último vermiculita e RAP. Comparando o comprimento das raízes das plantas de pepino nos cinco tratamentos, foi observada uma diferença significativa entre eles, sendo Carolina® e Organosolo® com médias maiores, em seguida o composto do biorreator seguido da vermiculita e do RAP.

Tabela 7. Valores médios do Índice de Desenvolvimento da planta (%): peso, comprimento, do Tratamento 1, obtidas após 3 dias de germinação das sementes de pepino em placas de Petri.

Composto	ID peso (g)	*DP	ID Comprimento (cm)	*DP
	(%)		(%)	
Vermiculita	0,62 bc	0,1	29,42 bc	4,03
Carolina®	2,03 a	0,42	61,97 abc	57,26
Organosolo®	1,78 a	0,26	93,86 a	15,75
RAP	0,7 c	0,21	21,28 c	12,02

*Médias seguidas pela mesma letra, nas colunas, não diferem estatisticamente pelo Teste Tukey a 5% de probabilidade. * DP (Desvio Padrão).





4.3. Teste de germinação em sementeiras

4.3.1. Tratamento 1: Carolina® (controle positivo), RAP com vermiculita + Vermiculita (controle negativo).

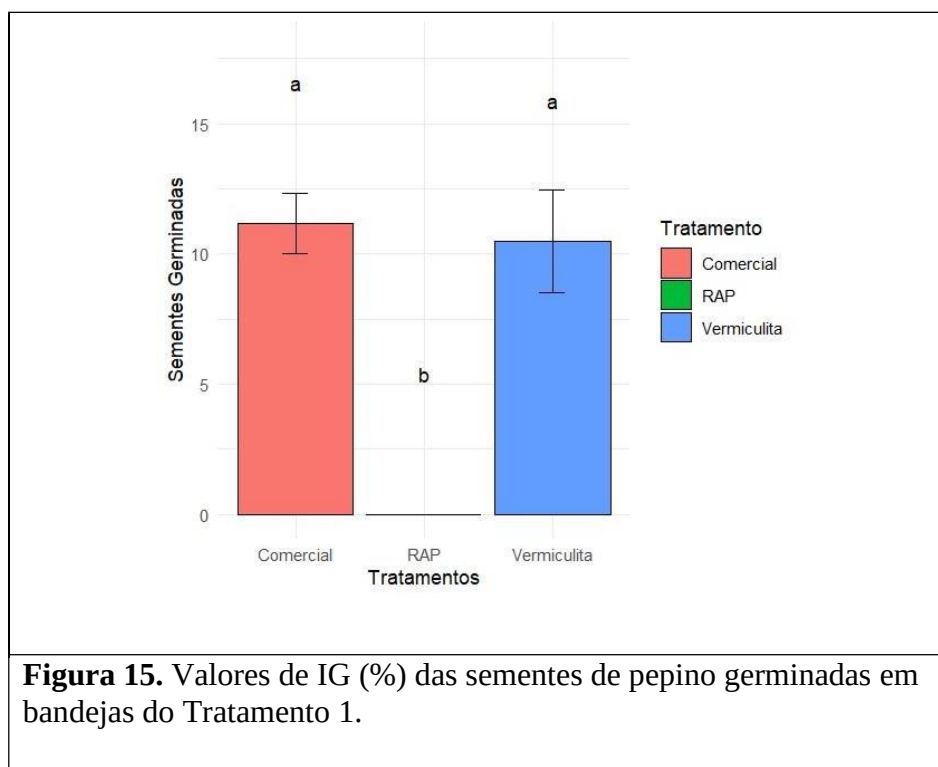


Figura 14. Teste de germinação de sementes de pepino em bandejas – Tratamento 1: vermiculita (fileiras 1 e 4), RAP com vermiculita (5:1) (fileiras 2 e 5), carolina® (fileiras 3 e 6). Após 7 dias.

Tabela 8. Valores médios do Índice de Germinação (%), obtidas após 7 dias de germinação das sementes de pepino em bandejas.

Amostras	IG (%)	DP
Carolina®	11,16 a	1,17
RAP com vermiculita	0 b	0
Vermiculita	10,5 a	1,97
CV (%)	18,35	

*Médias seguidas pela mesma letra, nas colunas, não diferem estatisticamente pelo Teste Tukey a 5% de probabilidade. * DP (Desvio Padrão).



Conforme ilustração na Tabela 8 e Figura 14, observou-se que não houve germinação no T1: vermiculita com RAP, quando comparado aos tratamentos vermiculita e organosolo®. No material observou-se uma elevada formação de fungos, o que demonstra a instabilidade do composto. Em contraste, os tratamentos com organosolo® e vermiculita apresentaram emergência das sementes.

Nos valores de ID peso e comprimento descritos na tabela 8, demonstram que os valores da Carolina® e da vermiculita podem ser considerados iguais, demonstrando um desenvolvimento semelhante entre eles.

Tabela 9. Valores médios do Índice de Desenvolvimento (%): peso, comprimento e Área Foliar, obtidas após 7 dias de germinação das sementes de pepino em bandejas do Tratamento 1.

Amostras	ID peso (%)	*DP	ID comp. (%)	*DP	ID AF (cm)	*DP
Carolina®	1,51 a	0,26	21,86 a	1,67	34,75 a	6,62
RAP com vermiculita	0 b	0	0 b	0	0 b	0
Vermiculita	1,25 a	0,39	16,33 a	6,28	27,81 a	27,81
CV (%)	30		29,49		35,89	

*Médias seguidas pela mesma letra, nas colunas, não diferem estatisticamente pelo Teste Tukey a 5% de probabilidade.

* DP (Desvio Padrão). (continuação Tabela 9)

4.3.2. Tratamento 2: Carolina® (controle positivo), Organosolo® com vermiculita + Vermiculita (controle negativo), após 7 e 14 dias.

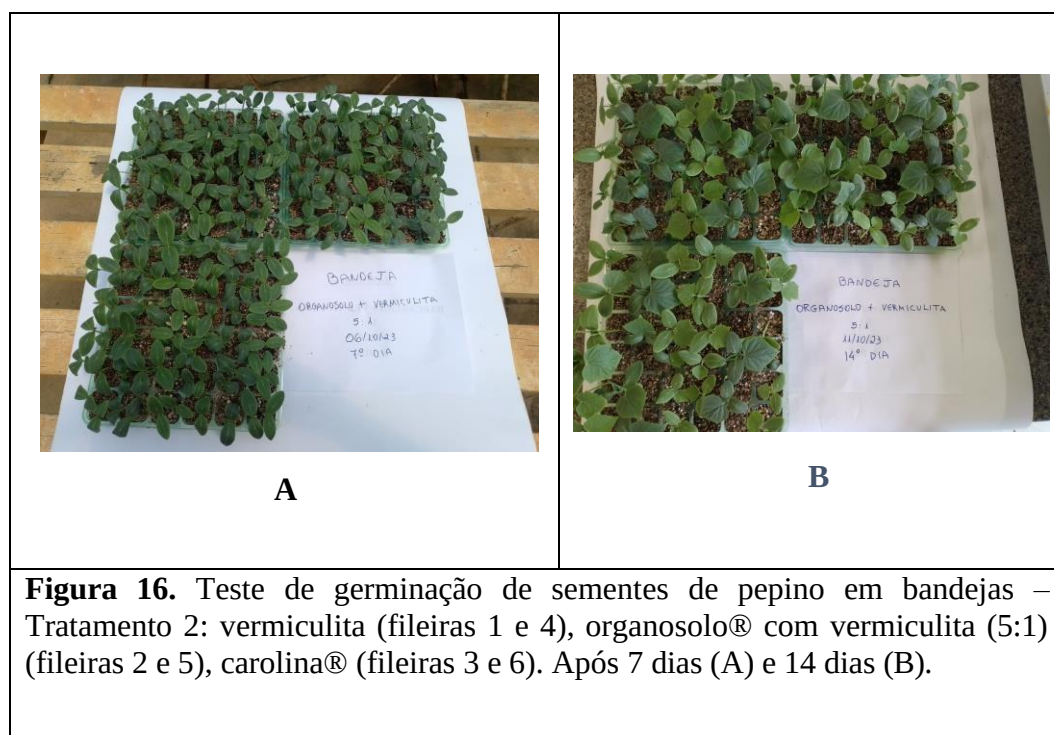


Tabela 10. Valores médios do Índice de Germinação (%) das plantas, obtidos após 7 e 14 dias de germinação das sementes de pepino em bandejas - Tratamento 2.

