UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE SAÚDE PÚBLICA

FERNANDO ANTONIO BELTRAME

**VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS
ORGÂNICOS PARA GRANDES GERADORES:
AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA DE
EQUIPAMENTOS COMPACTOS**

**VERSÃO REVISADA
SÃO PAULO
2018**

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE SAÚDE PÚBLICA

Fernando Antonio Beltrame

Valorização de resíduos sólidos orgânicos
para grandes geradores: avaliação da
viabilidade técnica de equipamentos
compactos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-
Graduação Ambiente, Saúde e
Sustentabilidade, da Faculdade de Saúde
Pública, para obtenção do título de Mestre
em Ciências.

Orientador: Prof^o Dr^o Ednilson Viana

**VERSÃO REVISADA
SÃO PAULO
2018**

É expressamente proibida a comercialização deste documento tanto na sua forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano da dissertação.

Catálogo da Publicação

Serviço de Documentação

Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo

Beltrame, Fernando A.

Valorização de resíduos sólidos orgânicos para grandes geradores: avaliação da viabilidade técnica de equipamentos compactos, Profº Drº Ednilson Viana – São Paulo – 2018

No fls. F.: 93 il,

Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, 2018

BELTRAME, Fernando A., Valorização de resíduos sólidos orgânicos para grandes geradores: avaliação da viabilidade técnica de equipamentos compactos – Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo, 2018

FOLHA DE APROVAÇÃO (DISSERTAÇÃO)

BELTRAME, Fernando A

Valorização de resíduos sólidos orgânicos para grandes geradores: avaliação da viabilidade técnica de equipamentos compactos, da dissertação apresentada ao *Programa de Pós-Graduação Ambiente, Saúde e Sustentabilidade, da Faculdade de Saúde Pública, da Universidade de São Paulo*, para obtenção do título de Mestre em Ciência.

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à Aline, amiga e esposa, por seu amor, companheirismo e compreensão. Às minhas filhas Maria Clara e Ana Laura, por darem um novo sentido e importância para cada dia da minha vida. Ao meu pai Deonil (*in memoriam*) e mãe Maria, pela dedicação e cuidado com a nossa família. Aos meus irmãos Priscila e Rodrigo pelo companheirismo e apoio às novas ideias e projetos. Aos meus sobrinhos Cecília e Antonio pela ajuda nas minhas oficinas de compostagem.

AGRADECIMENTOS

Aos meus familiares, amigos e professores, que estiveram comigo e me apoiaram na realização de diversos estudos e projetos sociais e ambientais, sem os quais eu não estaria nessa etapa da carreira.

Ao meu orientador Prof. Dr. Ednilson Viana pela confiança, apoio e incentivo, desde a primeira conversa por telefone.

À Profa. Dra. Wanda Günther, Prof. Dr. André Simões e Prof. Dr. Giovano Candiani pelo carinho e imensa contribuição no desenvolvimento e melhoria desse trabalho.

Aos meus amigos e professores, que tanto contribuíram para o aprimoramento desse trabalho e do meu entendimento sobre o tema.

À FAPESP, pela confiança e apoio financeiro para a realização da pesquisa, testes, construção de equipamentos e bolsas.

À FSP, docentes e todos os seus funcionários pela criação, apoio e dedicação ao Programa de Mestrado Profissional em Ambiente, Saúde e Sustentabilidade.

Muito obrigado.

RESUMO

BELTRAME, Fernando A., **Valorização de resíduos sólidos orgânicos para grandes geradores: avaliação da viabilidade técnica de equipamentos compactos**, 2018. 93 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, 2018

Após vinte e um anos de tramitação em processo legislativo, no Brasil, a Lei da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) foi aprovada em 2 de agosto de 2010. Apesar do arcabouço regulatório da importância deste marco legal, ainda há muito a evoluir com relação ao tratamento e destinação dos resíduos sólidos no país. Em 2016, foram gerados aproximadamente 71,3 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos em todo o território nacional, dos quais 41% foram dispostos em locais inadequados como lixões, terrenos baldios ou aterros controlados. Por volta de 50% deste resíduo gerado é constituído por resíduo orgânico (restos de alimento, cascas de frutas e hortaliças), material reconhecido como reciclável, pela Política Nacional de Resíduos Sólidos. No entanto, menos de 1% do resíduo orgânico é transformado em composto orgânico, isso significa que ao invés de os seus nutrientes retornarem à cadeia produtiva e à terra, geram impacto ambiental e problemas sanitários. Este cenário se repete no município de São Paulo e em todas as grandes cidades brasileiras. A presente dissertação, neste contexto, tem por objetivo avaliar diferentes inóculos que aceleram o processo de degradação dos resíduos orgânicos, bem como os parâmetros do processo de compostagem para o desenvolvimento de um equipamento de compostagem automatizado, compacto, eficiente e de simples operação, para uso em centros urbanos. O percurso metodológico de investigação considerou: levantamento dos principais inóculos para compostagem do mercado e desenvolvidos de forma artesanal; produção dos inóculos para teste; construção de protótipos de equipamentos de compostagem com diversas características para se avaliar os principais parâmetros físicos que interferem no processo de compostagem; realização de análises laboratoriais de composição microbiana, pH, umidade, Carbono/Nitrogênio e respiração microbiana; pesquisa de patentes nacionais e internacionais de equipamentos de compostagem automatizados; realização de testes de bancada com os inóculos e equipamentos desenvolvidos; visitas a diversos centros de compostagem; e construção de protótipo final, conforme parâmetros levantados na pesquisa. Como resultados pôde-se identificar os inóculos EM (microrganismos eficientes) e serapilheira como os mais adequados ao sistema de compostagem proposto, com a melhor composição de fungos e bactérias, bem como o desenvolvimento de protótipos com as características e controles necessários para a produção de um composto de qualidade, dentro dos padrões exigidos por lei e nas condições de tempo e área demandadas pelo mercado nacional.

Palavras-chave: compostagem, resíduos sólidos urbanos, resíduos orgânicos, gestão de resíduos, compostagem acelerada, equipamento de compostagem, sustentabilidade, PNRS

ABSTRACT

BELTRAME, Fernando A., **Appreciation of organic solid waste for large generators: assessment of technical feasibility for compact equipment's**, 2018. 93 f. Master's Thesis - Faculty of Public Health, University of São Paulo, São Paulo, 2018

After twenty-one years in the legislative process in Brazil, the National Policy on Solid Waste was approved on August 2nd, 2010. Despite the importance of this legal framework, there is still much to be done in relation to treatment and disposal of solid waste in the country. In 2016, approximately 71.3 million tons of municipal solid waste were generated throughout the country, of which 41% were disposed of in unsuitable places such as dumps, “wastelands” or controlled landfills. About 50% of this waste is composed of organic waste (leftovers, fruit peels and vegetables), a material recognized as recyclable by the National Solid Waste Policy. However, less than 1% of the organic waste is transformed into organic compost, which means that instead of its nutrients returning to the production chain and to the land, they generate environmental impact and sanitary problems. This scenario is repeated in the City of São Paulo and in all the major Brazilian cities. The aim of this dissertation is to evaluate different inoculums that accelerate the degradation process of organic residues, as well as the parameters of the composting process for the development of an automated, compact, efficient and simple operation of composting equipment, used in urban centers. The methodological course of investigation considered: survey of the main market inoculants for composting and produce and test our own inoculants; production of inocula for testing; construct a composting equipment with several characteristics to evaluate the main physical parameters that interfere in the composting process; laboratory analysis of microbial composition, pH, humidity, Carbon / Nitrogen and microbial respiration; research of national and international patents of automated composting equipment; performing bench tests with inocula and equipment developed; visits to various composting centers; and final prototype construction, according to the parameters raised in the research. As a result of it was possible to identify that the inoculum EM (efficient microorganisms) and litter (“Serapilheira”) as the most suitable to the proposed composting system, with the best composition of fungi and bacteria, as well as the development of prototypes with the necessary characteristics and controls for the production of a quality fertilizer, within the standards required by law and in the time and area conditions demanded by the national market.

Keywords: composting, waste management, organic waste, sustainability, accelerated composting, composting equipment, National Policy of Solid Waste

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

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

AMLURB – Autoridade Municipal de Limpeza Urbana

AS - Aterro Sanitário

C/N - Relação Carbono / Nitrogênio

EACH-USP - Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo

FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo

FSP - Faculdade de Saúde Pública

GEE - Gases do Efeito Estufa

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INPI – Instituto Nacional da Propriedade Intelectual

pH - Potencial hidrogeniônico

PGIRS – Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos

PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos

RO – Resíduo Orgânico

RSU - Resíduos Sólidos Urbanos

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Lixão do município de Barcarena, Pará, 2018	19
Figura 2: Pegada Ecológica global por componente, 1961-2010.....	22
Figura 3: Geração total e geração per capita de RSU no Brasil (2015 e 2016).....	24
Figura 4: Usina de Compostagem de São Francisco	28
Figura 5: Sistematização do processo de aeração da leira estática	33
Figura 6: Processo de compostagem com leira estática	33
Figura 7: Sistematização do processo de aeração da leira estática com aeração passiva.	34
Figura 8: Uso de canos para melhorar da aeração do processo de compostagem.....	34
Figura 9: Sistematização do processo de leira com aeração forçada.....	35
Figura 10: Processo de compostagem com aeração forçada.	35
Figura 11: Sistematização do processo de compostagem em tambor.....	36
Figura 12: Sistema de compostagem em tambor.....	36
Figura 13: Sistema de compostagem em tambor adaptado.....	37
Figura 14 Sistematização do processo de compostagem em container.....	37
Figura 15: Etapas de processo de compostagem e monitoramento	41
Figura 16: Granulometria do RO	42
Figura 17: Pesagem do RO em balança eletrônica digital.....	42
Figura 18: Homogeneização do alimento com serragem	43
Figura 19: a) Pesagem da Serapilheira; b) Adição da serragem a mistura de resíduo orgânico e Serapilheira.....	47
Figura 20: Preparo dos microrganismos eficientes da floresta	49
Figura 21: Preparo dos microrganismos eficientes a partir da água do arroz cru fermentada com leite.....	50
Figura 22: Materiais utilizados para o preparo do Bokashi.....	52
Figura 23: Acelerador de compostagem comercial Embiotic®.....	54
Figura 24: Caixas plásticas com instalação de lâmpada, cooler, placas de isopor e tela	58
Figura 25: Bombonas horizontal, com sistema de pás, e vertical, com sistema de aeração forçada	61
Figura 26: Protótipos de isopor automatizados	62
Figura 27: Protótipos em caixa plástica automatizada	63
Figura 28: Equipamento de compostagem de pequeno porte	64
Figura 29: Equipamento de compostagem movido a energia solar	65
Figura 30: Aspecto do composto final, 15 dias após início da maturação, em equipamento sem aeração forçada	66
Figura 31: Aspecto do composto final, 15 dias após início da maturação, em equipamentos com aeração forçada	66
Figura 32: Equipamentos de tamanho médio.....	67
Figura 33: Equipamentos de tamanho grande	67
Figura 34 Aspecto do composto final, 16 dias após início da maturação, em equipamentos sem aeração forçada	68
Figura 35: Aspecto do composto final, 16 dias após início da maturação, em equipamentos com aeração forçada	68
Figura 36: Variação de temperatura, em equipamento pequeno (C1) e médio (C2), com inóculo EM leite	69

Figura 37: Variação de temperatura, em equipamento pequeno (C1) e médio (C2), com inóculo EM arroz.....	69
Figura 38: Aspecto do composto final dos equipamentos sem aeração forçada.....	70
Figura 39 Aspecto do composto final dos equipamentos com aeração forçada.....	70
Figura 40: Variação de temperatura do composto nos equipamentos médios	71
Figura 41: Variação de temperatura do composto nos equipamentos grandes, com e sem aeração forçada.....	71
Figura 42: Aspecto do composto final, 15 dias após início da maturação.....	72
Figura 43: Variação da temperatura do composto utilizando o Embiotic®.....	72
Figura 44: Aspecto do composto após o término da fase de alimentação diária.	74
Figura 45: Aspecto do composto final, 15 dias após início da maturação.....	75
Figura 46: Variação da temperatura do composto em todos os equipamentos com aeração forçada, sem (1C, 2C e 3C) ou com (4C, 5C, 6C e 7C) adição do inóculo Microorganismo Eficiente + bokashi.....	75
Figura 47: Aspecto do composto final com Serapilheira, 15 dias após início da maturação. a) C1 1C; b) C1 2C; c) C1 3C; d) C1 4C; e) C1 5C; f) C1 6C.....	76
Figura 48: Variação da temperatura do composto com o inóculo Serapilheira, ao longo do tempo	77
Figura 49: Aspecto do composto final com inoculo EM (novo), 15 dias após início da maturação	78
Figura 50: Variação da temperatura do composto utilizando o inóculo EM	78
Figura 51: Concentração de microrganismos por inóculo	79
Figura 52: Concentração de microrganismos ao longo do processo de compostagem	82
Figura 53: Liberação do CO₂ ao longo do ensaio	83
Figura 54: Resultado final da liberação de CO₂ para cada microcosmo.....	83
Figura 55: Protótipo de bombona plástica vertical, sem aquecimento e com aeração forçada ...	86
Figura 56: Protótipo de bombonas plástica horizontal, sem aquecimento e sem aeração forçada.	86
Figura 57: Variação da temperatura dos compostos nos equipamentos de média escala	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características dos resíduos sólidos urbanos por tipo, componente e fonte.....	24
Tabela 2: Dados da coleta e destinação de resíduos RSU, no Brasil, no ano 2015	25
Tabela 3: Composição gravimétrica dos RSU coletados no Brasil, em 2012.	25
Tabela 4: Especificações dos Fertilizantes Orgânicos Mistos e Compostos.	32
Tabela 5: Comparação de técnicas de compostagem.	38
Tabela 6: Parâmetros de compostagem e suas conformações ideais	41
Tabela 7: Ensaios realizados em equipamentos de pequena e média escala	45
Tabela 8: Equipamentos utilizados em cada Ensaio com o inóculo Serapilheira.....	46
Tabela 9: Caracterização dos Ensaios 1, 3 e 4, com o inóculo Serapilheira.....	47
Tabela 10: Caracterização dos Ensaios 2 e 5, com o inóculo Serapilheira.....	48
Tabela 11: Caracterização do Ensaio 6 com o inóculo Serapilheira.....	48
Tabela 12: Equipamentos utilizados em cada Ensaio com o EM como inóculo.	50
Tabela 13: Tipo de EM e concentrações utilizadas.	51
Tabela 14: Caracterização dos Ensaios 7 e 9 com o inóculo EM.	51
Tabela 15: Caracterização dos Ensaios 8 e 10 com o inóculo EM.	51
Tabela 16: Equipamentos utilizados em cada Ensaio com o inóculo Bokashi.	53
Tabela 17: Concentrações de Bokashi utilizadas,.....	53
Tabela 18: Caracterização dos Ensaios 11 e 13, com o inóculo Bokashi.	53
Tabela 19: Caracterização dos Ensaios 12 e 14, com o inóculo Bokashi.	54
Tabela 20: Equipamentos utilizados em cada Ensaio com o inóculo Embiotic®.	55
Tabela 21: Concentrações de Embiotic® utilizadas.....	55
Tabela 22: Caracterização dos Ensaios 15 e 16, com o inóculo Embiotic®.	55
Tabela 23: Caracterização dos Ensaios 17, 18 e 19 com o inóculo Embiotic®	56
Tabela 24: Equipamentos utilizados em cada Ensaio com o inóculo EM + Bokashi.	56
Tabela 25: Concentrações de EM + Bokashi utilizadas.....	56
Tabela 26: Caracterização dos Ensaios, com o inóculo EM + Bokashi.	57
Tabela 27: Equipamentos utilizados em cada Ensaio, com o inóculo Serapilheira (novo).....	58
Tabela 28: Caracterização dos ensaios 22 e 23, com o inóculo Serapilheira (novo).....	59
Tabela 29: Equipamentos utilizados em cada Ensaio com o inóculo EM (novo).	59
Tabela 30: Caracterização dos Ensaios 24 e 25, com o inóculo EM (novo).	60
Tabela 31: Caracterização dos Ensaios 1 e 2, com o inóculo Serapilheira.....	62
Tabela 32: Resultados do levantamento de patentes realizado no INPI.	63
Tabela 33: Resultados do levantamento de patentes realizado no Espacenet.	64
Tabela 34: Volume de percolado retirado em cada equipamento ao longo da fase de alimentação diária.....	73
Tabela 35: Amostras enviadas para caracterização microbiológica	80
Tabela 36: Amostras e resultados das análises do teor de umidade e pH	84
Tabela 37: Relação entre o teor de carbono e nitrogênio das amostras	85
Tabela 38: Análise comparativa dos diferentes inóculos	88

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
2. PROBLEMATIZAÇÃO DA PESQUISA	18
3. OBJETIVOS	21
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
4.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	22
4.2 COMPOSTAGEM	26
4.3 ACELERADORES DE COMPOSTAGEM	39
5. METODOLOGIA.....	40
5.1 COMPOSTAGEM EM EQUIPAMENTOS DE PEQUENA ESCALA.....	46
5.2 ENSAIOS FÍSICOS	60
5.3 ENSAIOS MICROBIOLÓGICOS	60
5.4 ENSAIOS QUÍMICOS	60
5.5 COMPOSTAGEM EM EQUIPAMENTOS DE MÉDIA ESCALA	61
6. RESULTADOS	62
6.1 DIFERENTES MODELOS DE EQUIPAMENTO DE COMPOSTAGEM DE PEQUENO E MÉDIO PORTE	63
6.2 COMPOSTAGEM EM EQUIPAMENTOS DE PEQUENA ESCALA.....	65
6.2.1 Ensaio com inóculo Serapilheira.....	65
6.2.2 Ensaio com inóculo EM.....	67
6.2.3 Ensaio com inóculo Bokashi.....	69
6.2.4 Ensaio com inóculo Embiotic®.....	71
6.2.5 Ensaio com inóculo EM + Bokashi	73
6.2.6 Ensaio com inóculo Serapilheira (novo)	76
6.3 PARÂMETROS DO PROCESSO DE COMPOSTAGEM	78
6.3.1 Análises biológicas.....	79
6.3.2 Acompanhamento da respiração microbiana	83
6.3.3 Análises físicas: teor de umidade e pH	84
6.3.4 Análises químicas: teores de carbono, nitrogênio, hidrogênio e enxofre	85
6.4 COMPOSTAGEM EM EQUIPAMENTOS DE MÉDIA ESCALA	86
6.4.1 Ensaio com inóculo Serapilheira.....	86
6.5 AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE OS INÓCULOS.....	87
8. CONCLUSÕES:.....	89
9. REFERÊNCIAS	91

1. INTRODUÇÃO

Após vinte e um anos de tramitação em processo legislativo, a Lei da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) foi aprovada em 2 de agosto de 2010. A primeira proposta entendida como iniciativa para a elaboração da PNRS foi o Projeto de Lei do Senado Federal 354/89, que dispunha sobre o acondicionamento, coleta, tratamento, transporte e disposição final de resíduos de saúde (MMA, 2018).

A PNRS foi um marco no setor por tratar todos os tipos de resíduos sólidos e definir diretrizes, princípios e instrumentos fundamentais ao tema, como a não geração, redução, reutilização, reciclagem e disposição final dos resíduos, ciclo de vida do produto e logística reversa (BRASIL, 2010).

Na PNRS foi estabelecida a responsabilidade compartilhada na destinação dos resíduos, na qual comerciantes, fabricantes, importadores, distribuidores, cidadãos, setor privado e os órgãos governamentais possuem funções específicas no manejo e controle adequado dos resíduos sólidos. Em diversos países, como Alemanha, Dinamarca, Suécia e Holanda, é aplicado o princípio da Responsabilidade Estendida do Produtor (REP) (STENSTRÖM, 2004). A REP é um conceito onde os fabricantes e importadores de produtos são responsáveis pelos impactos ambientais de seus produtos e embalagens ao longo do ciclo de vida, incluindo os impactos inerentes ao uso, reaproveitamento e disposição final (OECD, 2018). A REP transfere a responsabilidade da gestão de resíduos do governo para o setor privado, obrigando produtores, importadores e/ou vendedores a internalizar os custos de gerenciamento de resíduos nos preços de seus produtos (HANISCH, 2000).

Além disto, a PNRS estabeleceu como meta, em seu Art. 54, “A disposição final ambientalmente adequada de rejeitos deverá ser implantada em até 4 anos”. Ou seja, projetou-se o fim dos “lixões” até meados de 2014. Passados quase 30 anos do debate sobre a gestão de resíduos, apenas 3,4% dos resíduos coletados no país são encaminhados para unidades de triagem e de compostagem (SNIS, 2016).

Em 2016, aproximadamente 30 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos, ou 41% do total gerado no país, foram dispostos inadequadamente em lixões, terrenos baldios ou aterros controlados (ABRELPE, 2016, IPEA, 2012). Este lançamento contribui de forma significativa com o agravamento de riscos à saúde humana, especialmente pela precariedade das condições sanitárias e propensão à proliferação de vetores de doenças infecciosas e zoonoses destes locais.

A cartilha "Lixo e Saúde", da Fundação Nacional da Saúde (FUNASA, 2013), apresenta os cuidados para a disposição correta dos resíduos e as diversas doenças associadas aos resíduos sólidos e seus vetores, como: mosca causadora da febre tifoide, cólera, amebíase, diarreia, giardíase e ascaridíase; barata causadora da febre tifóide, cólera e giardíase (verme);

mosquito causador da leishmaniose, febre amarela, dengue e malária; e ratos causadores da leptospirose e peste bubônica.

Neste aspecto, em relação ao cólera, a FUNASA (Guia de Vigilância Epidemiológica, vol. I, p. 165 e 173), aponta que:

"... em algumas áreas, as condições socioeconômicas e ambientais favorecem a instalação e rápida disseminação do Vibrio cholerae. Assim, a deficiência do abastecimento de água tratada, destino inadequado dos dejetos, alta densidade populacional, carências de habitação, higiene, alimentação, educação, favorecem a ocorrência da doença". Mais adiante, observa que "o principal instrumento para o controle do cólera é prover as populações sob risco, de adequada infraestrutura de saneamento (água, esgotamento sanitário e coleta e disposição de lixo) ".

Segundo a Organização Mundial de Saúde, 870.000 de mortes foram causadas por consumo de água imprópria, afetando principalmente crianças menores de 5 anos, em 2016. Sendo que, um dos fatores de poluição das águas é a disposição inadequada de resíduos sólidos (WHS,2018).

Outro grande problema do não reaproveitamento dos resíduos é a necessidade de alocação de grandes espaços para a sua disposição final. Entre 1974 e 2007, no município de São Paulo, foram demandados 2,3 milhões de metros quadrados de território para dispor quase 42 milhões de toneladas de resíduos. Os resíduos orgânicos coletados, transportados e dispostos nesses aterros, encerrados e em operação, são responsáveis pela emissão de cerca de 14% dos gases de efeito estufa (GEE) emitidos no município (PMSP, 2011).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos cita ainda a necessidade de implantação, “de sistemas de compostagem para resíduos sólidos orgânicos e articulação com os agentes econômicos e sociais formas de utilização do composto produzido”. Conforme as definições de reciclagem, os processos que promovem a transformação de resíduos orgânicos, compostagem ou biodigestão, também podem ser entendidos como processos de reciclagem. Desta forma, resíduos orgânicos não devem ser considerados como rejeitos, e esforços para promover sua reciclagem devem estar presentes nas estratégias de gestão de resíduos em qualquer escala, seja domiciliar, comunitária, institucional, industrial ou municipal.

No Brasil, cerca de 51,4% da composição dos resíduos sólidos urbanos é matéria orgânica, porém recicla-se apenas 0,8% do resíduo gerado (IPEA, 2012) e este índice tem se mantido estável nos últimos anos (ABRELPE, 2016), implicando num alto desperdício de recursos ambientais e financeiros.

Os resultados da análise de caracterização do resíduo gerado no município de São Paulo não são muito diferentes do Brasil, no qual comprova-se a predominância da fração orgânica

– na média da cidade, 51% são resíduos compostáveis ou biodegradáveis (6.300 toneladas por dia), 35% são resíduos secos recicláveis e 14% são rejeitos (PGIRS, 2014). Em 2012, a geração média “per capita” de resíduos domiciliares em São Paulo foi de 1,1 Kg por habitante por dia (PGIRS, 2014).

No município de São Paulo, o serviço público de coleta não atende aos grandes geradores de resíduos sólidos, que respondem por um volume superior a 200 litros/dia de resíduos sólidos urbanos, ou quando se tratar de condomínios comerciais e mistos (empresariais e residenciais) geradores de volume superior a 1.000 litros/dia (AMLURB, 2018). Existem, atualmente, cerca de 8 mil grandes geradores de resíduos cadastrados na cidade (PGIRS, 2014). Por outro lado, diversas cidades já responsabilizam os grandes geradores pela destinação correta dos seus resíduos, como por exemplo, Santos, que deu o prazo até junho de 2017 para as empresas que geram volume superior a 200 litros/dia de resíduos sólidos urbanos se adequarem e contratarem empresas para coleta de seus resíduos.

Para a recuperação dos resíduos orgânicos, o Plano de Gestão Integrado de Resíduos Sólidos (PGIRS, 2014) do município de São Paulo prevê, a partir de 2014, a instalação de 8 centrais de pequeno porte (50 t/dia cada) e, em grandes áreas, a instalação de centrais de processamento da coleta seletiva de resíduos orgânicos (4 unidades, 2.400 t/dia) além da instalação de unidades de tratamento mecânico biológico (3 unidades, 1.900 toneladas por dia) (PGIRS, 2014). Os resíduos orgânicos não dispostos para a coleta seletiva específica, seriam conduzidos aos Ecoparques, para Tratamento Mecânico Biológico e sua recuperação.

Mesmo com a implementação e a utilização de 100% da capacidade das unidades de compostagem e biodigestão, que está prevista para 2023, o município conseguirá processar apenas 4.700 toneladas de resíduos orgânicos, das 6.300 toneladas gerados diariamente (PGIRS, 2014). Portanto, diante das mais de 1.300 toneladas por dia de resíduos orgânicos domiciliares, que não serão tratados pela prefeitura diariamente, somados aos resíduos orgânicos dos mais de 8.000 grandes geradores, torna-se de fundamental importância a busca por alternativas tecnológicas de baixo custo e descentralizadas, que possam ser utilizadas e replicadas “in loco” pelos grandes geradores de resíduos orgânicos em um contexto urbano.

Dentre as alternativas existentes, os casos que utilizam a compostagem por meio de leiras têm ganhado destaque. O estudo sobre compostagem realizado pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e o projeto Revolução dos Baldinhos, também realizado em Florianópolis, são referências para o Ministério do Meio Ambiente e comprovaram que o sistema de compostagem acelerada, com leiras estáticas, reduz a incidência de ratos, baratas e demais vetores de doença, gerando pouco ou quase nenhum percolato / chorume, devido à atividade em alta temperatura, boa aeração e adição de carbono¹.

¹ Fundo Nacional do Meio Ambiente e o Fundo Socioambiental Caixa lançaram o Edital nº 01/2017, para apoiar municípios ou consórcios públicos intermunicipais, no valor de R\$ 500.000 à R\$ 1.000.000, para desenvolverem projetos de compostagem (<http://www.mma.gov.br/apoio-a-projetos/fundo-nacional-do-meio-ambiente/item/11344>)

Outro exemplo de compostagem a céu aberto, com o uso de arquitetura (aeração) e aceleradores de compostagem é o Pátio de Compostagem da Lapa, São Paulo. Antes do projeto de compostagem, o pátio era local para depósito de entulho, carros antigos e materiais inservíveis para a prefeitura, que apresentavam focos de dengue, ratos e outros vetores de doença. Ao apresentar o projeto do Pátio de Compostagem, muitos foram reticentes, por acreditarem que a compostagem iria agravar ainda mais as condições sanitárias do local. O Pátio de Compostagem foi inaugurado em dezembro de 2015 e hoje é referência para diversas cidades e eliminou a presença de ratos e focos de dengue no local, mesmo estando às margens do Rio Tietê. No entanto, esse método requer um espaço relativamente amplo, a depender da quantidade de resíduos orgânicos gerados, o que constitui uma limitante para sua adoção, além de se estabelecer de forma centralizada, ou seja, os resíduos orgânicos precisam ser transportados até essas centrais de compostagem.

Apesar de existir uma vasta literatura sobre a técnica de compostagem, poucos estudos são encontrados com o detalhamento microbiológico e prático do uso e produção de grupos de fungos, bactérias e leveduras utilizados na compostagem em equipamentos ou recipientes fechados. Neste cenário, essa dissertação surge como uma oportunidade de se avaliar diferentes técnicas de compostagem, o uso de microorganismos e equipamentos para acelerar este processo, além do desenvolvimento de protótipos e sua viabilidade técnica para o mercado atual dos grandes geradores.

Esta pesquisa e testes realizados são parte integrante do projeto FAPESP “Valorização de resíduos sólidos orgânicos para grandes geradores: avaliação da viabilidade técnica”, aprovado por meio do Programa Pesquisa Inovativa em Pequenas Empresas (PIPE). As atividades referentes à pesquisa foram realizadas em conjunto pela empresa Eccaplan Consultoria em Desenvolvimento Sustentável e o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT).

2. PROBLEMATIZAÇÃO DA PESQUISA

No Brasil, em 2010, a Lei da Política Nacional de Resíduos Sólidos foi aprovada, sendo o principal marco legal com relação à questão dos resíduos no país. Apesar de trazer em seus artigos definições e diretrizes, princípios e instrumentos fundamentais ao tema, como a não geração, redução, reutilização, reciclagem e disposição final dos resíduos, ciclo de vida do produto e logística reversa, ainda há muito a ser feito no contexto nacional para sua implementação.

A PNRS estabeleceu como meta, em seu Art. 54, “A disposição final ambientalmente adequada de rejeitos deverá ser implantada em até 4 anos”. Ou seja, projetou-se o fim dos “lixões” até meados de 2014. Em 2015 foi proposto o Projeto de Lei 2289/2015 solicitando a prorrogação do prazo de fim dos lixões para julho de 2018 a julho de 2021, conforme o tamanho da cidade. Em 2016, país contava com 1.203 lixões, praticamente o dobro do número de aterros sanitários (687 unidades) (SNIS, 2016). A disposição inadequada dos resíduos é

praticada por 3.331 municípios brasileiros (ABRELPE, 2016), como por exemplo no município de Barcarena (Figura 1).

Em 2016, aproximadamente 30 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos, ou 41% do total gerado no país, foram dispostos inadequadamente em lixões, terrenos baldios ou aterros controlados (ABRELPE, 2016, IPEA, 2012). Este lançamento contribui de forma significativa com o agravamento de riscos à saúde humana, especialmente pela precariedade das condições sanitárias e propensão à proliferação de vetores de doenças infecciosas e zoonoses destes locais, como exemplificado na Figura 1.

Considerando-se apenas os resíduos sólidos urbanos (RSU), o Brasil gera mais de 200.000 toneladas por dia ou pouco mais de 1 quilograma de resíduos é descartado diariamente por pessoa (ABRELPE, 2016). Só no município de São Paulo são gerados, diariamente, 12.378 toneladas de RSU ou 1,1 quilo por habitante por dia. Deste montante, em média, 51% é constituída de resíduos orgânicos, que sistematicamente vão parar em aterro sanitário (PGIRS, 2014).

Figura 1: Lixão do município de Barcarena, Pará, 2018

Crédito: autor, 2018.

Das 6.313 toneladas de resíduos orgânicos gerados diariamente no município de São Paulo (PGRIS, 2014), a usina de compostagem da Lapa, única unidade em operação no município, tem capacidade de compostar 9 toneladas de resíduos orgânicos por dia, sendo 6 toneladas de resíduos de feiras livres (frutas, verduras e legumes) e 3 toneladas de poda triturada e palha (CCAC MSWI, 2016).

Desta forma, o município de São Paulo composta menos de 0,1% do seu resíduo orgânico, o que não é muito diferente do resto do Brasil que apresenta apenas 67 pátios ou usinas de compostagem (SNIS, 2016).

Impactos reconhecidos do não aproveitamento desses resíduos vão desde o esgotamento dos aterros sanitários existentes, alocação de espaço para sua deposição, geração de gases de efeito estufa decorrentes do transporte e da decomposição do material e diversas enfermidades e agravos associados à disposição inadequada de resíduos sólidos. Além disso, deixa-se de incorporar à terra os nutrientes dos resíduos orgânicos e contribuir com a mitigação das mudanças climáticas, ao não incorporar mais carbono ao solo.

No município de São Paulo mais de 8.000 grandes geradores de resíduos, empresas que geram um volume superior a 200 litros de resíduos por dia (PGRIS, 2014) e que são responsáveis pelo gerenciamento de seus resíduos e custo da destinação, estão cadastrados na Autoridade Municipal de Limpeza Urbana (AMLURB).

Como forma de reduzir seu impacto ambiental, bem como os custos da gestão de resíduos, a separação de materiais recicláveis como alumínio, papelão, vidro, metais e alguns tipos de plásticos já é difundida entre parte dos grandes geradores. No entanto, os recicláveis secos representam aproximadamente 30% em peso dos RSU, enquanto que os orgânicos mais de 51%. Outro aspecto a considerar é que há poucos casos conhecidos do uso da reciclagem de resíduos orgânicos “in loco” por tais geradores, sendo constatado que fazem parte dos impeditivos dessa adoção a falta de tecnologia de baixo custo, compacta, rápida e de fácil uso para a destinação dos resíduos orgânicos. Neste contexto, a compostagem assume um papel fundamental na gestão adequada dos resíduos orgânicos.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar a viabilidade técnica de sistemas compactos de compostagem para grandes geradores de resíduos sólidos urbanos.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Avaliar parâmetros físico-químicos do processo de compostagem.
2. Testar diferentes tipos de inóculos e verificar qual é a melhor combinação de microrganismos que resulta em um composto de melhor qualidade e com menor tempo de processo.
3. Avaliar conexão do levantamento de fatores correlatos à compostagem versus seus estudos de caso
4. Construir protótipos para avaliar diferentes parâmetros de compostagem.
5. Construir um protótipo de composteira compacta de simples produção, operação e manutenção, para uso em grandes geradores, sendo essas instituições urbanas que geram resíduos acima de 200 L/dia.
6. Montar o sistema automatizado composto por um controle operacional de temperatura, mistura e fluxo de ar, com baixo consumo de energia elétrica.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

O modelo de desenvolvimento das cidades, muitas vezes baseado na exploração não sustentável dos recursos naturais, provoca o declínio quantitativo de espécies de fauna e flora numa velocidade superior à capacidade da Terra de se regenerar. Utilizam-se cerca de 50% a mais do que é disponível em recursos naturais, ou seja, precisa-se de um planeta e meio para sustentar nosso estilo de vida atual (Global Footprint Network, 2014). Pode-se dizer que esta é uma forma irracional de exploração da natureza, que gera o esgotamento do capital natural mais rápido do que sua capacidade de renovação. Na Figura 2, o limite de regeneração da Terra está representado pela linha paralela ao eixo horizontal de valor 1, o qual foi ultrapassado na década de 1970.

Figura 2: Pegada Ecológica global por componente, 1961-2010

Fonte: Global Footprint Network, 2014

A Pegada Ecológica inclui aspectos do consumo de recursos e da geração de resíduos para os quais a Terra tem capacidade regenerativa (Global Footprint Network, 2014). Dessa forma ela mensura a pressão que as populações incidem no planeta ao explorarem os recursos naturais, diretamente relacionados à produção de bens de consumo. De modo geral, sociedades industrializadas, ou seus cidadãos, necessitam de mais espaços do que sociedades menos industrializadas. Suas pegadas são maiores pois, ao utilizarem recursos de todas as partes do mundo, afetam locais cada vez mais distantes, explorando essas áreas ou causando impactos por conta da geração de resíduos, consumo de biodiversidade e emissões de gases de efeito estufa.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos compartilha desta premissa e preocupação com o consumo de recursos naturais, ao colocar dentre os seus objetivos, e em sequência de prioridade, os princípios da “não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos”.