Amostras	IG (%) 7 dias.	*DP	IG (%) 14 dias.	*DP
Carolina®	11,67	1,03	11,33	1,03

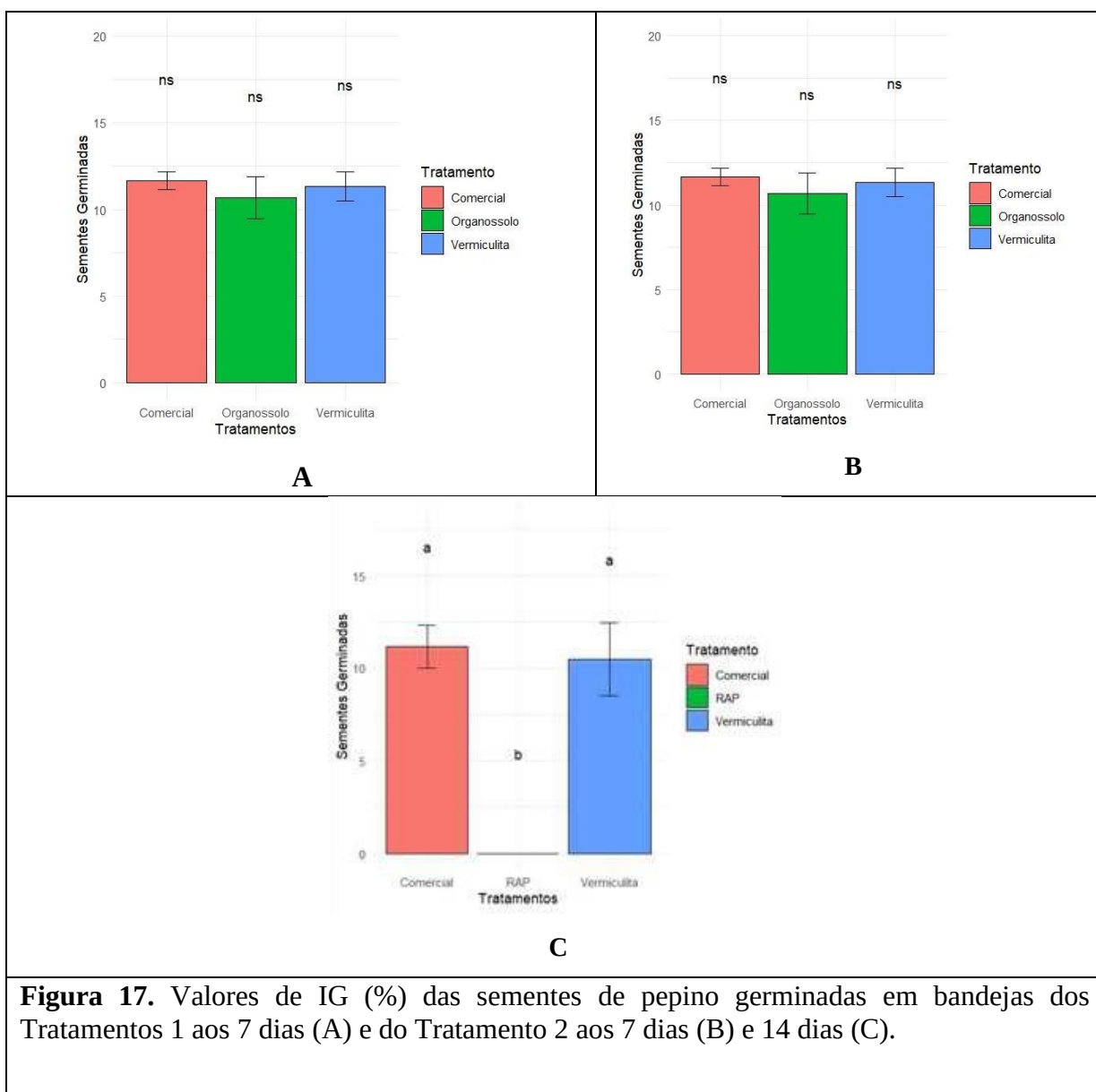
Tabela 10. Continuação.

Vermiculita com organosolo®	10,67	2,19	10,00	2,09
Vermiculita	11,33	2,42	10,67	2,42
CV (%)	7,97		18,54	

Fonte: Dados fictícios, apenas para fins ilustrativos

* De acordo com o teste de bartlett a 5% de significância, as variâncias podem ser consideradas homogêneas.

* DP (Desvio Padrão).



Após 7 dias do início do experimento realizou-se os desbastes das plântulas maiores de cada célula da sementeira, mediu-se, pesou-se e verificou-se a AF. Após o período de 14 dias, retirou-se todas as plântulas germinadas que restaram na sementeira, mediu-se com as raízes, pesou-se e verificou-se a AF.

Observou-se que o substrato carolina® foi o que apresentou um maior percentual durante todo o experimento, em seguida veio substrato vermiculita com organossolo® e por último vermiculita. Com relação a porcentagem de germinação nos 7 primeiros dias, a carolina® apresentou 97% das sementes germinadas, em seguida veio a vermiculita, com 94,4% das sementes germinadas e por último o substrato vermiculita com organossolo®, com 88,8%.

Aos 14 dias, o número de sementes germinadas foi de 94,4, 80,5 e 89% respectivamente. Observou-se que o tratamento só com vermiculita apresentou um percentual maior que o tratamento vermiculita com organosolo®. É importante ressaltar que o substrato vermiculita retém alto teor de umidade podendo esse fato ter proporcionado maior germinação aos 14 dias.

Com relação aos valores de IG, verificou-se que o tratamento vermiculita com organosolo® apresentou um índice que ficou entre os de carolina® e vermiculita. Comparando com o controle positivo (carolina®) pôde-se verificar que o tratamento vermiculita com organosolo® mostrou-se eficiente, com folhas verdes, sem apresentar amarelamento. No que diz respeito a maturidade, o substrato carolina® foi considerado muito maduro (<90) e os substratos vermiculita com organosolo® e vermiculita foram considerados maduros, valores entre 85-95, conforme descrito na Tabela 11.

Tabela 11. Valores médios do Índice de Desenvolvimento (%) de: peso, comprimento e área foliar das plantas, obtidos após 7 dias de germinação das sementes de pepino em bandejas - Tratamento 2.

Tratamento 2.						
Amostra	ID Peso (%)	ID Comp		ID AF (%)	DP	
		DP	(%)			
carolina®	2,26	0,30	23,1	0,52	51,6 ab	5,33
Vermiculita com organosolo® (tratamento)	2,99	0,57	29,45	1,21	58,86 a	10,19
Vermiculita	1,94	0,15	24,82	0,82	44,34 b	4,42
CV (%)	16,23		27,28		13,8	

*Médias seguidas pela mesma letra, nas colunas, não diferem estatisticamente pelo Teste Tukey a 5% de probabilidade.

* Desvio padrão.

* De acordo com o teste de bartlett a 5% de significância, as variâncias podem ser consideradas homogêneas, para ID peso e ID AF.

Para o ID peso, o teste de médias revelou que as amostras carolina® e tratamento podem ser consideradas iguais e a amostra vermiculita se mostrou diferentes das demais. No ID comprimento as amostras tratamento e vermiculita podem ser consideradas iguais e a carolina® difere das demais. No ID AF todas as amostras podem ser consideradas diferentes entre si (Tabela 11).

De acordo com o teste de médias, as médias relacionadas o ID peso diferem entre si, o ID comprimento as médias de carolina® e organosolo® são consideradas iguais entre si e a

do controle pode ser considerada diferente. O ID AF todas as médias são consideradas diferentes entre si. Segundo Scalón *et al.*, (1993), o substrato tem grande influência no processo germinativo, pois fatores como aeração, estrutura, capacidade de retenção de água, entre outros, podem variar de um substrato para outro, favorecendo ou prejudicando a germinação de sementes.

4.3.3. Tratamento 3: Carolina® (controle positivo) + Composto resultado da compostagem de RAP com bagaço de cana-de-açúcar + Vermiculita (controle negativo).



Figura 18. Teste de germinação de sementes de pepino em bandejas – Tratamento 3: vermiculita (fileiras 1 e 4), composto orgânico com vermiculita (5:1) (fileiras 2 e 5), carolina® (fileiras 3 e 6). Após 7 dias.

Após 14 dias do início do experimento observou-se que nenhuma semente germinou, uma hipótese levada em consideração foram as altas temperaturas observadas no período do experimento. Por isso, não foi possível realizar nenhum dos testes.

4.4. Teste de Respirometria

Observou-se que os compostos carolina e vermiculita mostraram-se muito estáveis, pois apresentaram um valor < 2 (**mg CO₂ ev gMS**), conforme dados descritos na Tabela 12, apresentando uma emissão de CO₂ reduzida e nenhuma emissão de NH₃. O material organosolo® mostrou-se estável, apresentando valores entre 2-4, emitindo valores baixos de CO₂, o que sugere que o composto pode ser aplicado no solo de forma segura e apresentou baixa emissão de NH₃, sugerindo que o composto está maduro e pronto para uso como fertilizante orgânico. O composto RAP não emitiu CO₂, nem NH₃. Existem algumas possibilidades que justifiquem a falta de emissão desses gases, no caso do CO₂ pode estar relacionado a uma acidificação do composto após os 3 dias da pré-incubação a qual as amostras foram submetidas, este ambiente ácido pode ter impedido a atividade dos microrganismos decompositores (Figura 19).

Tabela 12. Teste de estabilidade de materiais orgânicos por meio de incubação e da captura conjunta de CO₂ e de NH₃.

Amostras	mg CO₂ ev gMS	mg NH₃ ev g MS
Carolina®	0,6	0,0
Organosolo®	2,3	0,001
Vermiculita	0,2	0,0
RAP	0,0	0,0

4.5. Compostagem em biorreator de bancada

4.5.1. Mistura base

O reator utilizado no experimento foi abastecido com uma mistura de dois componentes: RAP e bagaço de cana-de-açúcar. A proporção de cada constituinte da mistura foi de 300 mg e 200 mL de água destilada para umedecimento. Foram produzidos 604,91g de mistura e a quantidade de cada constituinte, conforme Figura 41 a e b.

Tabela 13. Dados relacionados ao valor de MF e MS dos materiais utilizados na compostagem em biorreatores de bancada. (continua).

Material	Massa Fresca (MF) (g)	Massa Seca (MS) (g)
RAP	34,5	12

Tabela 13. Continuação

Bagaço de cana-de-açúcar	181,5	180,6
Mistura inicial	216	192,6

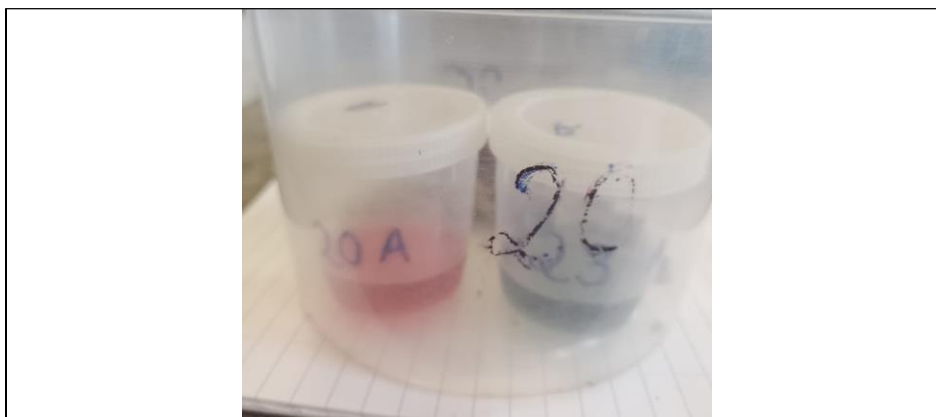


Figura 19. Teste de respirometria após incubação realizado com RAP.

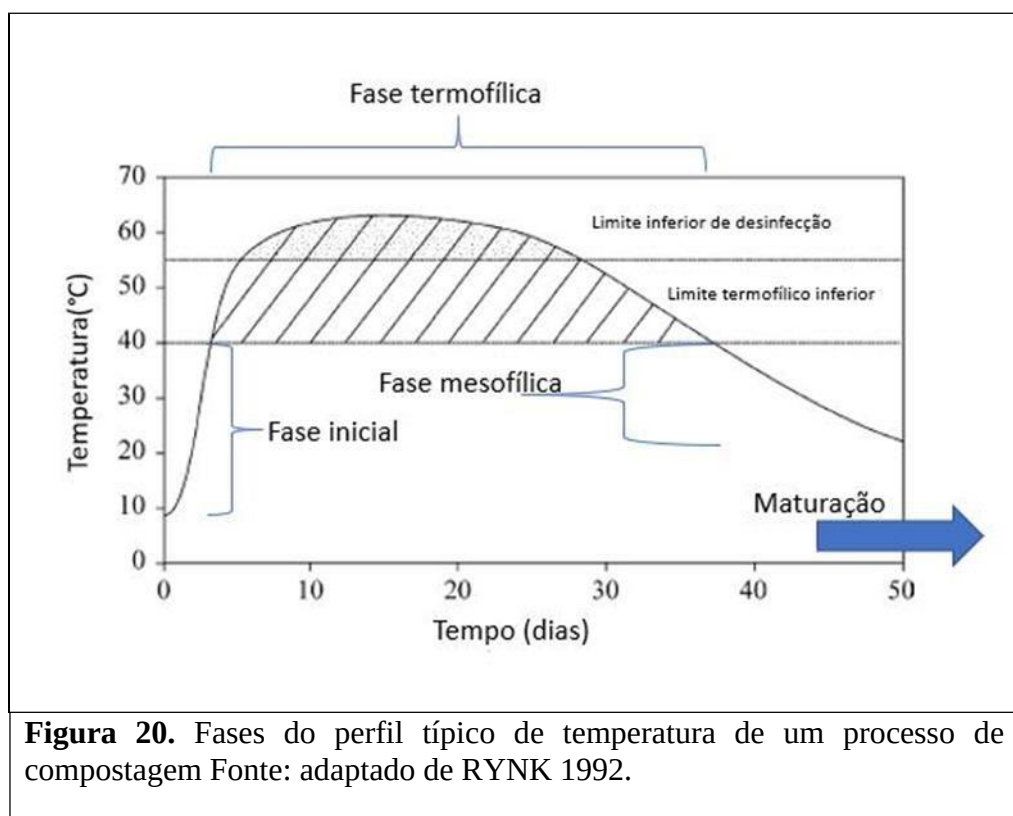
Para a correção da umidade foram acrescentados 200 mL de água destilada a mistura. A manutenção da umidade é importante por dois motivos: a água é necessária para o metabolismo microbiano e a água concorre com o oxigênio pelos vazios na matriz da mistura. Para a prática da compostagem umidades entre 40% e 65% são indicadas (Inácio, 2009).