A crescente urbanização e consumo de bens industrializados tende a dobrar o volume anual de resíduos sólidos urbanos de 2015 à 2025 em âmbito global – passando de 1,3 bilhões de toneladas para 2,6 bilhões de toneladas por ano – desafiando a gestão da saúde pública e ambiental em cidades do mundo (Worldwhatch Institute, 2012).

O sistema econômico atual é linear e aberto, baseado na extração dos recursos naturais, manufatura ou beneficiamento, comercialização, uso e descarte. Este modelo tem se mostrado insustentável, pois rompe os ciclos naturais de transformação e decomposição dos materiais que deveriam se reintegrar de forma natural pela ação de microorganismos decompositores. A quebra deste ciclo é causada, principalmente, pela atual composição dos resíduos, cada vez mais complexos formados, em grande parte, por materiais que não são absorvidos naturalmente pelo meio, como também pela grande quantidade de resíduos gerados. Logo, quantidade e complexidade dos RSU são fatores determinantes de sua não degradação.

Cada vez mais, os resíduos são gerados em grandes quantidades, com composição variada e a introdução de moléculas produzidas sinteticamente pelo homem, o que por um lado provoca uma evolução sem precedentes nos padrões de consumo, por outro, resulta em um efeito avassalador no seu tratamento e disposição final, exigindo condições especiais de aterramento ou tratamento. Além da composição, deve-se ainda levar em conta o grau de periculosidade e toxicidade. No caso dos resíduos sólidos urbanos, mesmo sendo definidos como classe II (não inertes) pela NBR 10004 (ABNT, 1987), podem eventualmente produzir percolados potencialmente poluentes, trazendo prejuízos ambientais e sanitários.

Os resíduos sólidos urbanos são um complexo emaranhado de tipos, composições e fontes de geração, como mostra a Tabela 1, necessitando de gerenciamento específico para cada fluxo, que implica em disposições e/ou tratamentos diferenciados.

Tabela 1: Características dos resíduos sólidos urbanos por tipo, componente e fonte.

Tipo	Componente	Fontes Primárias
Resíduos Orgânicos	Resíduos de alimentos e de supermercados	Domicílios, mercearias, restaurantes, supermercados, feiras livres
Resíduos de Jardinagem	Resíduos de poda e jardinagem	Parques, jardins, domicílios
Animais Mortos	Cães, gatos, cavalos e outros	Ruas, clínicas veterinárias
Resíduos de Limpeza de Ruas	Resíduos de varredura, pó, folhas, conteúdos de lixeiras	Ruas e logradouros públicos municipais
Resíduos de Construção de demolição	Sobras de madeiras, canos de plásticos, tubos, blocos de concreto e argamassa	Locais de demolição, reformas e construções de pequenos geradores
Entulho	Móveis, madeiras, restos de construção, materiais plásticos	Domicílios, centros comerciais

Fonte: Modificado pelo autor.

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2016) em 2016 no Brasil, foi gerado aproximadamente 214 mil toneladas de RSU por dia. Esse montante corresponde a aproximadamente 78,3 milhões de toneladas no ano. Desse total de RSU gerados, estima-se que 91% foram coletados. Os RSUs coletados tiveram como destino: 58,4% aterros sanitários, 24,2% aterros controlados e 17,4% lixões (ABRELPE, 2016). Na Figura 3 é possível, comparar a geração de RSU produzida e coletada em 2015 e 2016, e os índices “per capita” da geração e da coleta de resíduos no Brasil, no mesmo período.

Figura 3: Geração total e geração per capita de RSU no Brasil (2015 e 2016)

Fonte: ABRELPE, 2016.

Entre as duas principais referências de dados sobre a coleta e destinação dos resíduos há algumas diferenças nos valores apresentados, decorrentes das metodologias utilizadas. A Tabela 2 apresenta comparação entre os dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2016) e ABRELPE (2016) para a quantidade de RSU coletado diariamente no Brasil e o destino, no ano de 2016.

Tabela 2: Dados da coleta e destinação de resíduos RSU, no Brasil, no ano 2015

Referência	SNIS, 2016	ABRELPE, 2016
Aterro sanitários (%)	59,0	58,4
Aterro controlados (%)	9,6	24,2
Lixões (%)	10,3	17,4
Unidades de triagem e compostagem (%)	3,4	-
Sem informação (%)	17,7	-
Resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil (mil toneladas/dia)	161,4	198,8

Fonte: SNIS, 2016 e ABRELPE, 2016.

A respeito da composição gravimétrica dos RSU coletados no Brasil, conforme dados de ABRELPE (2014), é possível verificar que a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU) corresponde a mais de 50%, conforme indicado na Tabela 3.

Tabela 3: Composição gravimétrica dos RSU coletados no Brasil, em 2012.

Material	Participação (%)	Quantidade (t/ano)
Matéria Orgânica	51,4	29.072.794
Outros	16,7	9.445.830
Plástico	13,5	7.635.851
Papel, Papelão e Tetra Pak	13,1	7.409.603
Metais	2,9	1.640.294
Vidro	2,4	1.357.484
TOTAL	100,0	56.561.856

Fonte: ABRELPE, 2014.

O tratamento da parcela orgânica dos resíduos sólidos urbanos pode ser efetuado por meio de processos para se reduzir a sua quantidade ou o potencial poluidor, evitando o descarte inadequado, transformando-o em material inerte ou biologicamente estável. Entretanto, sempre o mais indicado é segregar o resíduo na fonte geradora, desenvolvendo ações para seguir a hierarquia de resíduos: não geração, redução, reutilização e reciclagem dos materiais secos (embalagens) e úmidos (orgânicos), valorização e disposição final.

4.2 COMPOSTAGEM

Nos últimos anos diversos países têm criado políticas e regulamentações para que comunidades atinjam melhores níveis de reciclagem e reduzam o desperdício e a disposição de resíduos em aterros ou lixões. Para se atender tais compromissos faz-se necessário a implementação de planos de gestão integrada de resíduos sólidos, que contemplem não apenas ações de educação ambiental, envolvimento da comunidade e empresas, mas também políticas públicas e mudanças estruturantes, como a segregação na fonte geradora e a coleta pública em três frações: embalagens ou recicláveis, orgânicos e rejeito.

A fração orgânica, composta por frutas, verduras, legumes e sobras de alimentos, representa a maior parcela dos RSU (IPEA, 2012, ABRELPE, 2016), sendo o seu tratamento e destinação correta o principal desafio dos gestores públicos, principalmente por este material ter pouco valor agregado, quando comparado com alumínio, papelão e plástico.

Desta forma, a técnica de compostagem apresenta-se como alternativa de reciclagem de resíduos orgânicos com potencial de reduzir em até 50%, em volume, dos materiais destinados a aterros sanitários e lixões. A compostagem ainda é pouco explorada no Brasil (IPEA, 2012), apesar do seu processo ser relativamente simples e com vasta gama de aplicações, desde a escala domiciliar até a escala industrial, são diversas as técnicas, equipamentos e usos.

Além de se conhecer a teoria e prática da compostagem, o seu uso exige controle e acompanhamento, muitos projetos no Brasil foram abandonados principalmente devido a má gestão de resíduos adotada no município, incorporando ao processo uma grande taxa de contaminantes, gerando forte odor, saturação do processo e falta de mercado consumidor ou baixo valor pago pelo composto produzido.

A usina de compostagem da Vila Leopoldina, São Paulo, é um exemplo de processo de compostagem que foi encerrado. A usina iniciou suas atividades em 1974, em uma área de 54 mil m², para processar 800 toneladas diárias de resíduo orgânico (BARREIRA, 2006). Devido a problemas de poluição, causados por odores e disposição inadequada do resíduo proveniente de residências e feiras, a usina foi objeto de mais de 550 reclamações da população vizinha e 25 autuações da CETESB, tendo suas atividades encerradas em agosto de 2004.

A usina de compostagem do município de Barcarena, localizada na região do Baixo Tocantins, a nordeste do Estado do Pará, iniciou suas atividades em 1999, com um pátio de piso cimentado de 1.500 m² e capacidade de processar 10 toneladas diárias de resíduo orgânico (TEIXEIRA, 2000). O município não possui coleta seletiva e todo o resíduo coletado na cidade chega misturado na usina, exigindo grande esforço para a separação das embalagens e do resíduo orgânico, prejudicando a eficiência do processo e qualidade dos produtos finais, além de gerar uma grande quantidade de rejeito. De todo o RSU que chega à usina, em média, 45,45% é de matéria orgânica utilizada no processo de compostagem e 25,71% de materiais recicláveis (alumínio, papel, papelão, plástico e vidro) (TEIXEIRA,

2000). Com a finalização do apoio financeiro da ALBRAS e o apoio técnico da Embrapa a operação da usina foi encerrada, uma vez que o apoio da prefeitura e o recurso financeiro com a venda do composto não foram suficientes para manter o projeto.

O Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2018) tem buscado fomentar e disseminar boas práticas de compostagem. Em dezembro de 2012, em parceria com o Fundo Socioambiental da Caixa, divulgou o edital de compostagem, para destinar R\$ 10 milhões, para projetos municipais de R\$ 500 mil à R\$ 1 milhão. O edital teve grande repercussão, recebendo um total de 324 propostas vindas de todo o país, além de disseminar em seu conteúdo e na página do MMA práticas de compostagem bem sucedidas, como a Revolução dos Baldinhos, em Florianópolis, e o Pátio de Compostagem da Lapa, São Paulo.

O pátio de compostagem da Lapa, foi inaugurado em 2015 e está numa área de 3.000 m², às margens do Rio Tietê, na prefeitura regional da Lapa. A usina tem capacidade de compostar 9 toneladas de resíduos orgânicos por dia, sendo 6 toneladas de resíduos de feiras livres (frutas, verduras e legumes) e 3 toneladas de poda triturada e palha (CCAC MSWI, 2016). O projeto é operado pela INOVA, uma das empresas responsáveis pela coleta de resíduos na cidade, e recebe os resíduos de 386 feiras de ruas. A iniciativa foi criada para servir de referência para a instalação de diversos outros pátios de compostagem espalhados pela cidade, com capacidades de processar até 10 toneladas por dia de resíduo orgânico.

A associação da prática de compostagem com a promoção do uso do composto, em projetos de agricultura urbana e periurbana ou de apoio à agricultura familiar e floricultura, também são exemplos de sucesso na garantia da continuidade desta prática, fechando o ciclo da gestão dos resíduos orgânicos, agregando valor ao produto final e gerando receita recorrente.

No município de Tibagi, segundo maior município do Paraná, o programa Recicla Tibagi completou em maio deste ano nove anos de operação, sendo reconhecido nacionalmente pelo seu modelo de gestão de resíduos e compostagem. O programa gera renda a 94 associados da Associação de Catadores de Materiais Recicláveis de Tibagi (ACAMARTI), que hoje é responsável pela varrição, coleta e centro de triagem de embalagens e compostagem. O município gera aproximadamente 8 toneladas de resíduos, sendo 56% de resíduo orgânico, 28% recicláveis e 16% rejeito. Além da comercialização do composto produzido, a Associação agrega valor ao seu produto ao utilizar o composto na produção de mudas de flores. Em 2011, a Associação realizou a sua primeira venda de 2,5 mil mudas de flores à prefeitura.

A incorporação de composto ao solo geralmente resulta em um efeito positivo no crescimento e produção de uma ampla variedade de culturas, e na restauração das funções ecológicas e econômicas da terra (SHIRALIPOUR, 1992), além disso, diversos estudos tem mostrado a capacidade do uso do composto em absorver e incorporar carbono ao solo, contribuindo com a mitigação às mudanças climáticas (MUGICA, 2017). Referência em

programa de gestão integrada de resíduos sólidos e na implementação da cultura resíduo zero (“Zero Waste Program”), a cidade de São Francisco composta 650 toneladas de materiais (50% resíduo orgânico e 50% folhas e galhos) diariamente, que equivale a redução da emissão de 303 ton de dióxido de carbono equivalente² (MUGICA). A Figura 4 é um exemplo de usina de compostagem de São Francisco.

Figura 4: Usina de Compostagem de São Francisco.

Crédito: Kevin Drew, coordenador do programa resíduo zero domiciliar.

4.2.1 Aspectos Físico-Químicos do Processo de Compostagem

A compostagem é o processo controlado de decomposição bioquímica da matéria orgânica por microrganismos (bactérias, fungos e actinomicetos), cujo resultado é o composto ou adubo orgânico (KIEHL, 1998). É um processo que pode ser observado naturalmente no ambiente, constituindo a degradação da matéria orgânica. Porém, técnicas foram desenvolvidas para obter, de forma mais rápida do que ocorre na natureza e parcialmente controlada, a estabilização de materiais de origem orgânica, cujo resultado, o composto / adubo orgânico, pode ser utilizado na agricultura de maneira a substituir a fertilização inorgânica (OLIVEIRA, 2008). A principal vantagem de se realizar a compostagem é alterar o destino do resíduo orgânico, que antes seria encaminhado para aterros sanitários, ou mais

² Cálculo realizado utilizando-se o EPA Waste Reduction Model (WARM) Version 14, [https://www.epa.gov/warm/versions-waste-reduction-model-warm#WARM Tool V14](https://www.epa.gov/warm/versions-waste-reduction-model-warm#WARM%20Tool%20V14)

gravemente a aterros controlados e lixões, intensificando problemas de saúde e contaminação do solo. O processo de compostagem representa apenas 1,6% de todo o RSU gerado e coletado no país (IPEA, 2012).

No entanto, a compostagem pode ser mais complexa do que aparenta, exigindo conhecimento técnico de seu processo para que o mesmo ocorra de maneira adequada. Quando o processo de compostagem se dá indevidamente, ou seja, sem se atentar para os parâmetros que o regem, pode ocorrer a digestão anaeróbia, quando, por falta de oxigênio disponível para os microrganismos decomporem o resíduo orgânico, ocorrem reações bioquímicas causadas por bactérias fermentativas, causando a formação de gás ácido sulfídrico e outros subprodutos contendo enxofre, com forte odor característico de ovo podre (KIEHL, 1998).

Segundo KIEHL (1998) as fases pelas quais a matéria-prima passa até ser decomposta totalmente podem ser resumidas em três: a primeira fase, chamada fitotóxica ou também termófila, é marcada pelo início da decomposição da matéria orgânica que se caracteriza pelo despreendimento de calor, vapor d'água e CO₂ e corresponde de 10 a 20 dias. Na segunda fase, chamada de semicura ou mesófila, a decomposição pouco progride e o material entra no estágio de bioestabilização, porém, ainda não apresenta as características e propriedades ideais de um composto orgânico. A terceira fase, denominada de maturação ou humificação é o estágio final da degradação quando ocorre a mineralização de determinados componentes da matéria orgânica e é quando o composto adquire as desejáveis propriedades físicas, químicas, físico-químicas e biológicas (KIEHL, 1998).

Uma característica fundamental para a compostagem é o tamanho das partículas de resíduo orgânico a ser decomposto que devem ser constituídos de partículas pequenas. Quanto menor for o tamanho das partículas, maior é a sua superfície específica e, portanto, mais facilmente o resíduo orgânico será degradado pelos microrganismos (OLIVEIRA, 2008). Para OLIVEIRA (2008), as partículas devem ter entre 1,3 cm e 7,6 cm, sendo que o ideal é que os materiais utilizados na compostagem não tenham dimensões superiores a 3 cm de diâmetro.

Relação Carbono / Nitrogênio

Outro parâmetro que deve ser analisado em ensaios de compostagem é a relação Carbono/Nitrogênio (C/N), considerada um fator limitante do processo, pois determina a taxa de decomposição do resíduo orgânico a ser degradado (KIEHL, 1998).

O intervalo de valores para C/N entre 25:1 e 35:1 é definido como ótimo para o processo de compostagem (OLIVEIRA, 2008). Valores mais elevados reduzem a velocidade de decomposição, uma vez que faltará nitrogênio para os microrganismos e o carbono, por sua vez, será emitido na forma de CO₂; por outro lado, a baixa concentração C/N induz perdas de nitrogênio na forma de amônia ou outro composto nitrogenado.

A perda de nitrogênio para o sistema deixa o ambiente anaeróbio, condição a qual não é favorável para o processo de compostagem. Para adequar a concentração de nitrogênio, deve-se utilizar compostos ricos em carbono, a fim de obedecer a relação C/N ideal para a compostagem. Os materiais ricos em carbonos podem ser denominados de agentes limitantes de nitrogênio. O agente limitante comumente utilizado para manter a relação C/N é a serragem.

A relação C/N constitui um parâmetro confiável para o acompanhamento da compostagem até se chegar ao produto acabado, humificado, no qual a relação deve estar próximo a uma média de 10:1 (KIEHL, 1998).

pH

Outro parâmetro fundamental para acompanhar o processo de compostagem é o pH apresentado pelo resíduo, que deve ser cuidadosamente controlado devido à sensibilidade microbiana, que atua durante o processo. A literatura sugere uma faixa de pH entre 6,5 e 8,0 como ótima para o processo de compostagem (KIEHL, 1998). No entanto, PEREIRA (1996), obteve em alguns de seus ensaios um composto com pH na faixa entre 4,5 a 9,5. Neste trabalho, consideramos o pH mínimo ideal como 6,0, como colocado pela Instrução Normativa SDA nº25, de 23 de julho de 2009 (MAPA, 2009), sobre as especificações dos fertilizantes orgânicos destinados à agricultura (IPT, 2017).

Umidade

No processo de decomposição da matéria orgânica, a umidade garante a atividade microbiológica. A umidade deve-se apresentar entre 50% e 70% (RODRIGUES et al, 2006), principalmente durante a fase inicial, pois é necessário que exista um adequado suprimento de água para promover o crescimento dos organismos biológicos envolvidos no processo e para que as reações bioquímicas ocorram adequadamente durante a compostagem (KIEHL, 1998). Valores acima do encontrado na literatura favorecem a anaerobiose, restringindo a difusão do oxigênio e resultando no apodrecimento do composto (KIEHL, 1998).

A umidade do processo de compostagem pode ser controlada com a capacidade de aeração do processo, que pode ser forçada ou natural, trabalhando-se a porosidade do composto e arquitetura do processo, sempre objetivando satisfazer a demanda microbiológica por oxigênio (PEREIRA, 1996).