4.5.2. Perfis de temperatura

Os perfis de temperatura do processo de compostagem ocorrido no reator foram obtidos com o auxílio do Sitrad. O principal aspecto analisado nas curvas obtidas foi a sua semelhança com o com o perfil típico de temperatura obtido em uma leira de compostagem (Figura 20) que pode ser resumido em quatro etapas:

- ✓ Fase inicial: ocorre a expansão das colônias de microrganismos mesófilos e intensificação da ação de decomposição ocasionando liberação de calor e rápida subida de temperatura.
- ✓ Fase termofílica: caracterizada por temperaturas acima de 40°C, principalmente na faixa entre 50°C e 65°C, nessa fase há predomínio dos organismos termofílicos e a atividade de degradação é muito intensa. Ocorre a formação de água metabólica.
- ✓ Fase mesofílica: fase de degradação das substâncias orgânicas mais resistentes. Diminuição da atividade biológica e da temperatura.

- ✓ Maturação: Ocorre a maturação do composto com a formação de substâncias húmicas. O composto não possui mais capacidade de auto aquecimento.



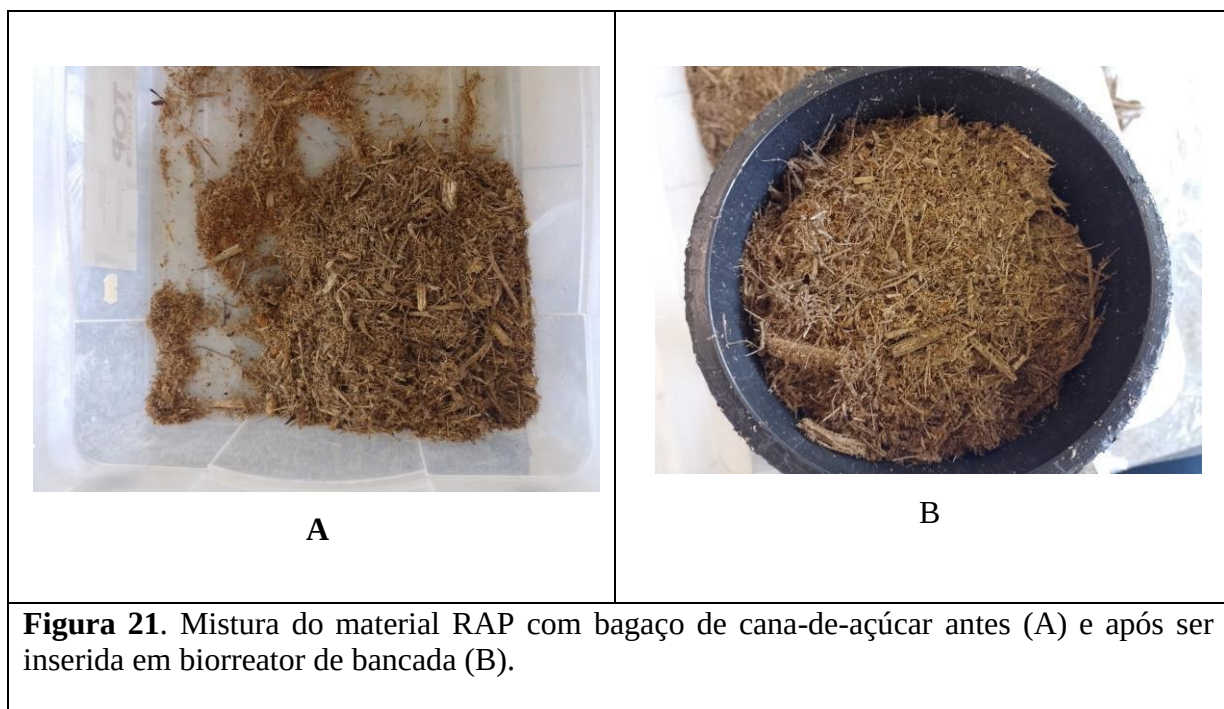
No início do processo de compostagem em biorreator, misturou-se 300g de RAP, 300g de bagaço de cana-de-açúcar e 300 mL de água destilada para umedecer a mistura (Figura 21 A) Após isso, a mistura foi colocada dentro do biorreator, conforme ilustrado na Figura 21 B.

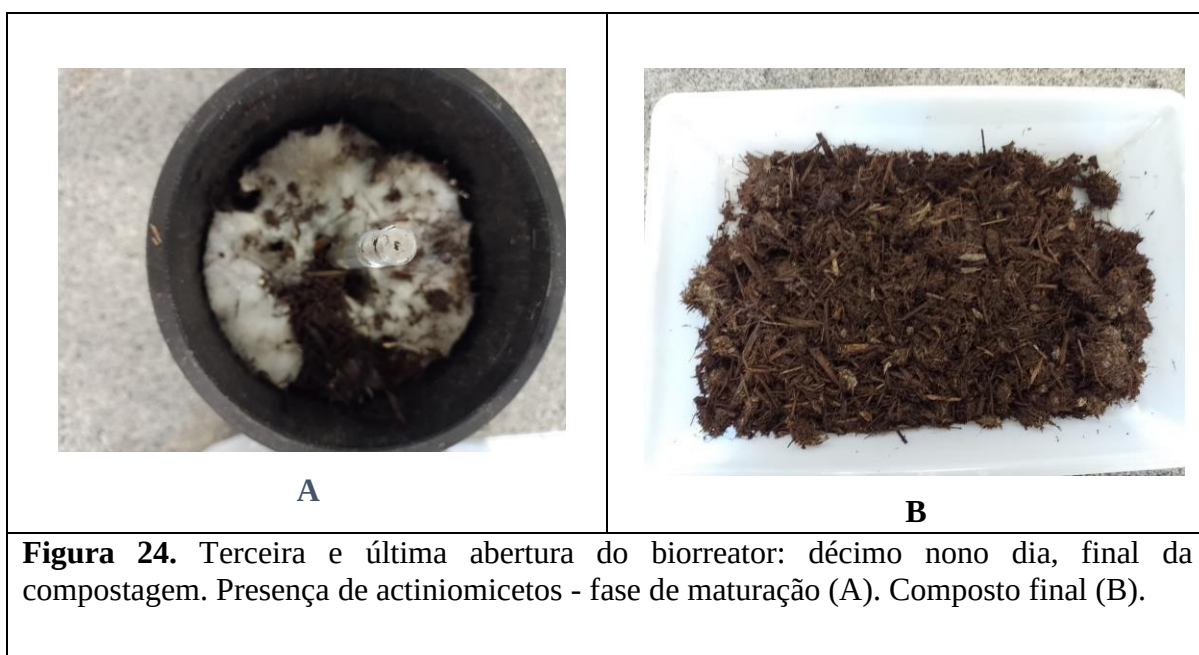
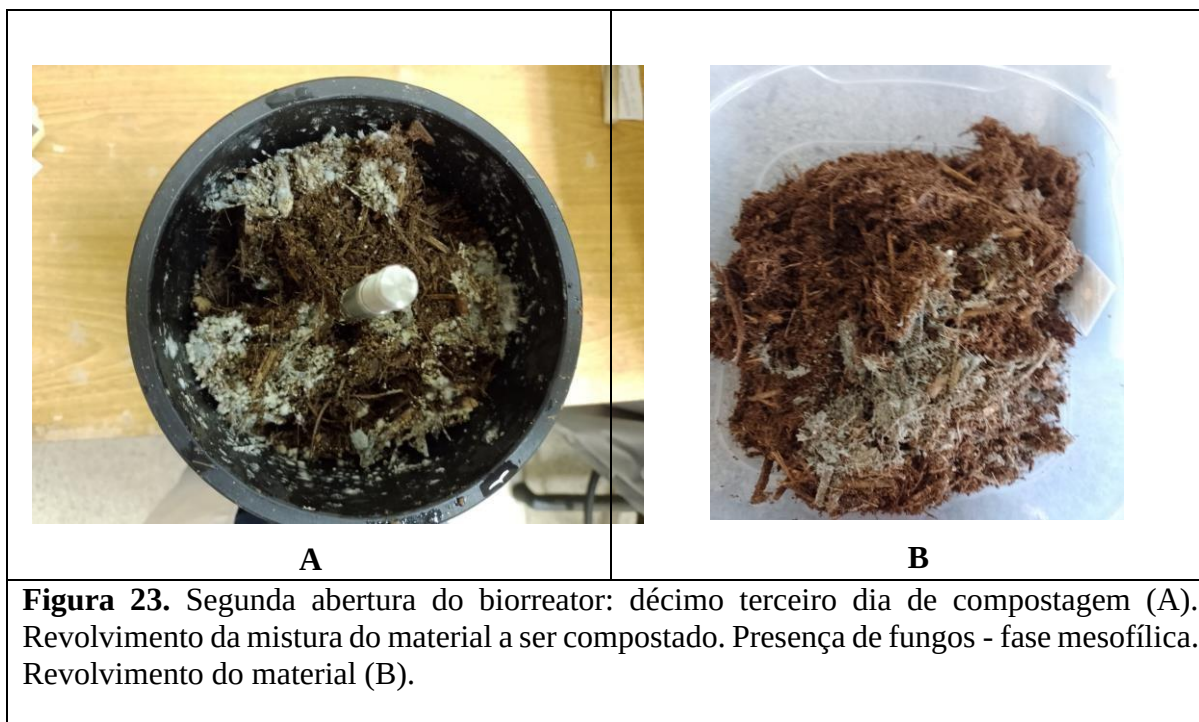
Durante o primeiro processo de amostragem, ocorrido no sexto dia de experimento, o composto ainda apresentava alguma capacidade de reaquecimento. Isso explica a retomada do aquecimento dos biorreatores, superando o pico inicial de temperatura. Neste dia o biorreator foi aberto para revolvimento da mistura. Foi acrescentado 300 g de RAP e adicionado 250 mL de água destilada para correção da umidade. Conforme ilustrado nas Figuras 24 e 25.

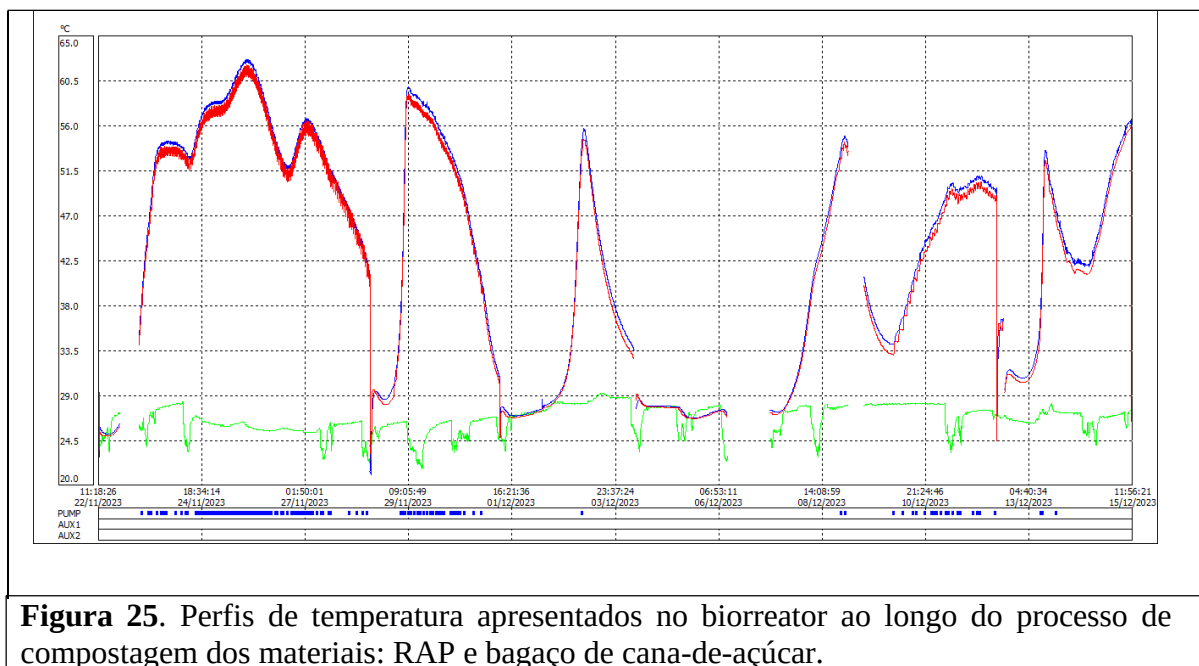
No processo seguinte de amostragem, ocorrido no sexto dia, o biorreator foi aberto novamente para revolvimento. O composto estava com um leve cheiro de amônia e aspecto

mais escurecido e apresentava umidade com a presença de fungos. Conforme ilustrado na Figuras 26 e 27.

No décimo nono dia o biorreator foi aberto e encerrada a compostagem. O material apresentava uma cor escurecida e com cheiro agradável, conforme ilustrado na Figura 24 B.