A alta umidade e falta de oxigenação provocam a diminuição da velocidade de degradação da matéria orgânica e anaerobiose do processo, promovendo consequências indesejáveis, tais como: odores, atração de vetores e percolado (PEREIRA, 1996). Este problema pode ser resolvido com a adição de materiais absorventes, como palhas, serragens ou maravalhas.

Por outro lado, teores de umidade baixos, menores do que 40%, inibem a atividade microbiológica, diminuindo a taxa de estabilização (PEREIRA, 1996). Tal problema pode ser resolvido adicionando-se uniformemente água ao processo ou reduzir a adição de materiais absorventes.

Aeração

A aeração também é uma variável importante no processo de compostagem. LOPEZ-REAL (1990) define a compostagem como sendo um processo predominantemente aeróbio. Nesta condição, a decomposição ocorre mais rapidamente, com ausência de odor e atração de vetores, como moscas e outros insetos (KIEHL, 1998). A atividade apresentada pelos microrganismos ao longo do processo está diretamente ligada ao consumo de oxigênio, de maneira que, quanto maior a atividade microbiológica, maior será o consumo de oxigênio. Homogeneizar a mistura ao longo do processo proporciona a entrada de ar rico em oxigênio, além de liberar o gás carbônico gerado pela respiração dos microrganismos (KIEHL, 1998).

Um processo de compostagem mal conduzido pode levar a oxidação anaeróbia, acompanhada de putrefação, atração de moscas, roedores e mau cheiro eliminado na atmosfera, na forma de gás ácido sulfídrico e outros gases contendo enxofre, todos com cheiro de “ovo podre” (KIEHL, 1998). O odor desagradável pode ser reduzido por revolvimento da leira, ou por outro meio de aeração forçada.

A aeração é o fator mais importante a ser considerado, sendo que quanto mais úmidas estiverem as matérias-primas mais deficiente será sua oxigenação, determinando que providências sejam tomadas para reduzir a umidade.

Temperatura

O controle da temperatura é fator de extrema importância para a eficiência, tempo e eliminação de patógenos prejudiciais a saúde no processo de compostagem. A compostagem caracteriza-se por ser um processo termodinâmico exotérmico de degradação de resíduos orgânicos, podendo atingir temperaturas superiores a 80 °C (KIEHL, 1998). O desenvolvimento da temperatura está relacionado a vários fatores: materiais ricos em proteína, carga microbiana, baixa relação Carbono/Nitrogênio, umidade, aeração e granulometria.

Peneiramento

O peneiramento do composto final é recomendado para o seu uso em horta, jardinagem, produção de mudas e adubação de fundação ou adubação em cova. Para obtenção de composto com granulometria fina, deve-se peneirar o produto em peneira com malha de 2 a 5 mm. O rejeito da peneira, pode retornar ao processo de compostagem, sendo também útil para inocular microorganismos benéficos ao processo.

Composto

O composto deve atender às características definidas na Instrução Normativa SDA/MAPA 25/2009, sendo classificados conforme seu Artigo 2º, em:

- i. Classe “A”: fertilizante orgânico que, em sua produção, utiliza matéria-prima de origem vegetal, animal ou de processamentos da agroindústria, onde não sejam utilizados no processo, metais pesados tóxicos, elementos ou compostos orgânicos sintéticos potencialmente tóxicos, resultando em produto de utilização segura na agricultura;
- ii. Classe “B”: fertilizante orgânico que, em sua produção, utiliza matéria-prima oriunda de processamento da atividade industrial ou da agroindústria, onde, metais pesados tóxicos, elementos ou compostos orgânicos sintéticos potencialmente tóxicos são utilizados no processo, resultando em produto de utilização segura na agricultura;
- iii. Classe “C”: fertilizante orgânico que, em sua produção, utiliza qualquer quantidade de matéria-prima oriunda de lixo domiciliar, resultando em produto de utilização segura na agricultura; e
- iv. Classe “D”: fertilizante orgânico que, em sua produção, utiliza qualquer quantidade de matéria-prima oriunda do tratamento de despejos sanitários, resultando em produto de utilização segura na agricultura

Além disso, o composto deve apresentar as características indicadas na Tabela 4.

Tabela 4: Especificações dos Fertilizantes Orgânicos Mistos e Compostos.

Especificações	Misto/composto			
	Classe A	Classe B	Classe C	Classe D
Umidade (máx.)	50	50	50	70
N total (mín.)	0,5			
*Carbono orgânico (mín.)	15			
*CTC^(1,2)	Conforme declarado			
pH (mín.)	6,0	6,0	6,5	6,0
Relação C/N (máx.)	20			
*Relação CTC/C ⁽²⁾	Conforme declarado			
Outros nutrientes	Conforme declarado			

Fonte: Instrução Normativa SDA/MAPA nº 25/2009.

Valores expressos em base seca, umidade determinada a 65°C.

1) CTC - Capacidade de Troca Catiônica: quantidade total de cátions adsorvidos por unidade de massa, expresso em mmolc/kg.

2) É obrigatória a declaração no processo de registro de produto.

4.2.2 Técnicas de Compostagem

Pode-se trabalhar diferentes técnicas de compostagem variando-se os parâmetros de processo, conforme o cenário ou demanda do mercado. Não existe uma tecnologia que seja ideal para todas as demandas, porém existem práticas que se destacam em uma ou mais características como: tempo de processo, qualidade do composto, custo de manutenção, espaço necessário e mão-de-obra.

Dentre as técnicas mais difundida no Brasil e em diversos países pode-se destacar:

i. Leira estática: processo de compostagem em leira estática, com ventilação natural. O oxigênio é fornecido à massa de compostagem pela passagem do ar pela malha e espaços formados dentro da leira, com a palha, galhos e folhagens adicionados ao processo, como exemplificado nas Figuras 5 e 6. Esse processo requer homogeneidade do material para uma efetiva dissipação das altas temperaturas na fase ativa de degradação.

Figura 5: Sistematização do processo de aeração da leira estática

Fonte: École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Municipal Solid Waste Management in Developing Countries, 2017

Figura 6: Processo de compostagem com leira estática

Fonte: ZABALETA, Imanol, 2017.

ii. Leira estática com aeração passiva: processo de compostagem similar ao processo de leira estática, porém utiliza-se de tubos ou bambus para facilitar a circulação de ar, demandando menos esforço de homogeneização do processo, como exemplificado nas Figuras 7 e 8.

Figura 7: Sistematização do processo de aeração da leira estática com aeração passiva.

Fonte: École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Municipal Solid Waste Management in Developing Countries.

Figura 8: Uso de canos para melhorar da aeração do processo de compostagem.

Crédito: o autor, 2015. Parque Zoológico do município de São Paulo.

iii. Leira com aeração forçada: processo de compostagem com o uso de aeração forçada para aumentar a atividade microbológica e o consumo de oxigênio, acelerando a degradação do resíduo orgânico, exigindo menos espaço, quando comparado à leira estática com aeração natural, como demonstrado nas Figuras 9 e 10.

Figura 9: Sistematização do processo de leira com aeração forçada.

Fonte: École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Municipal Solid Waste Management in Developing Countries.

Figura 10: Processo de compostagem com aeração forçada.

Fonte: ZABALETA, Imanol, 2017.

iv. Compostagem em tambor ou equipamento fechado: processo de compostagem fechado e controlado, exigindo um investimento inicial maior, quando comparado às técnicas anteriores, porém exige menos espaço e tempo para realizar a compostagem, como demonstrado nas Figuras 11, 12 e 13. É o principal modelo utilizado em empresas e centros urbanos, pois com o controle ideal de todos os parâmetros de processo, principalmente aeração e temperatura, o processo de compostagem não gera odor ruim e percolado.

Figura 11: Sistematização do processo de compostagem em tambor.

Fonte: École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Municipal Solid Waste Management in Developing Countries.

Figura 12: Sistema de compostagem em tambor.

Fonte: Ecodrum Composter.

Figura 13: Sistema de compostagem em tambor adaptado.

Crédito: o autor.

v. Compostagem em container: processo de compostagem mais lento, devido a baixa aeração e atividade microbiana, como exemplificado na Figura 14. O processo exige pouca mão-de-obra e espaço, promovendo uma boa barreira para o ataque de roedores e animais. É comum o uso de minhocas neste processo, para acelerar a compostagem e melhorar a qualidade final do produto.

Figura 14 Sistematização do processo de compostagem em container.

Fonte: École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Municipal Solid Waste Management in Developing Countries.

Em resumo, a escolha da melhor técnica de compostagem pode ser selecionada ou desenvolvida conforme os parâmetros: investimento, manutenção, espaço, tempo e mão-de-obra. A Tabela 5 mostra as diferentes características operacionais e mercadológica dos cinco tipos de compostagem descritos anteriormente.

Ainda no Brasil a mão-de-obra é relativamente barata, quando comparada com o custo financeiro, social e ambiental de se destinar resíduos orgânicos para aterro sanitário. Desta forma, quando busca-se tratar os resíduos orgânicos localmente, para um volume inferior à 5 toneladas dia e tem-se área disponível, a leira estática e leira estática com aeração passiva tornam-se a melhor opção de tratamento dos resíduos orgânicos.

Para o tratamento de resíduos orgânicos em grande escala os modelos de aeração forçada e compostagem em tambor tornam-se mais atrativos. O modelo de tambor ainda é pouco desenvolvido e explorado no Brasil, exigindo maiores estudos de viabilidade técnica e financeira para o tipo de resíduo e custos do mercado local.

O modelo de compostagem em container exige um grande tempo de processo, sendo mais aplicado em escala domiciliar, proporcionando diversos benefícios, como: conscientização e educação ambiental, redução na geração de resíduos, tratamento na fonte dos resíduos orgânicos exigindo menor infraestrutura e impactos ambientais da coleta municipal etc.

Tabela 5: Comparação de técnicas de compostagem.

	Investimento	Manutenção	Espaço	Tempo	Mão-de-obra
•	•	•••••	•••	•••••
••	••	•••••	•••	••
••••	••••	•••	•	••
•••••	•••••	••	•	••
•••	••	••	•••••	••

Crédito: o autor. Adaptado do École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Municipal Solid Waste Management in Developing Countries

4.3 ACELERADORES DE COMPOSTAGEM

O processo de degradação dos resíduos orgânicos obtidos por meio da compostagem pode ser acelerado a partir do uso de inóculos que contém fungos e bactérias capazes de melhorar a qualidade do composto e a rapidez na qual este composto é obtido (HIGA e PARR, 1994).

A **serapilheira** corresponde a camada de terra constituída pela matéria orgânica morta (folhas, galhos, flores, frutos, resíduos de animais, entre outros), ou por processo de decomposição no solo com alto poder de transformação do mesmo (ANDRADE et al, 2003).

As leveduras são fungos que interagem com plantas, capturando substâncias liberadas. Os produtos resultantes de seu metabolismo são capazes de provocar atividade celular, ativando outros microrganismos no solo ou composto. Os actinomicetos são bactérias de crescimento filamentoso, muito presentes no solo, onde agem decompondo compostos orgânicos. Assim como as leveduras, produzem diversos bioativos benéficos tanto ao solo quanto a outros microrganismos (KIEHL, 1998).

Durante a fermentação realizada pelas bactérias lácticas, por sua vez, o produto final é o ácido láctico que ao ser liberado no ambiente controla alguns microrganismos nocivos, além de servir de nutriente para as plantas. Já as bactérias fototróficas (ou cianobactérias) utilizam substâncias excretadas pelas raízes das plantas para sintetizar bioativos que favorecem seu crescimento. Elas promovem o aumento das populações de outros microrganismos eficientes (HIGA e PARR, 1994).

Os **microrganismos eficientes (EM)** são organismos que vivem no solo naturalmente fértil, e recebem este nome pois encontram neste local o ambiente adequado para agirem. Os primeiros estudos dedicados aos EM, objetivando melhorar o uso da matéria orgânica na produção agrícola foram realizados na década de 70, onde um grupo de pesquisadores, comandado pelo professor Teruo Higa, confirmaram seu potencial na ciclagem da matéria orgânica. Nesta época, os pesquisadores procuraram coletar e analisar organismos de maneira que pudessem identificar a melhor combinação para o processo de decomposição do solo, chegando a um resultado satisfatório ao combinar leveduras, bactérias fototróficas, bactérias de ácido láctico e actinomicetos (KIEHL, 1998).

No processo de decomposição da matéria orgânica, o composto / matéria é reduzido, liberando compostos ao ambiente, como nutrientes e vitaminas, que servem de alimento para as colônias de microrganismos, inclusive o EM. É um sistema circular de degradação e alimentação benéfico para toda comunidade de animais, plantas e microrganismos presentes no solo (HIGA e WIDIDANA, 1991).

Já o **bokashi** é um composto orgânico concentrado, tendo como base os microrganismos eficientes como inoculante que, juntamente com outros compostos como matéria orgânica de origem animal e vegetal fareladas e balanceadas sob o processo de

fermentação láctica controlada, potencializam o solo, enriquecendo-o de nutrientes (HIGA e WIDIDANA, 1991). A união do bokashi com o EM promove um solo fértil, rico em nutrientes, sem qualquer adição de produtos químicos artificiais, como os fertilizantes industrializados. A ação do bokashi é promover o equilíbrio do solo, que, por sua vez irá melhorar suas condições físicas (proporcionando a formação de agregados, aumentando a capacidade do solo de armazenar água e drenar o excesso, minimizando os riscos de erosão) (EMBRAPA) e induzindo os microrganismos benéficos ao solo à decomposição da biomassa disponível, proporcionando a multiplicação rápida da microbiota do solo, além de potencializar a atuação e crescimento do EM devido a sua composição rica tanto de origem animal, quanto vegetal.

O **acelerador de mercado (Embiotic®)** é um acelerador de compostagem comercial constituído de bactérias produtoras do ácido láctico e leveduras, que atuam por meio da decomposição da matéria orgânica, produzindo um composto rico em nutrientes estabilizado em menor tempo e de melhor qualidade.

5. METODOLOGIA

A proposta de trabalho inicial no mestrado era focada em um sistema residencial para valorização de resíduos orgânicos por digestão anaeróbia. Como os testes iniciais e uma análise de mercado mostraram a inviabilidade deste tipo de processo, optou-se por dar continuidade a equipamentos para valorização de resíduos orgânicos, mas voltados à compostagem para médios e grandes geradores. Desta forma, esta dissertação foca no processo de compostagem descrito a seguir.

Foram realizados 27 ensaios, em duplicata ou triplicata, objetivando avaliar a eficiência do processo de compostagem em equipamentos de pequena, média e grande escala, utilizando-se diferentes materiais para a construção das composteiras, automação para controle da aeração e temperatura, e o uso de inóculos para acelerar o processo de degradação do resíduo orgânico.

Os parâmetros de processo são fundamentais para a decomposição ser realizada de forma ideal, a fim de se obter um composto orgânico de boa qualidade, rico em nutrientes e livre de microrganismos nocivos ao solo e às plantas. Na Tabela 6, a seguir, encontra-se o resumo dos parâmetros ideais para o processo de compostagem, que procurou-se atingir em todos os ensaios realizados.

Tabela 6: Parâmetros de compostagem e suas conformações ideais

Temperatura	Fase Mesofílica (35°C a 40 °C) Fase Termofílica (45°C a 65°C) Fase de Maturação: temperatura ambiente
pH	Início: aproximadamente 5 Final: entre 7 e 8
Umidade	Entre 50% e 70%
Aeração	Dependerá dos valores de umidade, temperatura e pH
Relação C/N	Durante o processo: 25/1 à 35/1 Após a maturação do composto final: 10/1

Os 25 testes realizados em equipamentos de pequena e média escala seguiram as etapas demonstradas na Figura 15, com variações na quantidade de alimento adicionado, tempo de alimentação e tempo de maturação, além das características de cada equipamento de compostagem utilizado. Foram realizados 2 testes em equipamentos de grande escala, totalizando os 27 ensaios.

Figura 15: Etapas de processo de compostagem e monitoramento

Os ensaios foram realizados diariamente (excetuando-se finais de semana e feriados). O resíduo orgânico utilizado nos ensaios foram as sobras do preparo do refeitório instalado nas dependências do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). O tipo de resíduo utilizado variou conforme cardápio do local.

O alimento coletado passou por uma triagem manual para separação dos resíduos, que não seriam utilizados, como cascas de frutas cítricas e proteína animal, conforme Figura 16. A amostra utilizada nos testes era predominante composta por verduras e cascas de frutas. Após

esse primeiro processo, o alimento foi cortado em pedaços menores e pesado em uma balança eletrônica digital (Figura 17).

Figura 16: Granulometria do RO

Crédito: o autor.

Figura 17: Pesagem do RO em balança eletrônica digital

Crédito: o autor.

O alimento ao ser disposto nos equipamentos foi homogeneizado com o composto que já se encontrava em decomposição, ou seja, o composto referente à alimentação de dias anteriores. A serragem foi misturada à alimentação diária, conforme mostrado na Figura 18a, e também utilizada para formar uma camada superficial em cada equipamento, inibindo a entrada de vetores (Figura 18b). Dependendo da umidade do composto, quantidade adicional de serragem foi incorporada ao composto, para reter o excesso de umidade do material.

Figura 18: Homogeneização do alimento com serragem

Crédito: o autor.

Segundo o Serviço Nacional de Aprendizagem Rural (SENAR, 2012), a umidade pode ser medida por meio do simples teste de mão, seguindo os passos:

- i) Pegar um punhado de composto
- ii) Colocar na palma da mão e apertar firmemente.

Se escorrer água entre os dedos, o composto está demasiadamente úmido (umidade ultrapassou de 55%) o que estimulará a degradação anaeróbia dos resíduos orgânicos. Ao contrário, se a massa de resíduos orgânicos esfarelar, o nível de umidade encontra-se muito baixo, provocando a queima de nutrientes. O ideal é abrir a mão e o composto não esfarelar.