5 CONCLUSÃO

As análises do índice de maturidade revelam que a RAP se mostrou imaturo em todos os testes conduzidos. Apesar do teor alto de nutrientes para um material orgânico, esse material apresentou fitotoxicidade e falta de estabilidade biológica, sendo considerado como imaturo dentro da classificação de maturidade compostos orgânicos (compostagem). Portanto, este material tem limitação de uso para aplicação como fertilizante orgânico e é inadequado para uso como substrato de mudas. Pelas características apresentadas o RAP pode ser classificado como uma torta orgânica e não como composto orgânico. O tratamento complementar do RAP pela compostagem se mostrou viável, já que o composto final não apresentou fitotoxicidade quando submetido aos testes de germinação.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, C. N. (2005). **Teoria do Apego: Fundamentos, Pesquisas e Implicações Clínicas**. São Paulo: Casa do Psicólogo.
- ABRELPE, 2022, **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**, Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acesso em: novembro de 2023.
- AMLINGER, F.; PEYR, S.; CUHLS, C. **Emissões de gases de efeito estufa por compostagem e tratamento biológico mecânico**. Gerenciamento de resíduos. Res., v. 26, pp. 47–60. 2008
- ANDREOLI, C. V. **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**/ Cleverson Vitorio Andreoli (coordenador). – Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 282p.: il. Projeto PROSAB, 2001.
- ARAÚJO NETO, S. E.; AZEVEDO, J. M. A.; GALVÃO, R. O.; OLIVEIRA, E. B. L.; FERREIRA, R. L. F. **Produção de muda orgânica de pimentão com diferentes substratos**. Ciência Rural, Santa Maria, v. 39, n. 5, p. 1408-1413, 2009. Disponível em: <www.scielo.br/pdf/cr/v39n5/a194cr397>
- ASSES, N.; FARHAT, A.; CHERIF, S.; HAMDI, M.; BOUALLAGUI, H. **Comparative study of sewage sludge co-composting with olive mill wastes or green residues: process monitoring and agriculture value of the resulting composts**. Process Safety and Environmental Protection, v. 114, p. 25-35, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Resíduos Sólidos – Classificação**. 2004. Disponível em: < <https://www.suape.pe.gov.br/pt/publicacoes/213-normas-tecnicas/184-abnt-nbr-n-10004-de-2004#:~:text=Esta%20Norma%20classifica%20os%20res%C3%ADduos,Comiss%C3%A3o%20Nacional%20de%20Energia%20Nuclear.>>. Acesso em: março de 2024.
- AVIDOV, R.; SAADI, I.; KRASSNOVSKY, A.; HANAN, A.; MEDINA, S.; RAVIV, M.; CHEN, Y.; LAOR, Y. **Composting municipal biosolids in polyethylene sleeves with forced aeration: Process control, air emissions, sanitary and agronomic aspects**. Waste Management, v. 67, p. 32-42, 2017.

AWASTHI, M. K.; PANDEY, A. K.; KHAN, J.; BUNDELA, P. S.; WONG, J. W. C.; SELVAM, A. **Evaluation of thermophilic fungal consortium for organic municipal solid waste composting**. *Bioresource Technology*, v. 168, p. 214-221, 2014.

AZIM, K. *et al.* **Composting parameters and compost quality: a literature review**. *Organic Agricultural*, v.8, p.141-158, 2018.

BELO, S. R. S. **Avaliação de fitotoxicidade através de *Lepidium sativum* no âmbito de processos de compostagem**. 2011. 68 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente). Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2011.

BENITO, M. *et al.* **Dynamics of pruning waste and spent horse litter co-composting as determined by chemical parameters**. *Bioresource technology*, v. 100, n. 1, p. 497-500, jan., 2009.

BERNAL, M. P.; ALBURQUERQUE, J. A.; MORAL, R. **Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment**. A review. *Bioresource Technology*, v. 100, n. 22, p. 5444-5453, 2009.

BOHACZ, J. **Microbial strategies and biochemical activity during lignocellulosic waste composting in relation to the occurring biothermal phases**. *Journal of Environmental Management*, v. 206, p. 1052-1062, 2018.

BRASIL. **Regras para análise de sementes**. Brasília: Ministério da Agricultura e da Reforma Agrária, 2009. 399p.

BRASIL. (2016) Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Plano Plurianual 2016-2019 - **Anexo I. Brasília: Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão**. Disponível em: Disponível em: <<http://www.planejamento.gov.br/assuntos/planeja/plano-plurianual>>. Acesso em: março de 2024.

BUSATO, M.A.; FERIGOLLO, M.C. **Desperdício de alimentos em unidades de alimentação e nutrição: uma revisão integrativa da literatura**. *Holos*, [S. l.], v. 1, p. 91-102, 2018. Disponível em: <<https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/4081/pdf>>. Acesso em: dezembro de 2023.

BUSTAMANTE, M. A.; RESTREPO, A. P.; ALBURQUERQUE, J. A.; PÉREZ-MURCIA, M. D.; PAREDES, C.; MORAL, R.; BERNAL, M. P. **Recycling of anaerobic digestates by composting: effect of the bulking agent used**. *Journal of Cleaner Production*, v. 47, p. 61-69, 2013.

BUTLER, T.A., SIKORA, L.J., STEINHILBER, P.M., DOUGLASS, L.W. **Compost age and sample storage effects on maturity indicators of biosolids compost.** Journal of Environmental Quality, 30, p. 2141–2148, 2001.

CARVALHO, PCT; GUERRA, MADSL. **Compostagem.** TSUTIYA, MT; CAMPARINI, JB; ALEM SOBRINHO, P.; HESPANOL, I, p. 181-208, 2002.

CAVALLARI, D.A.N.; WETZEL, M.M.V. da S.; BATISTA, L.A.R. **Substrato e temperatura na germinação de sementes de *Gmelina arborea* Roxb.** Revista Brasileira de Sementes, v. 14, n. 1, 2009.

CAYULA, M. L.; MONDINI, C.; INSAM, H.; SINICCO, T; WHITTLE, I. F. **Plant and animal wastes composting: Effects of the N source on process performance.** Bioresource Technology, v. 100, pp. 3097-3106, 2009.

CERRI, C.E.P. **Compostagem.** São Paulo: Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz, Universidade de São Paulo. 2008.19 p.

CHANG, J. I, *et al.* **Effects of compositions on food waste composting.** Bioresource Technology. Taiwan, v. 99, p. 8068-8074, 2008.

CORDEIRO, N. M. **Compostagem de resíduos verdes e avaliação da qualidade dos compostos obtidos: caso de estudo da algar S.A.** 2010. 102 p. Tese (Mestrado em Engenharia do Ambiente – Tecnologias Ambientais) – Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

CORREIA, D.; ROSA, M.F.; NORÕES, E.R.V.; ARAUJO, F.B.S. **Uso do pó da casca de coco na formulação de substratos para formação de mudas enxertadas de cajueiro anão precoce.** Revista Brasileira de Fruticultura, Jaboticabal, SP, v. 25, n. 3, p. 557-558, 2003.

COSTA F.; JOSÉ D. DA. **Valorização de sabugo de milho: potencial para produção de etanol de segunda geração e uso de lignina residual da hidrólise enzimática como adsorvente de corante catiônico.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2021.

DORES-SILVA, P. R.; LANDGRAF, M. D.; REZENDE, M. O. de O. **Processo de estabilização de resíduos orgânicos: vermicompostagem versus compostagem.** Química Nova, São Paulo, v. 36, n. 5, p. 640-645, 2013.

FAO - Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura. **Urban and periurban agriculture.** 2016. Disponível em: <<http://afo.org/family-farming/detail/en/c/1043688/>> Acesso em 20 de abril de 2024.

FARIA, F. A. **Cinética da liberação de fertilizantes incorporados à biomassa do pseudocaule de bananeira torrefada.** 2020.

FEAM, **Como destinar resíduos sólidos urbanos.** Fundação Estadual do Meio Ambiente. Belo Horizonte: FEAM, 2002. 45p.

FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. **Manual prático para a compostagem de biossólidos.** Londrina: Instituto de Pesquisas Agronômicas do Paraná, 1999. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/6633104/mod_resource/content/1/Livro_Compostagem.pdf> Acesso em: 27 mar. 2024.

FERNANDES, P. **Análise do gerenciamento de resíduos sólidos urbanos em cidade de pequeno porte no Cariri Paraibano.** Dissertação de Mestrado. 2021.

FERRAZ, M.V.; CENTURION, J.F.; BEUTLER, A.N. **Caracterização física e química de alguns substratos comerciais.** Acta Scientiarum Agronomy, Maringá, v.27, n.2, p.209-214, 2005.

FONSECA, J. P. Q. B. **Efeito da adição de borras de café sobre a compostagem de resíduos de Acacia dealbata L. (mimosa).** 2012. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrônômica). Universidade de Trás-os-montes e Alto Douro, Vila Real, 2012.