Foram realizados 27 ensaios em duplicata ou triplicata e adicionou-se diariamente resíduo orgânico em cada equipamento. Durante os ensaios foi avaliado:

- a) Quantidade de resíduo utilizado: 0,5 kg a 10 kg
- b) Frequência de adição de resíduo: diário ou conforme a evolução do ensaio
- c) Tamanho e tipo dos equipamentos para os ensaios:
 - a. C1: caixa de isopor ou caixa plástica pequena ou média (até 30 litros)
 - b. C2: caixa de isopor ou caixa plástica grande (50 a 60 litros)
 - c. G1: galão plástico de 10 litros, utilizado na posição vertical
 - d. G2: galão plástico de 10 litros, utilizada na posição horizontal
 - e. Isopor pequeno
 - f. 1 e 2: bombona grandes de 200 litros posicionadas na horizontal e vertical, respectivamente
- d) Inóculo:
 - a. Serapilheira
 - b. Microrganismos Eficientes (EM)
 - c. Bokashi
 - d. Embiotic
 - e. EM + Bokashi

- e) Aeração:
 - a. S: sem aeração
 - b. C: com aeração
- f) Duplicata ou triplicata: o número da amostra de cada ensaio é identificado pelo número 1, 2 ou 3, na frente da identificação da aeração.

Para a identificação do tamanho, amostra e sistema de aeração dos ensaios, foram utilizadas as siglas mencionadas, por exemplo: ensaio C2 1S, significa C2 (caixa grande), 1 (amostra 1) e S (sem aeração).

O tipo de inóculo utilizado e o processo de adição de resíduo orgânico é indicado na Tabela 7. A construção dos equipamentos é detalhada na etapa Resultados.

A Tabela 7 mostra todos os ensaios realizados em equipamentos de pequeno e médio porte e suas respectivas variantes de processo.

Tabela 7: Ensaios realizados em equipamentos de pequena e média escala

Ensaio	Inóculo							Aeração Forçada		Material da Composteira				
	Serapilheira	Microorganismos Eficientes (EM)	Bokashi	Embiotic	EM + Bokashi	Serapilheira ³	Microorganismos Eficientes (EM) ³	Sem	Com	C1	C2	G1	G2	Isopor Pequeno
1	x							x		x				
2	x							x			x			
3	x							x				x	x	
4	x								x	x				
5	x								x		x			
6	x							x						x
7		x						x		x				
8		x						x			x			
9		x							x	x				
10		x							x		x			
11			x					x		x				
12			x					x			x			
13			x						x	x				
14			x						x		x			
15				x					x	x				
16				x					x	x				
17				x					x		x			
18				x					x		x			
19				x					x		x			
20					x				x	x				
21					x				x	x				
22						x			x	x				
23						x			x	x				
24							x		x	x				
25							x		x	x				

³ Foram realizados novos ensaios com Serapilheira e microrganismos eficientes para reavaliar os parâmetros utilizados.

Ao final da fase de alimentação diária, o composto formado foi retirado dos equipamentos de compostagem e armazenado em baldes protegidos por tela metalizada para evitar a entrada de insetos. Estes materiais ficaram por 15 dias em fase de maturação.

O adubo formado ao final deste processo foi submetido a análise em diferentes laboratórios localizados no IPT. A determinação de pH e teor de umidade foram realizadas pelo Centro de Tecnologias Geoambientais (CTGeo) no Laboratório de Resíduos e Áreas Contaminadas (LRAC). Amostras para análises químicas que compreenderam a determinação da relação C/N do composto final foram analisadas pelo Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes (LCL), localizado no Centro de Química e Manufaturados (CQuiM). As análises de contagem microbiológica referentes ao início do processo e ao seu fim, bem como dos inóculos utilizados nos ensaios foram encaminhadas para o Núcleo de Bionanomanufatura, no Laboratório de Biotecnologia Industrial (LBI).

5.1. COMPOSTAGEM EM EQUIPAMENTOS DE PEQUENA ESCALA

5.1.1 Microrganismos aceleradores de compostagem

a) Ensaio com Serapilheira

Para os testes de compostagem em equipamentos de pequena escala com o uso do inóculo Serapilheira foram realizados seis ensaios, conforme a Tabela 8, sendo cinco ensaios em caixas de isopor e um ensaio em galões de água com capacidade de 10 litros cada.

O sistema de aeração forçada, utilizado nos ensaios 4 e 5, foram realizados com tubos de PVC com paredes perfuradas, localizados na parte inferior das caixas e conectados a secadores de cabelo comum. O sistema foi programado para injetar ar frio para dentro da composteira por 5 minutos a cada uma hora.

Tabela 8: Equipamentos utilizados em cada Ensaio com o inóculo Serapilheira.

Ensaio	1	2	3	4	5	6
Equipamento	C1 1S e C1 2S	C2 1S e C2 2S	G2 S e G1 S	C1 1C e C1 2C	C2 1C e C2 2C	Isopor pequeno

C1 = caixa de isopor de tamanho médio; C2 = caixa de isopor de tamanho grande; S = sem aeração forçada; C = com aeração forçada; G1 = galão de água vertical; G2 = galão de água horizontal.

Durante a montagem dos equipamentos, uma camada de argila expandida foi colocada para facilitar a aeração natural. Por cima dessa camada foram colocadas uma tela plástica e uma manta geotêxtil.

O início do processo consistiu no primeiro dia de alimentação. Exclusivamente neste dia (D0) o inóculo Serapilheira foi incorporado ao resíduo orgânico e inserido nos equipamentos, seguindo uma proporção de 1:1 (Figura 19a). A serragem foi misturada ao alimento (Figura 19b) e disposta em uma camada superficial para evitar a atração de insetos.

Inicialmente os ensaios foram realizados com alimentos cozidos, como restos de arroz e feijão. Posteriormente, optou-se pela alimentação apenas de pré-preparo, ou seja, alimentos crus como talos de vegetais e cascas de frutas descartados no preparo das refeições do restaurante, pois os alimentos cozidos provocaram odor ruim e atraíram roedores.

Figura 19: a) Pesagem da Serapilheira; b) Adição da serragem a mistura de resíduo orgânico e Serapilheira.

Fonte: o autor.

Os parâmetros acompanhados durante os dias durante os ensaios foram: a temperatura do composto e sua umidade (a partir do teste de mão, SENAR, 2012). Amostras para as análises de pH e umidade foram coletadas uma única vez, ao final da fase de maturação do composto, correspondendo ao final dos ensaios. Amostras para as análises microbiológicas foram coletadas no primeiro dia de alimentação e no último dia de maturação. O tempo total dos testes foi de 45 dias, sendo 30 de alimentação diária com adição do inóculo Serapilheira em todos os equipamentos e 15 dias destinados a maturação do composto final. Os detalhes dos ensaios realizados em cada equipamento com a adição do inóculo Serapilheira podem ser observados nas Tabelas 9, 10 e 11.

Tabela 9: Caracterização dos Ensaios 1, 3 e 4, com o inóculo Serapilheira.

Ensaio	1	3	4
Equipamento	C1 1S e C1 2S	G1 S e G2 S	C1 1C e C1 2C
Aeração Forçada	sem aeração forçada	sem aeração forçada	com aeração forçada
Quant. Inóculo	1 kg	1 kg	1 kg
Quant. Substrato	1 kg	1 kg	1 kg
Quant. Serragem	200 g	200 g	200 g

Tabela 10: Caracterização dos Ensaios 2 e 5, com o inóculo Serapilheira.

Ensaio	2	5
Equipamento	C2 1S e C2 2S	C2 1C e C2 2C
Aeração Forçada	sem aeração forçada	com aeração forçada
Quant. Inóculo	2 kg	2 kg
Quant. Substrato	2 kg	2 kg
Quant. Serragem	250 g	250 g

Tabela 11: Caracterização do Ensaio 6 com o inóculo Serapilheira.

Ensaio	6
Equipamento	Isopor pequeno
Aeração Forçada	sem aeração forçada
Quant. Inóculo	500 g
Quant. Substrato	500 g
Quant. Serragem	100 g

b) Ensaios com Microrganismos Eficientes

Preparo do Inóculo

Para esses ensaios foram capturados dois tipos de microrganismos eficientes: os típicos do solo natural, que crescem em uma cultura de arroz cozido mantido submerso na terra virgem de floresta, rica em microrganismos; e também outros microrganismos que crescem a partir da água do arroz cru, fermentada com leite. O modo como estes inóculos foram preparados pode ser observado nos procedimentos, a seguir:

Procedimento para o preparo de microrganismos eficientes coletados em floresta (Adaptado de ANDRADE et al, 2011):

Para o preparo da armadilha de arroz para capturar os microrganismos eficientes, foi cozido uma quantidade de 700 gramas de arroz sem sal, disposta em bandejas de plástico e em calhas de bambu cortado. Para evitar que insetos tivessem acesso ao arroz, os recipientes foram cobertos com uma tela fina (no caso dos recipientes plásticos) ou com a outra metade do bambu cortado. Em seguida, abriu-se uma cavidade no solo onde o recipiente foi alocado e coberto com folhas secas e a Serapilheira. Esperou-se de 10 a 15 dias, tempo necessário para capturar o EM. Foram descartadas as partes cinza, marrom e preta, que correspondem aos microrganismos degenerativos (ANDRADE et al, 2011), conforme Figura 20a.

O arroz colorido de verde, laranja, rosa, vermelho e branco foi distribuído em garrafas de plástico com a adição de 200 mL de melaço em cada garrafa. Água mineral, sem cloro e sem flúor, foi adicionada até completar as garrafas, que foram fechadas e armazenadas em local protegido do sol por 15 dias, de dois em dois dias as garrafas foram abertas para a liberação do gás produzido. Após este período, o inóculo ficou pronto para uso, conforme Figura 20b. Para utilização dos microrganismos eficientes nos equipamentos de pequena

escala, foi colocado o equivalente a 10 mL de uma solução 1:1 de EM e água sem cloro e sem flúor nas caixas menores e uma solução de 20 mL, respeitando as mesmas proporções, para as caixas maiores. A aplicação do EM foi realizada apenas no primeiro dia de alimentação, ou seja, no início do processo de compostagem, incorporando-o ao resíduo orgânico.

Figura 20: Preparo dos microrganismos eficientes da floresta

Crédito: o autor

a) arroz cozido disposto em uma calha de bambu, duas semanas após ser colocado no solo para a captura do EM.; b) EM concentrado, com melaço e água mineral.

Procedimento para o preparo de microrganismos eficientes coletados a partir da água do arroz cru fermentada com leite (adaptado de HAWAII HEALING TREE, 2012):

Para o preparo dos microrganismos eficientes adquiridos na fermentação do leite, foi utilizado $\frac{1}{4}$ de xícara de arroz cru, misturado com 1 xícara de água sem flúor e sem cloro, em um recipiente de vidro, até a água ficar esbranquiçada. O arroz foi coado e o líquido reservado em um recipiente frouxamente tampado, armazenado em local fresco e escuro por 5 a 7 dias, conforme a Figura 21a.

Após este período, a solução foi coada e separou-se o soro obtido. Uma parte do soro foi adicionada a 10 partes de leite. Novamente armazenou-se a solução em um recipiente de vidro por 5 a 7 dias. Após uma semana a solução foi coada, sendo reservada apenas a parte líquida. Adicionou-se 1 colher de chá de melaço à solução. Para ativar o inóculo foi misturado uma parte da solução obtida para 20 partes de água sem flúor e sem cloro (Figura 23b). Para utilização dos microrganismos eficientes nos equipamentos de pequena escala, colocou-se o equivalente a 10 mL da solução obtida para as caixas de tamanho médio e uma solução de 20 mL para as caixas de tamanho grande. A aplicação do EM foi realizada apenas no início do processo de compostagem, incorporando-o ao resíduo orgânico.

Figura 21: Preparo dos microrganismos eficientes a partir da água do arroz cru fermentada com leite.

Crédito: o autor

a) Soro sendo separado do composto que ficou em descanso por uma semana; b) Composto formado pelo soro do arroz distribuído em garrafas de plástico, juntamente com melaço e leite.

Para os testes de compostagem em equipamentos de pequena escala com o uso dos microrganismos eficientes como inóculo, foram realizados quatro ensaios no total, conforme Tabela 12.

Tabela 12: Equipamentos utilizados em cada Ensaio com o EM como inóculo.

Ensaio	7	8	9	10
Equipamento	C1 1S, C1 2S e C1 3S	C2 1S e C2 2S	C1 1C e C1 2C	C2 1C e C2 2C

C1 = caixa de plástico de tamanho médio; C2 = caixa de plástico de tamanho grande; S = sem aeração forçada; C = com aeração forçada.

Foi colocado uma camada de argila expandida para facilitar a aeração natural. Por cima dessa camada foi colocado uma tela plástica e uma manta geotêxtil. Para o sistema de aeração forçada foi instalado um *cooler* nas tampas dos equipamentos.

O início do processo consistiu no primeiro dia de alimentação. Neste dia (D0), os microrganismos eficientes foram incorporados ao resíduo orgânico e inseridos nos equipamentos, em diferentes concentrações, conforme Tabela 13. A cada alimentação, a serragem foi incorporada ao composto e utilizada para formar uma camada superficial para evitar a atração de insetos.

Tabela 13: Tipo de EM e concentrações utilizadas.

Ensaio	Equipamento	Inóculo
7	C1 1S	10 mL EM leite
	C1 2S	10 mL EM arroz
	C1 3S	10 mL EM arroz
8	C2 1S	20 mL EM arroz
	C2 2S	20 mL EM leite
9	C1 1C	10 mL EM leite
	C1 2C	10 mL EM arroz
10	C2 1C	20 mL EM leite
	C2 2C	20 mL EM arroz

A alimentação foi feita diariamente em todos os equipamentos. Esses ensaios tiveram seu tempo de alimentação reduzido (11 dias) devido ao recesso de final de ano do IPT. Os resíduos orgânicos utilizados foram compostos de talos e folhas de vegetais. Após a fase de alimentação, iniciou-se o processo de maturação do composto, que durou 16 dias.

Todos os dias acompanhou-se a temperatura do composto e sua umidade. Amostras para as análises de pH e umidade foram coletadas uma única vez, ao final da fase de maturação do composto correspondendo ao final dos ensaios. Amostras para as análises microbiológicas foram coletadas no primeiro dia de alimentação e também no último dia de maturação. O tempo total dos testes com adição dos microrganismos eficientes como inóculo foi de 27 dias, 11 de alimentação diária em todos os equipamentos e 16 para maturação do composto final. Os detalhes dos ensaios realizados em cada equipamento com a adição dos microrganismos eficientes como inóculo podem ser observados nas Tabelas 14 e 15.

Tabela 14: Caracterização dos Ensaios 7 e 9 com o inóculo EM.

Ensaio	7	9
Equipamento	C1 1S, C1 2S e C1 3S	C1 1C e C1 2C
Aeração Forçada	sem aeração forçada	com aeração forçada
Quant. Inóculo	10 mL	10 mL
Quant. Substrato	1 kg	1 kg
Quant. Serragem	200 g	200 g

Tabela 15: Caracterização dos Ensaios 8 e 10 com o inóculo EM.

Ensaio	8	10
Equipamento	C2 1S, C2 2S	C2 1C, C2 2C
Aeração Forçada	sem aeração forçada	com aeração forçada
Quant. Inóculo	20 mL	20 mL
Quant. Substrato	2 kg	2 kg
Quant. Serragem	250 g	250 g

c) Ensaio com Bokashi

Preparo do Inóculo

Na literatura estão disponíveis algumas receitas para o Bokashi. Entretanto muitas delas utilizam ingredientes com elevado custo e acesso restrito, como o farelo de soja (SENAR, 2012). Segundo Issao Ishimura, engenheiro agrônomo da Secretaria de Agricultura e Abastecimento de São Paulo, é possível produzir Bokashi com viabilidade econômica, fazendo substituições de alguns ingredientes, obtendo o mesmo efeito no produto final e mantendo a qualidade do composto orgânico. Na receita adaptada foi utilizado a fibra de trigo, em substituição ao farelo de soja, e a torta de algodão, no lugar da torta de mamona.

A receita utilizada foi adaptada do Programa de Olericultura Orgânica (SENAR, 2012) e de SIQUEIRA (2013) segundo a seguinte proporção: 14,97% de torta de algodão, 14,97% de farinha de osso, 9,98% de fibra de trigo, 59,88% de esterco bovino, 0,2% de microrganismos eficientes (inóculo) e água (o suficiente para atingir 55% de umidade). Todos os ingredientes foram misturados de modo a formar um composto homogêneo, conforme a Figura 22. O Bokashi necessita de um tempo mínimo de 15 dias para a maturação.

Figura 22: Materiais utilizados para o preparo do Bokashi.

Crédito: o autor.

a) fibra de trigo; b) mistura comercial de torta de algodão + farinha de osso; c) microrganismos eficientes; d) esterco bovino; e) bokashi pronto

Para os testes de compostagem em equipamentos de pequena escala, com o uso do inóculo Bokashi, foram realizados quatro ensaios no total (Tabela 16), todos em caixas de plástico organizadoras de tamanhos médio (capacidade de 30 litros) e grande (capacidade de 50 litros). Os ensaios 11 e 12 não possuíam aeração forçada. O ensaio 11 foi formado por três caixas de plástico de tamanho médio (C1) e o ensaio 12, por duas caixas de tamanho grande (C2). Os ensaios 13 e 14, por sua vez, possuíam sistema de aeração forçada. Duas caixas de plástico médias compunham o ensaio 13, ao passo que o ensaio 14 foi realizado em duas caixas plásticas de tamanho grande. Cada equipamento recebeu um nome com quatro caracteres, como é apresentado na Tabela 16.

Tabela 16: Equipamentos utilizados em cada Ensaio com o inóculo Bokashi.

Ensaio	11	12	13	14
Equipamento	C1 1S, C1 2S e C1 3S	C2 1S e C2 2S	C1 1C e C1 2C	C2 1C e C2 2C

C1 = caixa de plástico de tamanho médio; C2 = caixa de plástico de tamanho grande; S = sem aeração forçada; C = com aeração forçada.

O início do processo consistiu no primeiro dia de alimentação. No dia D0, o bokashi foi incorporado ao resíduo orgânico e inserido nos equipamentos, em diferentes quantidades, obedecendo ao balanceamento entre substrato e inóculo sugerido no Programa de Olericultura Orgânica (SENAR, 2012), conforme Tabela 17. A cada alimentação, a serragem também foi incorporada ao composto e utilizada para formar uma camada superficial, evitando a atração de insetos.