GIACOMINI, G. X. **Desenvolvimento de filmes híbridos à base de quitosana e avaliação do potencial antifúngico.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pelotas. 2016.

GONÇALVES, J. L. M.; POGGIANE, F. 1996. **Substrato para produção de mudas.** In: Congresso Latino Americano de Ciências do solo, Águas de Lindóia, 1996. Anais. Águas de Lindóia, SBSCS. CD-ROM

GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ, J.J. *et al.* **Evaluation of composition and performance of composts derived from guacamole production residues.** Journal of Environmental Management. Sevilla, v.147, p. 132-139. 2015.

GOUVEIA, J.G. **Diretrizes para uso de composto orgânico na agricultura: proposta para municípios com até 100.000 habitantes.** 2012. 94 p. Tese (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste.

GUERMANDI, J.I. **Avaliação dos parâmetros físicos, químicos e microbiológicos dos fertilizantes orgânicos produzidos pelas técnicas de compostagem e vermicompostagem da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos coletada em estabelecimentos alimentícios de São Carlos/SP.** Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo. São Carlos, p.179, 2015.

GUIDONI, L. L. C.; MARQUES, R. V.; MONCKS, R. B.; BOTELHO, F. T.; PAZ, M. F. da; CORRÊA, L. B.; CORRÊA, E. K. **Home composting using different ratios of bulking agent to food waste**. Journal of Environmental Management, v. 207, p. 141-150, 2018.

HARADA, Y.; INOKO, A. **Relationship between cation-exchange capacity and degree of maturity of city refuse composts**. Soil Science and Plant Nutrition, v. 26, n. 3, p. 353-362, 1980.

HASSEN, A.; BELGUITH, K.; JEDIDI, N.; CHERIF, A.; CHERIF, M.; BOUDABOUS, A. **Microbial characterization during composting of municipal solid waste**. Bioresource Technology, v.80, n.3, p.217-25, 2001.

HAUG RT (1993) **The practical handbook of compost engineering**. Lewis Publishers, Boca Raton.

IGLESIAS JIMÉNEZ, E.; PÉREZ G., V. **Determination of maturity indices for city refuse composts**. Agriculture, Ecosystems and Environment, v. 38, n. 4, p. 331-343, 1992.

INÁCIO, C. T.; MILLER, P. R. M. **Compostagem: Ciência e prática para a gestão de resíduos orgânicos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009.

INÁCIO, C. T.; BETTIO, D. B.; MILLER, P. R. M. **O papel da compostagem de resíduos orgânicos urbanos na mitigação de emissão de metano**. Embrapa Solos, Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/882162>. Acesso em: 05 abril. 2024.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA – IPEA. **Diagnóstico dos Resíduos Orgânicos do Setor Agrossilvopastoril e Agroindústrias Associadas**. Brasília: IPEA, 2012. Ipea - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Diagnóstico dos resíduos sólidos urbanos. Relatório de pesquisa. Brasília. 2012.

KIEHL, E.J. **Fertilizantes orgânicos**. Piracicaba. Ed. Agronômica Ceres, 1985.

KIEHL E.J. 1998. **Manual de Compostagem: maturação e qualidade do composto**. E.J. KIEHL, Piracicaba, São Paulo. 171p.

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

KIEHL, E. J. **Novo fertilizantes orgânicos**. Piracicaba: Degaspari, 2010.

KRATZ, D. & WENDLING, I. **Crescimento de mudas de Eucalyptus camaldulensis em substratos à base de casca de arroz carbonizada**. Ceres, 2016.

LASARIDI, K.E., STENTIFORD, E.I., 1998. **A simple respirometric technique for assessing compost stability**. Water Res. 32, 3717–723.

LAZCANO, C.; GÓMEZ-BRANDÓN, M.; DOMÍNGUEZ, J. **Comparison of the effectiveness of composting and vermicomposting for the biological stabilization of cattle manure.** Chemosphere, v. 72, n. 7, p. 1013-1019, 2008.

LEITE, T. DE A. **Compostagem termofílica de lodo de esgoto: higienização e produção de bio sólido para uso agrícola.** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2015.

LEONARDO S. L. T. WH; LEEGE, PB; MILLNER, PD; and WILSON, ME. 2002. **Test methods for the examination of composting and compost.** United States Department of Agriculture, and Composting Council Research and Education Foundation, Holbrook, NY.

LI, Z.; LU, H.; REN, L.; HE, L. **Experimental and modeling approaches for food waste composting: a review.** Chemosphere, v. 93, n. 7, p. 1247-1257, 2013.

LI, Z.; LU, LEE, L. H.; WU, T., Y.: **Sustainability of using composting and vermicomposting technologies for organic solid waste biotransformation: recent overview, greenhouse gases emissions and economic analysis.** Journal of Cleaner Production, v. 111, p. 262 -278, 2015.

MACHADO, P.L.O. de A.; CAMPOS, A.C.; SANTOS, F.S. **Métodos de preparo de amostras e de determinação de carbono em solos tropicais.** Embrapa Solos, Circular Técnica, 2003, 9p.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa no 44, de 02 de outubro de 2007.** Disponível em: < <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sanidade-animal-e-vegetal/saude-animal/programas-de-saude-animal/febre-aftosa/documentos-febre-aftosa/instrucao-normativa-mapa-no-44-de-02-de-outubro-de-2007.pdf/view> > Acesso em: 10 de janeiro de 2024.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa no 61, de 08 de julho de 2020.** Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumosagropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-61-de-8-7-2020-organicos-ebiofertilizantes-dou-15-7-20.pdf>>. Acesso em: 10 de janeiro de 2024.

MARAGNO, E. S.; TROMBIN, D. F.; VIANA, E. **O uso da serragem no processo de minicompostagem.** Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v. 12, n. 4, p.355-360, out. 2007.

MARQUES, G.N. **Substrato, combinação de cultivares e mudas de morangueiro produzidas em cultivo sem solo.** Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar. Universidade Federal de Pelotas. 2016.

MASSUKADO, L.M. **Desenvolvimento do processo de compostagem em unidade descentralizada e proposta de software livre para o gerenciamento municipal dos resíduos sólidos domiciliares.** Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo. São Carlos, p.182, 2008.

MATOS, A. T. de. **Tratamento e aproveitamento agrícola de resíduos sólidos.** Viçosa: UFV, 2014.

MILLER, F.C. 1992. **Composting as a process based on the control of ecologically selective factors.** In: Meeting, F.B. Soil Microb. Ecol., 18:515-543.

MINAMI, K.; SALVADOR, E.D. **Substrato para plantas.** Piracicaba, SP: Degaspari. 2010.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Compostagem doméstica, comunitária e institucional de resíduos orgânicos: manual de orientação.** Ministério do Meio Ambiente, Centro de Estudos e Promoção da Agricultura de Grupo, Serviço Social do Comércio. - Brasília, DF: MMA, 2017. Disponível em <https://mma.gov.br/images/arquivo/80058/Compostagem-ManualOrientacao_MMA_2017-06-20.pdf>. Acesso em: outubro de 2023.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Compostagem doméstica, comunitária e institucional de resíduos orgânicos: manual de orientação.** Ministério do Meio Ambiente, Centro de Estudos e Promoção da Agricultura de Grupo, Serviço Social do Comércio. -- Brasília, DF: MMA, 2018. Disponível em <https://portal-espacial.sibbr.gov.br/ws/layers/view/more/areas_prioritarias_mata_atlantica_4326_iso88591> Acesso em: dezembro de 2023.

MORAES, S.L.; MASSOLA, C. P.; SACCOCCIO, E.M.; SILVA, D.P.; GUIMARÃES, Y.B.T. **Cenário brasileiro da geração e uso de biomassa adensada.** Revista IPT: Tecnologia e Inovação, v.1, n.4, p. 58-73, 2017.

NUNES, M. U. C.; SANTOS, J. R. **Alternativas tecnológicas para o aproveitamento de resíduos de coqueiro gigante para produção de adubo orgânico; compostagem e outras.** In: CINTRA, F. L. D.; FONTES, H. R.; PASSOS, E. E. M. et al. Fundamentos tecnológicos para a revitalização das áreas cultivadas com coqueiro gigante no nordeste do Brasil. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2009. p. 127-144.

OLIVEIRA, F. N. S. O.; LIMA, H. J. M. L.; CAJAZEIRA, J. P. **Uso da compostagem em sistemas orgânicos.** Embrapa Agroindústria Tropical. Documentos, 89 - Fortaleza- CE, 2004.

OLIVEIRA, E. C. A. *et al.* **Compostagem**. Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas. Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura Luiz de Quieroz, Piracicaba, 2008.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **A ONU e a população mundial**. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/acao/populacao-mundial/>>. Acessado em: fevereiro de 2024.

ONWOSI, C. O. *et al.* **Composting technology in waste stabilization: On the methods, challenges and future prospects**. *Journal of Environmental Management*, v. 190, p. 140-157, abr., 2017.

PAIVA, L.R.G. **Avaliação do desenvolvimento vegetativo de duas cultivares de pimenta sob cultivo orgânico**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Estadual da Paraíba. 2017.

PEREIRA-NETO, J. T.; STENTIFORD, E. I.; MARA, D. D. **Low cost controlled composting of refuse and sewage sludge**. *Water Science and Technology*, v. 19, n. 5-6, p. 839-845, 1987.

PEREIRA NETO, J. T., 1996: **Manual de Compostagem**. Belo Horizonte – UNICEF – 56p

PEREIRA NETO, J. T. **Manual de compostagem: processo de baixo custo**. Viçosa: editora UFV, 2007. 81p.

PEREIRA NETO, JOÃO T. **Manual de Compostagem: processo de baixo custo**. 4. ed. Pelotas: Editora UFV, 2014. 59 p.

PEREIRA, V. R.; FIORE, F. A. **Fatores influenciadores da segregação de resíduos orgânicos na fonte geradora para a viabilização de sistemas de compostagem**. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 27, p. 643-652, 2022.

POLPRASERT C. **Organic Waste Recycling: Technology and Management**. (2nd ed.). John Wiley & Sons. USA. 1996.

PRÁ, M.; CORREA, E.; CORREA, L.; LOBO, M.; SPEROTTO, L.; MORES, E. **Compostagem como Alternativa para a Gestão Ambiental na Produção de Suínos**. Porto Alegre: Editora Evandraf Ltda, 2009. 144p.: il.

RAMOS, L. S. **Compostagem e sua simulação em reatores de bancada do tipo controle diferencial de temperatura**. Monografia em Engenharia Ambiental – Universidade do Rio de Janeiro, p. 12. 2019.

RASHAD, F. M.; SALEH, W. D.; MOSELHY, M. A. **Bioconversion of rice straw and certain agro-industrial wastes to amendments for organic farming systems: 1. Composting, quality, stability and maturity indices.** Bioresource Technology, v. 101, n. 15, p. 5952-5960, 2010.

RAUT, M. P.; PRINCE WILLIAM, S. P. M.; BHATTACHARYYA, J. K.; CHAKRABARTI, 10, p. 93-125, 2015.

RIBEIRO, S A. B. **Adaptação do Processo de Gongocompostagem para sua utilização na Região Metropolitana da Cidade do Rio de Janeiro.** Tese (Doutorado em Agronomia e Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2023.

RUSSO, M. A. T. **Tratamento de resíduos sólidos.** Material de apoio – Universidade de Coimbra, Coimbra, 2003.

SAID-PULLICINO, D.; ERRIQUENS, F. G.; GIGLIOTTI, G. **Changes in the chemical characteristics of water-extractable organic matter during composting and their influence on compost stability and maturity.** Bioresource Technology, v. 98, n. 9, p. 1822-1831, jul., 2007.

SCALON, S.P.Q.; ALVARENGA, A.A. & DAVIDE, A.C. **Influência do substrato, temperatura, umidade e armazenamento sobre a germinação de sementes de pau-pereira (*Platycamus regnelli Benth*).** Revista Brasileira de Sementes, Brasília, **15** (1):143- 146, 1993.

SHARMA, HB, VANAPALLI, KR, CHEELA, VS, RANJAN, VP, JAGLAN, AK, DUBEY, B., GOEL, S., & BHATTACHARYA, J. (2020). **Desafios, oportunidades e inovações para uma gestão eficaz de resíduos sólidos durante e após a pandemia de COVID-19.** Recursos, Conservação e Reciclagem, 162 (maio), 105052. <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020>>. Acesso em: fevereiro de 2024.

SCHMITZ, J.A.K.; SOUZA, P.V.D.; KÄMPF, A.N. **Propriedades químicas e físicas de substratos de origem mineral e orgânica para cultivo de mudas em recipientes.** Ciência Rural, Santa Maria, v. 32, n. 6, p. 937-944, 2002.

SCHUELER, A., MAHLER, C., & GUIÃO, R. (2012). Compostagem. In C. Mahler (Org.), **Lixo urbano, o que você precisa saber sobre o assunto** (pp. 33-70). Rio de Janeiro: Reavan: FAPERJ.

STANLEY, A.; TURNER, G. Composting. **Teaching Science**, v. 56, n. 2, p.34-39, jun. 2010.

- TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S.J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre, Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1995. 174p. (Boletim Técnico de Solos, 5).
- TUOMELA, M, *et al.* **Biodregadation of lignin in a compost environment: a review**. Bioresource Technology, v. 2, o. 169-183, 2000.
- VALENTE, BEATRIZ S. *et al.* **Fatores que afetam o desenvolvimento da compostagem de resíduos orgânicos**. Archivos de zootecnia, v. 58, n. 224, p. 59-85, 2009.
- VILLAR, I.; ALVES, D.; GARRIDO, J.; MATO, S. **Evolution of microbial dynamics during the maturation phase of the composting of different types of waste**. Waste Management, v. 54, p. 83-92, 2016.
- VIONE, E. L. B. **Caracterização química e liberação de nitrogênio de compostos evermicompostos de casca de arroz e dejetos animais**. 2016. 191 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.
- WANG, P., CHANGA, CM, WATSON, ME, DICK, WA, CHEN, Y., HOITINK, HAJ, 2004. **Maturity indices for composted dairy and pig manures**. 36, 767-776.
- ZAGO, V. C. P.; BARROS; R. T. DE V. **Gestão dos resíduos sólidos orgânicos urbanos no Brasil: do ordenamento jurídico à realidade**. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 24, p. 21 2020.
- ZHU, R., *et al.* (2004) **New Evidence on the Earliest Human Presence at High Northern Latitudes in Northeast Asia**. Nature, 431, 559-562. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/nature02829>>. Acesso em: janeiro de 2024.
- ZMORA- NAHUM. S., MARKOVITCH, O.; TARCHITZKY, J., CHEN, Y., 2005. **Dissolved organic carbon (DOC) as a parameter of compost maturity**. Soil Biol. Biochem. 37, 2109–2116.
- ZUCCONI, F.; PERA, A.; FORTE, M.; DE BERTOLDI, M. **Valuating toxicity in immature compost**. Biocycle, Emmaus, v. 22, p.54-57, 1988.