Tabela 17: Concentrações de Bokashi utilizadas,

Ensaio	Equipamento	Inóculo (g)
11	C1 1S	100
	C1 2S	
	C1 3S	
12	C2 1S	200
	C2 2S	
13	C1 1C	100
	C1 2C	
14	C2 1C	200
	C2 2C	

Todos os dias, os parâmetros acompanhados durante os ensaios foram: a temperatura do composto e sua umidade. Amostras para as análises de pH, umidade e microbiológicas foram coletadas e encaminhadas aos laboratórios do IPT. Os detalhes dos ensaios feitos em cada equipamento com o inóculo bokashi podem ser observados nas Tabelas 18 e 19:

Tabela 18: Caracterização dos Ensaios 11 e 13, com o inóculo Bokashi.

Ensaio	11	13
Equipamento	C1 1S, C1 2S e C1 3S	C1 1C e C1 2C
Aeração Forçada	sem aeração forçada	com aeração forçada
Quant. Inóculo	100 g	100 g
Quant. Substrato	1 kg	1 kg
Quant. Serragem	200 g	200 g

Tabela 19: Caracterização dos Ensaios 12 e 14, com o inóculo Bokashi.

Ensaio	12	14
Equipamento	C2 1S e C2 2S	C2 1C e C2 2C
Aeração Forçada	sem aeração forçada	com aeração forçada
Quant. Inóculo	200 g	200 g
Quant. Substrato	2 kg	2 kg
Quant. Serragem	250 g	250 g

d) Ensaios com Embiotic®

Ativação do produto

Para a ativação do produto, a cada 10 L de solução utilizou-se 1L de melaço, 8 L de água sem cloro e sem flúor e 1 L do Embiotic®. O preparo da solução foi feito seguindo as instruções do fabricante (Figura 23). Água e melaço foram adicionados em um recipiente com tampa de fechamento hermético. O Embiotic® foi acrescentado e misturado à solução que foi acondicionada em local protegido do sol.

A ativação durou de 5 a 7 dias. Para a utilização do composto foi necessário diluir a solução ativada em água sem cloro e sem flúor. Para utilização do Embiotic® nos equipamentos de pequena escala, colocou-se o equivalente a 10 mL nas caixas de tamanho pequeno e uma solução de 20 mL para as caixas de tamanho médio. A aplicação do Embiotic® foi realizada apenas no primeiro dia de alimentação, pois o intuito é ativar os processos químicos e biológicos, não sendo necessária reaplicação conforme orientação do fabricante.

Figura 23: Acelerador de compostagem comercial Embiotic®.

Nos testes de compostagem em equipamentos de pequena escala, foram realizados cinco ensaios no total, conforme Tabela 20, todos em caixas de plástico organizadoras de tamanhos médio (capacidade de 30 litros) e grande (capacidade de 50 litros). Todos os ensaios possuíam sistema de aeração forçada, no qual o ar era injetado nas composteiras por meio de um *cooler* programado para levar o ar por 5 minutos a cada uma hora. O ensaio 15 foi

composto por duas caixas plásticas de tamanho médio e o ensaio 16 por outra de mesmo tamanho. Já os demais ensaios foram formados por caixas plásticas de tamanho grande, sendo o ensaio 17 composto por duas caixas, e os ensaios 18 e 19 por uma caixa cada. Cada equipamento recebeu um nome com quatro caracteres, como é apresentado na Tabela 20.

Tabela 20: Equipamentos utilizados em cada Ensaio com o inóculo Embiotic®.

Ensaio	15	16	17	18	19
Equipamento	C1 1C e C1 2C	C1 3C	C2 1C e C2 2C	C2 3C	C2 4C

C2 = caixa de plástico de tamanho grande; C = com aeração forçada.

O início do processo consistiu no primeiro dia de alimentação. Neste dia (D0), o Embiotic® foi incorporado ao resíduo orgânico e inserido nos equipamentos, em diferentes concentrações, conforme Tabela 21. A cada alimentação a serragem também foi incorporada ao composto e como uma camada superficial para evitar a atração de insetos.

Tabela 21: Concentrações de Embiotic® utilizadas.

Ensaio	Equipamento	Inóculo (mL)
15	C1 1C	10
	C1 2C	10
16	C1 3C	0
17	C2 1C	20
	C2 2C	20
18	C2 3C	0
19	C2 4C	40

A alimentação foi feita diariamente em todos os equipamentos por 15 dias. Os resíduos orgânicos utilizados eram compostos de talos, folhas de vegetais e cascas de frutas.

Todos os dias os parâmetros acompanhados durante os ensaios foram: a temperatura do composto e sua umidade. Amostras para as análises de pH, umidade e microbiológicas foram coletadas e encaminhadas aos laboratórios do IPT. O tempo total dos testes com adição do Embiotic® como inóculo foi de 30 dias, sendo 15 de alimentação diária em todos os equipamentos e 15 para maturação do composto final. Os detalhes dos ensaios feitos em cada equipamento com o inóculo Embiotic® podem ser observados nas Tabelas 22 e 23.

Tabela 22: Caracterização dos Ensaios 15 e 16, com o inóculo Embiotic®.

Ensaio	15	16
Equipamento	C1 1C, C1 2C	C1 3C
Aeração Forçada	com aeração forçada	com aeração forçada
Quant. Inóculo	10 mL	0
Quant. Substrato	1 kg	1 kg
Quant. Serragem	200 g	200 g

Tabela 23: Caracterização dos Ensaios 17, 18 e 19 com o inóculo Embiotic®

Ensaio	17	18	19
Equipamento	C2 1C e C2 2C	C2 3C	C2 4C
Aeração Forçada	com aeração forçada	com aeração forçada	com aeração forçada
Quant. Inóculo	20 mL	0	40 mL
Quant. Substrato	2 kg	2 kg	2 kg
Quant. Serragem	250 g	250 g	250 g

e) Ensaios com EM + Bokashi

Para os testes de compostagem em equipamentos de pequena escala com o uso do composto formado pelo EM e o bokashi como inóculo, foram realizados dois ensaios, todos em caixas de plástico organizadoras de tamanhos médio (capacidade de 30 litros) e com sistema de aeração forçada. Conforme Tabela 24 a seguir, o ensaio 20 foi composto por 3 caixas de plástico e o ensaio 21 por 6 caixas de plástico do mesmo tamanho. Cada equipamento recebeu um nome com quatro caracteres.

Tabela 24: Equipamentos utilizados em cada Ensaio com o inóculo EM + Bokashi.

Ensaio	20	21
Equipamento	C1 1C, C1 2C e C1 3C	C1 4C, C1 5C, C1 6C, C1 7C, C1 8C e C1 9C

C2 = caixa de plástico de tamanho grande; C = com aeração forçada.

Devido aos resultados obtidos dos ensaios anteriores, o formato dos equipamentos foi revisto, para se atingir a temperatura desejada. Para estes ensaios, foi utilizado na parede interna das caixas plásticas grandes, placas de isopor de 15 mm. O percolado formado devido a decomposição do material orgânico era depositado diretamente nas caixas grandes.

O início do processo consistiu no primeiro dia de alimentação. No dia D0, o EM + Bokashi foi incorporado ao resíduo orgânico e inserido nos equipamentos, em diferentes concentrações, conforme Tabela 25. A cada alimentação a serragem foi incorporada ao composto e utilizada para formar uma camada superficial para evitar a atração de insetos.

Tabela 25: Concentrações de EM + Bokashi utilizadas.

Ensaio	Equipamento	Inóculo (g)
20	C1 1C	0
	C1 2C	
	C1 3C	
21	C1 4C	100
	C1 5C	
	C1 6C	
	C1 7C	200
	C1 8C	
	C1 9C	

Nos primeiros 5 dias, subsequentes ao D0, não houve alimentação dos equipamentos. No restante dos dias, até completar 15 dias de ensaio, a alimentação foi feita diariamente. Os resíduos orgânicos utilizados eram compostos de talos, folhas de vegetais e cascas de frutas.

Todos os dias os parâmetros acompanhados durante os ensaios foram a temperatura do composto e sua umidade. Amostras para as análises de pH, umidade e microbiológicas foram coletadas e encaminhadas aos laboratórios do IPT. O tempo total dos testes com adição do EM + Bokashi como inóculo foi de 32 dias, sendo 15 de alimentação diária em todos os equipamentos e 17 dias de maturação do composto final. Os detalhes dos ensaios feitos em cada equipamento com o inóculo EM + bokashi podem ser observados na Tabela 26.

Tabela 26: Caracterização dos Ensaios, com o inóculo EM + Bokashi.

Ensaio	20	21
Equipamento	C1 1C, C1 2C e C1 3C	C1 4C, C1 5C, C1 6C
Aeração Forçada	com aeração forçada	com aeração forçada
Quant. Inóculo	10 mL	0
Quant. Substrato	1 kg	1 kg
Quant. Serragem	200 g	200 g

f) Novos Ensaios

A partir de resultados parciais da contagem microbiológica, foi verificado que os inóculos Serapilheira e EM (capturados com isca de arroz) apresentaram a maior quantidade de microrganismos presentes em sua composição. Devido a sua potencialidade em relação aos demais inóculos, estes dois ensaios foram refeitos em equipamentos que também foram modificados.

Os novos equipamentos foram construídos de modo a elevar e manter a temperatura constante no interior das caixas. Para tanto, nas tampas das caixas plásticas grandes foram instaladas lâmpadas incandescentes de 220 volts de potência, programadas para acender durante 20 minutos a cada uma hora (Figura 24).

Os *coolers*, utilizados para injetar ar nas composteiras, foram instalados na extremidade oposta à lâmpada, na tampa da caixa, e foram programados para ligar e permanecer ativos por 40 minutos a cada uma hora, de maneira que quando a lâmpada acendesse, o *cooler* era desligado e vice-versa. As paredes da caixa plástica de tamanho médio foram separadas das paredes das caixas grandes por placas de isopor com espessura de 15 mm.

Figura 24: Caixas plásticas com instalação de lâmpada, cooler, placas de isopor e tela.

Crédito: o autor.

i. Ensaios com Serapilheira

Foram realizados mais dois ensaios com a Serapilheira, conforme Tabela 27. Duas composteiras formaram o ensaio 22 e estes equipamentos foram o controle dos testes (ensaios em branco). O ensaio 23 foi formado por quatro composteiras, nas quais foi adicionada a Serapilheira. Cada equipamento recebeu um nome com quatro caracteres, conforme apresentado na Tabela 27.

Tabela 27: Equipamentos utilizados em cada Ensaio, com o inóculo Serapilheira (novo)

Ensaio	22	23
Equipamento	C1 1C e C1 2C	C1 3C, C1 4C, C1 5C e C1 6C

C1 = caixa de plástico de tamanho médio; C = com aeração forçada.

O início do processo consistiu no primeiro dia de alimentação. No dia D0, a Serapilheira foi incorporada ao resíduo orgânico e inserida nos equipamentos (excetuando-se o ensaio controle), em uma quantidade de 2kg cada. Nestes ensaios optou-se por não adicionar a serragem, uma vez que o calor gerado pela incidência da lâmpada diretamente sob o resíduo conteria a umidade.

A alimentação foi feita diariamente em todos os equipamentos por 15 dias. Os resíduos orgânicos utilizados eram compostos de talos, folhas de vegetais e cascas de frutas.

Todos os dias os parâmetros acompanhados durante os ensaios foram: a temperatura do composto e sua umidade. Amostras para as análises de pH, umidade e microbiológicas foram coletadas e encaminhadas aos laboratórios do IPT. O tempo total dos testes com adição da Serapilheira como inóculo foi de 30 dias, sendo 15 de alimentação diária em todos os equipamentos e 15 para maturação do composto final. Os detalhes dos ensaios feitos em cada equipamento podem ser observados na Tabela 28.

Tabela 28: Caracterização dos ensaios 22 e 23, com o inóculo Serapilheira (novo).

Ensaio	22	23
Equipamento	C1 1C e C1 2C	C1 3C, C1 4C, C1 5C e C1 6C
Aeração Forçada	com aeração forçada	com aeração forçada
Quant. Inóculo	0	2 kg
Quant. Substrato	1 kg	1 kg
Quant. Serragem	0	0

ii. Ensaios com EM

Foram realizados mais dois ensaios com o EM, conforme Tabela 29. Duas composteiras formaram o ensaio 24 e estes equipamentos foram o controle para estes novos testes, uma vez que o resíduo orgânico utilizado é diferente do ensaio 22 (ensaios em branco). O ensaio 25 foi formado por duas composteiras nas quais foi adicionado o EM. Cada equipamento recebeu um nome com 4 caracteres.

Tabela 29: Equipamentos utilizados em cada Ensaio com o inóculo EM (novo).

Ensaio	24	25
Equipamento	C1 1C e C1 2C	C1 3C e C1 4C

C1 = caixa de plástico de tamanho médio; C = com aeração forçada.

O início do processo consistiu no primeiro dia de alimentação (D0), quando o EM foi incorporado ao resíduo orgânico e inserido nos equipamentos (excetuando-se o ensaio controle), em uma quantidade de 2kg cada. Nestes ensaios optou-se por não adicionar a serragem, uma vez que o calor gerado pela incidência da lâmpada diretamente sob o resíduo conteria a umidade.

A alimentação foi feita diariamente em todos os equipamentos por 15 dias. Os resíduos orgânicos utilizados eram compostos de talos, folhas de vegetais e cascas de frutas.

Todos os dias os parâmetros acompanhados durante os ensaios foram: a temperatura do composto e sua umidade. Amostras para as análises de pH, umidade e microbiológicas foram coletadas e encaminhadas aos laboratórios do IPT. O tempo total dos testes foi de 30 dias, sendo 15 de alimentação diária em todos os equipamentos e 15 para maturação do composto final. Os detalhes dos ensaios feitos em cada equipamento podem ser observados na Tabela 30.

Tabela 30: Caracterização dos Ensaios 24 e 25, com o inóculo EM (novo).

Ensaio	24	25
Equipamento	C1 1C e C1 2C	C1 3C e C1 4C
Aeração Forçada	com aeração forçada	com aeração forçada
Quant. Inóculo	0	10 mL
Quant. Substrato	1 kg	1 kg
Quant. Serragem	0	0

5.2. ENSAIOS FÍSICOS

A determinação do pH dos compostos formados ao final da fase de maturação do adubo foi realizada conforme descreve Lima (2004) e a determinação do teor de umidade dos mesmos foi realizada conforme determina a norma ABNT NBR 6457/1986 e Embrapa (2009). Os resultados obtidos foram comparados com os parâmetros apontados pela literatura como adequados para o composto final, bem como com as exigências colocadas pela Instrução Normativa SDA N°25, de 23 de julho de 2009 (MAPA, 2009), que trata das normas sobre as especificações dos fertilizantes orgânicos destinados a agricultura (IPT, 2017).

5.3. ENSAIOS MICROBIOLÓGICOS

A partir das amostras referentes ao início da fase de alimentação diária e ao final da etapa de maturação - compreendendo todo o processo de compostagem adotado nesta dissertação - foram realizados ensaios de determinação da concentração de microrganismos, potencial enzimático e acompanhamento da respiração microbiana.

A concentração de microrganismos aeróbios totais (bactérias, fungos e leveduras) e o potencial de atividade enzimática das amostras de inóculos utilizados nos ensaios (Serapilheira, microrganismos eficientes, bokashi e Embiotic®) foram avaliadas. Também foram realizados ensaios microbiológicos, visando a contagem de microrganismos aeróbios totais em meios específicos para bactérias, fungos e leveduras dos compostos no início da fase de alimentação diária e também ao final da fase de maturação (IPT, 2017).

5.4. ENSAIOS QUÍMICOS

Além das análises da relação C/N das amostras obtidas ao final da fase de maturação do composto, foram obtidos os teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio com base da norma ASTM D5373014e2 - Método D. Também foi obtido o teor de enxofre total das amostras, seguindo a norma ASTM D4239-14e2 - Método A. (IPT, 2017).

5.5. COMPOSTAGEM EM EQUIPAMENTOS DE MÉDIA ESCALA

A compostagem em equipamentos de média escala foi realizada em bombonas de plástico com capacidade de 200 litros cada. Para este tipo de equipamento realizou-se apenas um ensaio completo com o inóculo Serapilheira, o que se mostrou mais adequado na etapa anterior.

5.5.1 *Microrganismos aceleradores de compostagem: Serapilheira*

Os ensaios 1 e 2 constituíram-se de duas bombonas, uma posicionada na horizontal sem sistema de aeração forçada, porém com um sistema de pás internas para revolver o composto manualmente e outra vertical, com sistema de aeração forçada por meio da injeção de ar por uma bomba pressurizadora, que levava o ar para o interior do equipamento através de um cano de PVC perfurado, conforme mostrado na Figura 25. A alimentação ocorreu de forma irregular, variando conforme adição de resíduo. Neste ensaio foi utilizado alimento cozido, o qual foi incorporado com Serapilheira e adicionado à bombona.

Figura 25: Bombonas horizontal, com sistema de pás, e vertical, com sistema de aeração forçada

Crédito: o autor.

O início do processo consistiu no primeiro dia de alimentação. Exclusivamente neste dia (D0) o inóculo Serapilheira foi incorporado ao resíduo orgânico e inserido nos equipamentos seguindo uma proporção de 1:1. A serragem foi misturada ao alimento e também em uma camada superficial para evitar a atração de insetos.

A alimentação foi feita diariamente em todos os equipamentos por 30 dias. Os parâmetros acompanhados durante os ensaios foram: a temperatura do composto e sua umidade (a partir do teste de mão). Estes ensaios foram encerrados após a fase de alimentação diária, não contendo a etapa de maturação do composto. O tempo total dos testes com adição do inóculo Serapilheira foi de 30 dias de alimentação na bombona posicionada na vertical e de 17 dias de alimentação na bombona horizontal. Os detalhes dos ensaios realizados em cada equipamento podem ser observados na Tabela 31.

Tabela 31: Caracterização dos Ensaios 1 e 2, com o inóculo Serapilheira.

Ensaio	1	2
Equipamento	Bombona Horizontal	Bombona Vertical
Aeração Forçada	sem aeração forçada	com aeração forçada
Quant. Inóculo	10 kg	10 kg
Quant. Substrato	10 kg	10 kg
Quant. Serragem	5 kg	5 kg

Após a conclusão do primeiro ensaio os equipamentos passaram por reavaliações estruturais para incorporar o revolvimento, melhorando a aeração no processo.

6. RESULTADOS

Os resultados laboratoriais e em equipamentos de compostagem de pequena ou média escala, indicaram grande potencial de aceleração do processo de compostagem com um baixo consumo de energia, porém importantes desafios foram identificados ao replicar as condições laboratoriais nos protótipos com o uso dos resíduos orgânicos na forma em que eles saem dos restaurantes.

Foram desenvolvidos equipamentos utilizando-se caixas de isopor e caixas plásticas, para facilitar a adaptação, e que são de baixo custo. Para o sistema de aeração foram utilizados canos de PVC perfurados, coolers, secador de cabelo e compressor de ar, como mostrado na Figura 26a. Os equipamentos também contavam com sistema de acompanhamento e registro de temperatura, demonstrado na Figura 6b.

Figura 26: Protótipos de isopor automatizado.

Crédito: o autor.

- a) Protótipos de isopor automatizados, com aquecimento, aeração forçada e medição de temperatura;
- b) sistema desenvolvido para registro e acompanhamento de temperatura.

Figura 27: Protótipos em caixas plásticas

Crédito: o autor

a) Protótipos em caixa plástica, automatizados, com aquecimento, aeração forçada e medição de temperatura; b) Exemplo de acondicionamento de caixas pequenas e amostras para realização dos ensaios

Na sequência é apresentado a pesquisa realizada das patentes de equipamentos de pequeno e médio porte existentes e os principais resultados observados e mensurados.

6.1 DIFERENTES MODELOS DE EQUIPAMENTO DE COMPOSTAGEM DE PEQUENO E MÉDIO PORTE

Para avaliar as condições ótimas e essenciais para o processo de compostagem acelerada, alinhadas as demandas de mercado (necessidade de pouco espaço, baixo consumo de energia e baixo custo), foram estudados diversos equipamentos existentes no mercado nacional e patenteados no Brasil e em outros países (bases INPI e ferramenta Espacenet, com patentes da European Patent Office e do World Intellectual Property Organization); e testados e automatizados protótipos comparando: tamanho, direção (horizontal e vertical), tipo de material, sistema de aeração e sistema de aquecimento.

Na base do INPI foram encontradas 61 patentes com os termos composteira e compostagem, conforme Tabela 32:

Tabela 32: Resultados do levantamento de patentes realizado no INPI.

Termo de busca	Quantidade de patentes encontradas	Patentes relacionadas a equipamentos automatizados de pequeno porte	Patentes relacionadas a equipamentos automatizados com eficiência energética
Composteira	6	2	0
Compostagem	55	0	0
Total	61	2	0

Dentre as patentes encontradas, pode-se destacar a patente BR202013015-768, que consiste em um equipamento formado por uma caixa térmica retangular, com tampa de abertura superior para o depósito do resíduo orgânico em bacia metálica de cura. O eixo metálico misturador, assim como a resistência de aquecimento da cabine superior e fluxo forçado de movimentação de ar, é acionado por sistema eletrônico disposto no painel frontal da caixa. O sistema conta ainda com tampa de abertura frontal inferior para retirada da matéria orgânica decomposta, indicado na Figura 28:

Figura 28: Exemplo de equipamento de compostagem de pequeno porte.

Fonte: INPI, patente BR202013015-768.

Nos sistemas *Questel Orbit* e *European Patent Office (Espacenet)*, foram encontrados 369 (Tabela 33) e 426 patentes, respectivamente.

Tabela 33: Resultados do levantamento de patentes realizado no Espacenet.

Termo de busca	Quantidade de patentes encontradas	Patentes relacionadas a equipamentos automatizados de pequeno porte	Patentes relacionadas a equipamentos automatizados com eficiência energética
Automated composter	6	2	0
Automated composting	18	3	0
Automatic composter	2	0	0
Automatic composting	96	7	1
Composter	247	11	6
Total	369	23	7

A patente WO2008015385 (A2), denominada “*Composting System*”, refere-se a um equipamento constituído por um recipiente de armazenamento, um painel solar e um dispositivo alimentado por energia solar para aumentar a performance da compostagem. Este dispositivo pode ser utilizado para controlar a umidificação, o revolvimento, a aeração e o aquecimento, exemplificado na Figura 29.

Figura 29: Pesquisa Espacenet. Equipamento de compostagem movido a energia solar.

Fonte: Espacenet, patente WO2008015385.

6.2 COMPOSTAGEM EM EQUIPAMENTOS DE PEQUENA ESCALA

6.2.1 Ensaios com inóculo Serapilheira

Comparando os aspectos físicos do composto orgânico obtido com a adição do inóculo Serapilheira, nota-se que o composto formado nos ensaios 1, 2, 3 e 6, sem aeração forçada (Figura 30) apresentaram aparência mais úmida em relação aos compostos formados nos ensaios 4 e 5, com aeração forçada (Figura 31). Entre os compostos formados nos equipamentos sem aeração forçada, destacam-se o C1 1S e C1 2S (equipamento pequeno, amostra 1 e 2, sem aeração forçada), com aparência semelhante ao adubo comercial, principalmente devido à umidade e o odor característico de terra.

Dentre os produtos obtidos nos equipamentos com aeração forçada, os aspectos físicos não apresentaram grande variação, apresentando consistência seca.

Figura 30: Aspecto do composto final, 15 dias após início da maturação, em equipamento sem aeração forçada.

a) C 1 1S; b) C12S; c) C2 1S; d) C2 2S e) G1 S; f) G2 S; g) Isopor Pequeno.

Figura 31: Aspecto do composto final, 15 dias após início da maturação, em equipamento com aeração forçada.

a) C 1 1C; b) C1 2C; c) C2 1C; d) C2 2C.

A variação de temperatura foi bem nítida quando se trabalhou com equipamentos do mesmo tamanho, mesmos parâmetros de alimentação, porém com e sem aeração forçada, conforme mostrado nas Figuras 32 e 33.

Tanto os equipamentos pequenos (C1, 35 litros), quanto os equipamentos grandes (C2, 50 litros) atingiram a fase termofílica (superior à 45°C) entre o décimo quinto e vigésimo dia, para as amostras sem aeração forçada.

Nestas condições, a aeração forçada prejudicou o processo, retirando ar quente do composto.

Figura 32: Variação de temperatura em equipamentos de tamanho médio.

Variação da temperatura do composto nos equipamentos sem aeração forçada (C1 1S e 2S) e com aeração (C1 1C e 2C).

Figura 33: Variação de temperatura em equipamentos de tamanho grande.

Variação da temperatura do composto nos equipamentos sem aeração forçada (C2 1S e 2S) e com aeração forçada (C2 1C e 2C).

6.2.2 Ensaios com inóculo EM

A aparência dos compostos obtidos em todos os equipamentos foi semelhante e todos apresentaram grande taxa de umidade (Figuras 34 e 35). Isso se deve ao fato do resíduo orgânico ser formado majoritariamente por talos de hortaliças e folhas.

No décimo dia de alimentação verificou-se a necessidade da retirada do percolato produzido pela decomposição do resíduo orgânico em todos os equipamentos, cerca de 300 mL em cada caixa de plástico média e 450 mL em cada caixa de plástico de tamanho grande.

Figura 34 Aspecto do composto final, 16 dias após início da maturação, em equipamento sem aeração forçada.

a) C1 1S; b) C1 2S; c) C1 3S; d) C2 1S; e) C2 2S

Figura 35: Aspecto do composto final, 16 dias após início da maturação.

Equipamentos com aeração forçada. a) C1 1C; b) C1 2C; c) C2 1C; d) C2 2C

O comportamento da temperatura entre os equipamentos e aceleradores de compostagem (EM leite e EM arroz, Figuras 36 e 37, respectivamente) apresentou pouca variação e ambos não atingiram a fase termofílica (entre 45°C e 65°C). Isso se deve principalmente pela alta umidade do processo.

Figura 36: Variação de temperatura, em equipamento pequeno (C1) e médio (C2), com inóculo EM leite

Figura 37: Variação de temperatura, em equipamento pequeno (C1) e médio (C2), com inóculo EM arroz

6.2.3 Ensaios com inóculo Bokashi

O bokashi preparado apresentou aspecto úmido e, quando misturado ao alimento, praticamente não interferiu no tempo de compostagem. Para este processo também foi utilizado alimento cozido, o que intensificou o odor ruim e a atração de vetores. Devido aos problemas encontrados, o período de alimentação dos ensaios foi interrompido no D7, não atingindo os 15 dias programados.

Como observado nas Figuras 38 e 39, em todos os equipamentos, parte do alimento se compactou ou teve sua aeração incompleta, promovendo o desenvolvimento de bactérias anaeróbias e o odor de putrefação.

Figura 38: Aspecto do composto final dos equipamentos sem aeração forçada.

a) C1 1S; b) C1 2S; c) C1 3S; d) C2 1S; e) C2 2S.

Figura 39 Aspecto do composto final dos equipamentos com aeração forçada.

a) C1 1C; b) C1 2C; c) C2 1C; d) C2 2C.

O comportamento da temperatura do Bokashi foi similar ao do EM, pois apresentou pouca variação de temperatura entre o tamanho das caixas e com ou sem aeração forçada. Apenas uma amostra (C1 3S) ultrapassou os 45°C, porém foi um pico, enquanto todas as outras amostras não atingiram a fase termofílica (entre 45°C e 65°C), conforme Figuras 40 e 41. Isso se deve principalmente pela alta umidade do processo.

Figura 40: Variação de temperatura do composto nos equipamentos médios.

Sem aeração forçada (C1 1S, 2S e 3S) e com aeração forçada (C1 1C e 2C).

Figura 41: Variação de temperatura do composto nos equipamentos grandes, com e sem aeração forçada.

6.2.4 Ensaios com inóculo Embiotic®

A aparência dos compostos obtidos em todos os equipamentos foi semelhante, e todos apresentaram uma grande taxa de umidade. Tentou-se corrigir o alto teor de umidade dos alimentos adicionados (hortaliças), com o acréscimo de serragem, porém o aspecto físico final do composto, após 30 dias de ensaio, ainda foi bem úmido, conforme Figura 42. Durante vários momentos do processo foi retirado o percolado.

Figura 42: Aspecto do composto final, 15 dias após início da maturação.

Algumas diferenças podem ser observadas na Figura 43, como as maiores temperaturas foram atingidas nos equipamentos onde foi utilizado uma quantidade maior de inóculo, como em C2 2C (20 mL) e principalmente em C2 4C (40 mL), porém, apenas a quantidade de inóculo não foi suficiente para elevar a temperatura para a fase termofílica do processo. A alta umidade apresentada nos compostos também foi um parâmetro que afetou diretamente as temperaturas dos compostos.

Figura 43: Variação da temperatura do composto utilizando o Embiotic®.

6.2.5 Ensaios com inóculo EM + Bokashi

Após o décimo quinto dia de alimentação, os compostos formados foram armazenados em baldes abertos, por mais 15 dias, para o composto atingir estabilidade. Nestes ensaios, todos os equipamentos foram formados por caixas de tamanho médio, com sistema de aeração forçada. Durante a fase de alimentação diária, verificou-se a formação de percolato no interior dos equipamentos, conforme apresentado na Tabela 34. O líquido foi retirado no 14º dia (D14).

Tabela 34: Volume de percolato retirado em cada equipamento ao longo da fase de alimentação diária.

Equipamento	Volume de chorume retirado (mL) D14
C1 1C	1000
C1 2C	850
C1 3C	850
C1 4C	650
C1 5C	850
C1 6C	650
C1 7C	850
C1 8C	500
C1 9C	450

Na Figura 44, observa-se uma ligeira diferença entre os compostos dos testes branco e com adição do inóculo. Estes últimos, embora não houvesse diferença visível entre as diferentes concentrações de inóculo, apresentaram pouco ou nenhum resíduo orgânico em decomposição, ao final dos 15 dias de alimentação, diferentemente do que se pode ver nos testes branco. Este resultado, ainda que seja apenas visível, apontou que a utilização do inóculo contribuiu para a compostagem dos alimentos.

Figura 44: Aspecto do composto após o término da fase de alimentação diária.

a) C1 1C; b) C1 2C; c) C1 3C testes brancos.

d) C1 4C; e) C1 5C; f) C1 6 testes com 100 g de inóculo.

g) C1 7C; h) C1 8C; i) C1 9C testes com 200 g de inóculo.

Ao final dos 15 dias de maturação, todas as amostras não apresentavam qualquer sinal de matéria orgânica ainda em decomposição, conforme Figura 45. No entanto, as imagens dos resultados não são suficientes para inferir a importância do inóculo na aceleração do processo de compostagem, sendo necessário analisar a atividade microbiana dos materiais para chegar a uma conclusão sobre o comportamento da mistura dos inóculos EM e Bokashi.

Figura 45: Aspecto do composto final, 15 dias após início da maturação

- a) C1 1C; b) C1 2C; c) C1 3C teste branco
 d) C1 4C; e) C1 5C; f) C1 6 testes com 100 g de inóculo
 g) C1 7C; h) C1 8C; i) C1 9C testes com 200 g de inóculo

Como mostrado na Figura 46, mesmo havendo uma pequena diferença entre os valores máximos atingidos pela temperatura, não é conclusivo que o uso do inóculo permitiu sua elevação ao longo do processo. Todavia, nestes ensaios o inóculo auxiliou na aceleração do processo de decomposição da matéria orgânica.

Figura 46: Variação da temperatura do composto em todos os equipamentos com e sem aeração forçada.

Sem aeração forçada (1C, 2C e 3C) ou com aeração forçada (4C, 5C, 6C e 7C) e adição do inóculo Microorganismo Eficiente + Bokashi

6.2.6 Ensaios com inóculo Serapilheira (novo)

Os ensaios com o inóculo Serapilheira foram refeitos em equipamentos reformulados com um sistema de lâmpada para aumentar a temperatura e diminuir a umidade em excesso do composto, o que até então tem sido uma dificuldade observada em todos os ensaios, e também pela temperatura ser um dos parâmetros essenciais em um processo de compostagem, uma vez que existem microrganismos que atuam em suas diferentes faixas.

Ao contrário dos primeiros ensaios realizados com a Serapilheira, a duração destes últimos ensaios foi de 30 dias, sendo os 15 primeiros constituindo a fase de alimentação diária e os 15 últimos a fase de maturação. Durante a primeira etapa, os resíduos orgânicos colocados nos equipamentos eram compostos por talos e folhas de vegetais, mas também cascas de frutas diversas. Diferentemente dos ensaios anteriores, a serragem foi adicionada apenas no primeiro dia de alimentação. Optou-se por esse procedimento uma vez que a concentração C/N dos compostos obtidos nos ensaios anteriores estarem muito distante do ideal, com uma concentração de carbono superior ao esperado. Este fato foi causado principalmente pela serragem, que possui uma alta concentração de carbono.

Como mostra a Figura 47, a aparência dos compostos obtidos foi semelhante. Pelo teste de mão todos apresentavam a umidade ideal, ou seja, não esfarelaram, tampouco escorreu água dos compostos. Ao observar o adubo obtido nos testes em branco (C1 1C e C1 2C) com os demais testes, nos quais foi adicionado a Serapilheira (C1 3C, C1 4C, C1 5C e C1 6C), aparentemente notou-se que os primeiros ainda apresentavam restos de matéria orgânica, principalmente cascas de frutas, enquanto que os demais, com Serapilheira, apresentaram na forma de um material homogêneo, semelhante a terra. Desta forma, é possível ressaltar que houve diferenças aparentes pela adição do inóculo, porém apenas as observações diferentes na aparência do composto final não são suficientes para definir a importância do uso da Serapilheira nos testes.

Figura 47: Aspecto do composto final com Serapilheira, 15 dias após início da maturação.

a) C1 1C; b) C1 2C; c) C1 3C; d) C1 4C; e) C1 5C; f) C1 6C

Apesar da existência de diferenças entre as temperaturas dos equipamentos, principalmente entre os ensaios em branco (C1 1C e C1 2C) com os demais, onde foi adicionado a Serapilheira (C1 3C, C1 4C, C1 5C e C1 6C), esta variação é pequena, conforme Figura 48, sendo insuficiente para afirmar que o inóculo influenciou na temperatura durante o processo de forma a aumentá-la. Além disso, todos os experimentos não atingiram a fase termofílica.

Figura 48: Variação da temperatura do composto com o inóculo Serapilheira, ao longo do tempo

6.2.7 Ensaios com inóculo EM (novo)

Ensaios com o inóculo EM também foram refeitos nos equipamentos reformulados com o sistema de lâmpada para fazer melhorar o aquecimento. Para estes ensaios foi utilizada uma variação maior de resíduo orgânico, como cascas de frutas diversas e hortaliças. A metodologia para utilização da serragem foi igual a descrita nos novos ensaios com a Serapilheira. No final da fase de alimentação diária foi verificada a formação de percolado no interior dos equipamentos, porém ao se realizar o teste de mão, o composto apresentou umidade adequada.

Não se pode afirmar neste caso, que o inóculo interferiu nos ensaios de modo a produzir percolado, uma vez que em ambos os testes (branco e com inóculo) houve formação do líquido.

Não é possível inferir que a adição do inóculo (C1 3C e C1 4C) acelerou o processo, quando comparado com o resultado dos testes em branco (C1 1C e C1 2C), uma vez que ambos apresentam aparência semelhante, Figura 49.

Figura 49: Aspecto do composto final com inoculo EM (novo), 15 dias após início da maturação

a) C1 1C + C1 2C; b) C1 3C + C1 4C

A Figura 50 mostra o comportamento da temperatura, ao longo dos dias em todos os ensaios realizados com inóculo EM. Os testes em branco (C1 1C e C1 2C) e os demais que utilizaram o inóculo (C1 3C e C1 4C) apresentaram temperaturas mais elevadas que os testes anteriores, porém com pouca diferença entre si.

Figura 50: Variação da temperatura do composto utilizando o inóculo EM

6.3 PARÂMETROS DO PROCESSO DE COMPOSTAGEM

Para cada ensaio realizado com os diferentes inóculos utilizados, os parâmetros do processo de compostagem (concentração microbiana do composto e dos inóculos; teor de pH, teor de umidade e concentração C/N) foram submetidos a análises, por meio das amostras dos compostos enviados aos laboratórios do IPT.

6.3.1 Análises biológicas

Os resultados das análises microbiológicas compreenderam a caracterização dos inóculos utilizados por concentração microbiana e atividade enzimática, assim como a caracterização dos compostos ao longo do processo de compostagem, por contagem de microrganismos. Ensaios de respiração microbiana também foram realizados.

a) Caracterização dos inóculos e das amostras

Inóculos

A composição dos inóculos Serapilheira, microrganismos eficientes (preparados com armadilha de arroz e com leite), Bokashi, EM + Bokashi e Embiotic® foi determinada em termos de concentração de microrganismos e pode ser observada na Figura 51.

Figura 51: Concentração de microrganismos por inóculo

Fonte: Adaptado do relatório técnico n° 150 287-205 apresentado pelo IPT, 2017.

Embora obtidos de materiais distintos, todos os inóculos apresentaram concentrações tanto de bactérias quanto bolores e leveduras, um resultado previamente esperado. No entanto, existe o predomínio de bactérias em alguns, destacando-se o bokashi, a mistura de EM + bokashi e o EM feito a partir do soro do leite (IPT, 2017). As bactérias são importantes para as reações de hidrólise, principalmente na fase mesofílica do processo, onde estes organismos metabolizam moléculas mais simples, decompondo o resíduo orgânico.

Na Figura 51 destaca-se a comparação entre as concentrações de microrganismos encontradas nos inóculos EM produzido com o arroz e o Embiotic®, este último considerado como o composto de microrganismos eficientes industrializado. Pela figura, nota-se que a concentração tanto de bactérias quanto a de fungos e leveduras é muito próxima entre os inóculos, indicando que o EM produzido naturalmente através da armadilha com o arroz cozido é tão potente quanto o EM comercial, sendo uma opção mais barata para ser obtida e utilizada em processos de compostagem.

Por fim, ainda que as concentrações de microrganismos apresentadas nos inóculos EM do arroz e na Serapilheira não sejam as maiores dentre os inóculos analisados, são as que apresentam maior equilíbrio entre as populações de microrganismos, isto é, maior variabilidade de organismos que atuam em conjunto na decomposição do alimento. Portanto, pela análise das concentrações de microrganismos presentes nos inóculos testados neste projeto, destaca-se a utilização da Serapilheira e do EM do arroz para um processo de compostagem acelerada, devido às características presentes nestes compostos, citadas acima.

Em todos os inóculos foi evidenciada a atividade enzimática de celulase, amilase, lipase e peptidase, por meio de incubação em meio seletivo e/ou diferencial, a partir da suspensão de cada inóculo, sendo assim, todos os materiais apresentaram potencial enzimático, qualitativamente semelhante (IPT, 2017).

Amostras

Para avaliação do composto, foram separadas amostras referentes ao início do processo de compostagem e ao final da fase de maturação, quando o adubo estava formado. Na Tabela 35 encontram-se todas as amostras onde foi realizada a caracterização microbiológica.

Tabela 35: Amostras enviadas para caracterização microbiológica

Ensaio	Amostra	Ensaio (inóculo)	Condições		
			Aeração forçada	Teste branco	Aquecimento
1	C1 3S	EM (arroz)	Sem	Não	Não
5	C2 1C	EM (leite)	Com		
13	C1 1C	Bokashi	Com	Não	Não
20	C1 2C	EM + Bokashi	Com	Não	Não
22	C1 1C	Serapilheira (novo)	Com	Sim	Não
22	C1 2C			Sim	Sim
23	C1 3C + C1 4C			Não	Sim
23	C1 5C + C1 6C			Não	Sim
24	C1 1C + C1 2C	EM (novo)	Com	Sim	Sim
25	C1 3C + C1 4C			Não	Sim

A Figura 52 mostra o crescimento dos microrganismos das amostras apresentadas na Tabela 35.

No geral, a concentração tanto de bactérias quanto de fungos elevou-se ao longo do processo de compostagem. As bactérias decresceram apenas durante o ensaio novo de Serapilheira, nos testes sem adição de calor forçado (lâmpada) (Figura 52g) e no teste em branco, também sem calor forçado com o uso do mesmo inóculo (Figura 52e). Já os fungos tiveram uma única pequena queda de população durante o ensaio com o inóculo EM + bokashi (Figura 52d). As quedas das concentrações dos microrganismos, no geral, podem ser influenciadas pela temperatura do processo. Ainda que existam algumas divergências, não há uma grande variação no número de microrganismos de um teste para outro, portanto, a partir da caracterização destas amostras não é possível concluir que a adição do inóculo propiciou um aumento na população microbiana. O que pode ser ressaltado, a partir da aparência física do composto, é que o inóculo favoreceu a aceleração do processo de compostagem, no qual os resíduos orgânicos foram decompostos mais rapidamente em sua presença do que nos ensaios em branco.

Figura 52: Concentração de microrganismos ao longo do processo de compostagem

Fonte: Adaptado do relatório técnico n° 150 287-205 apresentado pelo IPT.

6.3.2 Acompanhamento da respiração microbiana

A respiração microbiana foi acompanhada objetivando-se verificar se a presença do inóculo (EM e Bokashi) exerceria alguma influência significativa na população de microrganismos, de modo a refletir sua importância durante a degradação da matéria orgânica (IPT, 2017).

A eficiência do processo pode ter sido comprometida devido à dificuldade de manter os microrganismos aeróbios. Isto ocorreu devido a saturação do resíduo, principalmente durante a terceira semana de ensaio. A saturação, por sua vez, ocorreu por conta da dificuldade de manuseio e abertura para evaporação natural do CO₂, por causa dos fortes odores advindos do ensaio (IPT, 2017). O gráfico do processo de liberação de CO₂ é apresentado na Figura 53. Já a Figura 54 mostra o resultado final para cada um dos microorganismos.

Figura 53: Liberação do CO₂ ao longo do ensaio

Fonte: Adaptado do relatório técnico nº 150 287-205 apresentado pelo IPT, 2017

Figura 54: Resultado final da liberação de CO₂ para cada microcosmo

Fonte: Adaptado do relatório técnico nº 150 287-205 apresentado pelo IPT, 2017

Ainda que possam ser observadas algumas variações no comportamento das curvas, considerando os resultados de respiração nas condições ensaiadas, não foi possível destacar o

efeito da adição do inóculo, ao ser comparado a matéria orgânica dos testes em branco (IPT, 2017).

6.3.3 Análises físicas: teor de umidade e pH

Na Tabela 36 são listadas as amostras encaminhadas ao laboratório do IPT, nos quais foram realizadas as análises para determinação do teor de umidade e pH, bem como os resultados obtidos do composto formado ao final do processo de compostagem, utilizando inóculos diversos. Os valores em vermelho mostram os parâmetros em desacordo ao estabelecido pela IN nº25/2009 (MAPA, 2009; IPT, 2017).

Tabela 36: Amostras e resultados das análises do teor de umidade e pH

Inóculo utilizado	Amostra	Média do teor de umidade (%)	Média das leituras de pH
Serrapilheira	C1 1C	41,9	8,2
	C1 2C	9,7	7,24
	C2 1C	51,7	6,94
	C2 2C	40,9	8,40
EM	C1 1S/C1 2S/C1 3S	51,4	4,84
	C1 1C/ C1 2C	73,8	6,63
	C2 1S/C2 2S	71,2	7,44
	C2 1C/C2 2C	70,1	5,81
EM + Bokashi	C1 1C	74,1	8,87
	C1 2C	73,0	8,54
	C1 3C	62,6	8,12
	C1 4C	71,4	8,74
	C1 5C	74,6	8,64
	C1 6C	67,4	8,24
	C1 7C	69,7	8,53
	C1 8C	69,1	8,26
Embiotic®	C1 1C	57,9	7,84
	C1 2C	56,4	8,13
	C1 3C	56,7	8,13
	C2 1C	57,9	8,07
	C2 2C	58,1	8,16
	C2 3C	57,1	8,02
	C2 4C	58,5	8,01
Serrapilheira (novo)	C1 1C	34,7	7,53
	C1 2C	23,3	7,66
	C1 3C/C1 4C	36,8	8,68
	C1 5C/C1 6C	21,7	8,39
EM (novo)	C1 1C/C12C	15,5	9,73
	C13C/C14C	15,4	9,43

Os compostos finais gerados nos ensaios de compostagem enquadram-se na categoria de fertilizante misto/composto, segundo a IN nº25/2009 (MAPA, 2009). De acordo com esta instrução normativa, o pH mínimo do adubo deve ser 6,0. Já a umidade não pode ultrapassar 50% (MAPA, 2009; IPT, 2017). Portanto, excetuando-se duas amostras utilizando o inóculo

EM (C1 1S/C1 2S/C1 3S e C21 C/C2 2C) todas as amostras se encontram dentro do permitido pela legislação, considerando-se o parâmetro pH.

No entanto, em relação ao teor de umidade, várias amostras apresentaram-se inadequadas de acordo com a normativa para serem consideradas composto orgânico. A elevada umidade apresentada nos compostos finais pode ser explicada devido à composição da matéria orgânica utilizada para ser compostada, que durante a maioria dos ensaios foi basicamente formada por verduras e talos vegetais (produtos que contém grande quantidade de água). Outro fator diretamente relacionado à umidade com composto é a aeração, a qual não foi tão eficiente em alguns ensaios, promovendo condições anaeróbias para algumas amostras (IPT, 2017).

6.3.4 Análises químicas: teores de carbono, nitrogênio, hidrogênio e enxofre

Os resultados da relação C/N das amostras representando ensaios com diferentes inóculos encontram-se na Tabela 37. Os valores em vermelho mostram os parâmetros em desacordo ao estabelecido pela IN nº25/2009 (MAPA, 2009; IPT, 2017).

Tabela 37: Relação entre o teor de carbono e nitrogênio das amostras

Inóculo utilizado	Amostra	Relação C/N
EM	C1 1C	30,31
	C1 2C	30,46
Embiotic®	C1 2C	37,38
	C1 3C	42,54
Serrapilheira (novo)	C1 3C/C14C	14
	C1 5C/C1 6C	16,16
EM (novo)	C1 1C/C1 2C	11,1
	C1 3C/C1 4C	10,66

De acordo com a IN nº25/2009 (MAPA, 2009), a relação C/N máxima para os fertilizantes orgânicos mistos/compostos é 20. Sendo assim, quatro das amostras levadas a análise (EM C1 1C, C1 2C e Embiotic C1 2C e C1 3C) estão em desacordo com a legislação, portanto, não podem ser considerados fertilizantes orgânicos mistos. Este resultado deve-se ao excesso de serragem utilizado nos ensaios, principalmente nos primeiros testes, nos quais esse material foi utilizado como principal alternativa para controlar a umidade do processo. Após modificações dos equipamentos, com a inserção de lâmpada de aquecimento, conseguiu-se controlar a umidade do composto formado, uma vez que a temperatura interna das caixas aumentou, de modo a dispensar a serragem, que seria incorporada ao composto. Este resultado pode ser confirmado observando as relações C/N dos últimos ensaios realizados com Serrapilheira e EM, os quais obtiveram valores em conformidade com a Instrução Normativa.

6.4 COMPOSTAGEM EM EQUIPAMENTOS DE MÉDIA ESCALA

6.4.1 Ensaios com inóculo *Serapilheira*

Como detalhado no Método, foram desenvolvidos dois protótipos de média escala, em bombonas plásticas de 200 litros, sendo um equipamento no sentido vertical, com aeração forçada e sistema interno com tudo de PVC e argila expandida, para auxiliar na aeração, conforme Figura 55, a seguir.

Figura 55: Protótipo de bombona plástica vertical, sem aquecimento e com aeração forçada

Crédito: o autor.

Outro equipamento foi desenvolvido no sentido horizontal, sem sistema automático de aeração forçada, porém com um sistema interno de aletas para misturar o composto e mantê-lo aerado, conforme Figura 56, a seguir.

Figura 56: Protótipo de bombonas plástica horizontal, sem aquecimento e sem aeração forçada.

Crédito: o autor.

Em ambos equipamentos, o composto não degradou da forma esperada, desenvolvendo bactérias anaeróbias e odor de putrefação. As medidas adotadas de aeração forçada (bombona vertical), misturador com aletas (bombona horizontal) e adição de serragem não foram suficientes para evitar a anaerobiose do processo. Devido a estes problemas, o processo de adição de resíduo orgânico foi encerrado antes do planejado.

A alta umidade e a falta de isolamento térmico foram determinantes para o não atingimento da fase termofílica, como previamente desejado (Figura 57).

Figura 57: Variação da temperatura dos compostos nos equipamentos de média escala

Apesar dos insucessos, o teste auxiliou na definição das principais características para o protótipo final, sendo: isolamento térmico, sistema de exaustão de ar, sistema de revolvimento ajustável (velocidade, tempo de agitação e tempo de parada) e sistema de aquecimento ajustável.

6.5 AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE OS INÓCULOS

Foram realizados 27 ensaios, para se avaliar 16 características em mais de 80 testes. Além disso, 38 amostras foram separadas e encaminhadas aos laboratórios do IPT para análises físicas, químicas e microbiológicas. Estas análises foram essenciais para a avaliação do composto orgânico final.

A Tabela 38 apresenta a análise dos ensaios de cada inóculo, que tiveram melhor resultado. Os resultados em vermelho mostram os resultados em desacordo ao estabelecido pela IN nº 25/2009 (MAPA, 2009).

Tabela 38: Análise comparativa dos diferentes inóculos

Inóculo	Amostra	Atingiu fase termofílica	Umidade do composto ^a	Aparência final ^b	Concentração de fungos, bactérias e leveduras ^c	pH ^d	Umidade ^e	C/N ^f
Serapilheira	C1 1S	15° Dia	Bom	Bom	+++	8,2	41,9 %	30,3
Bokashi	C2 2S	Não	Ruim	Ruim	++	-	-	-
Embiotic	C2 4C	Não	Ruim	Ruim	++++	8,1	56,7 %	42,5
EM + Bokashi	C1 1C	Não	Bom	Bom	+++	8,9	74,1 %	-
Serapilheira Novo	C1 5C	Não	Bom	Bom	+++	8,4	21,7 %	16,2
EM Novo	C1 3C	14° Dia	Bom	Bom	++++	9,4	15,4 %	10,7

- a) Teste da mão (SENAR);
- b) presença ou não de resíduo orgânico em decomposição;
- c) ++++ melhor concentração de bactérias, fungos e leveduras;
- d) pH mínimo de 6,0, conforme recomendação do MAPA para fertilizante misto/composto;
- e) umidade máxima de 50%, conforme recomendação do MAPA para fertilizante misto/composto;
- f) relação C/N máxima de 20, conforme recomendação do MAPA para fertilizante misto/composto;

Como apresentado na Tabela 38, conseguiu-se aperfeiçoar os ensaios com o passar do tempo, atingindo-se bons resultados em praticamente todas as variáveis acompanhadas nas amostras finais dos ensaios com os inóculos Serapilheira e EM. Os resultados em vermelho mostram os resultados em desacordo ao estabelecido pela IN nº 25/2009 (MAPA, 2009), referente à umidade e C/N.

7. CONCLUSÕES

A presente pesquisa buscou avaliar o comportamento de diferentes inóculos no processo de compostagem, assim como a alternância de parâmetros de processo e conformações de equipamentos. Tais parâmetros foram alternados objetivando um modelo de compostagem rápida, simples e eficiente, na obtenção de um composto orgânico, que se enquadrasse na categoria de fertilizante misto/composto, segundo a IN nº25/2009 (MAPA, 2009).

Partindo-se das análises microbiológicas, foi constatado que todos os inóculos utilizados para acelerar o processo de compostagem apresentaram potencial semelhante de degradação do material orgânico. Foi evidenciada a atividade enzimática de celulase, amilase, lipase e peptidase, por meio de incubação em meio seletivo e/ou diferencial, a partir da suspensão de cada inóculo, sendo assim confirmado pelas análises do IPT (IPT, 2017).

Destaca-se a comparação entre as concentrações de microrganismos encontradas nos inóculos EM produzido com o arroz e o Embiotic®, este último considerado como o composto de microrganismos eficientes industrializado. A concentração tanto de bactérias quanto a de fungos e leveduras é muito próxima entre esses inóculos, indicando que o EM produzido naturalmente por meio da armadilha com o arroz cozido é tão potente quanto o EM comercial, sendo uma opção mais econômica para ser obtida e utilizada em processos de compostagem.

As concentrações de microrganismos apresentadas nos inóculos EM de arroz e Serapilheira, apesar de não serem as maiores dentre os inóculos analisados, são as que apresentam maior equilíbrio entre as populações de microrganismos, isto é, maior variabilidade de organismos que atuam em conjunto na decomposição do alimento. Portanto, pela análise das concentrações de microrganismos presentes nos inóculos testados nesta pesquisa, destaca-se a utilização da Serapilheira e do EM do arroz para um processo de compostagem acelerada, devido às características presentes nestes compostos citadas anteriormente.

Ainda que alguns resultados da análises físicas e químicas estejam em não conformidade com a Instrução Normativa nº25/2009 do MAPA, utilizada como referência às exigências para fertilizantes orgânicos mistos e compostos, em relação ao pH, teor de umidade e relação C/N, os mesmos auxiliaram na definição de mudanças nos equipamentos e processo para obter melhores resultados, como a permanência da aeração forçada, injeção de calor forçado e redução do uso de serragem. Após estas mudanças, tanto a aparência física do composto obtido, quanto suas análises físicas e químicas mostraram o resultado pretendido esperado para compostagem.

Novamente, os últimos ensaios realizados com Serapilheira e EM apresentaram todos os parâmetros de pH, umidade e C/N dentro da IN nº25/2009 do MAPA, reforçando a

necessidade de um sistema eficiente de aeração e aquecimento externo, para equipamentos de baixo volume e alimentação diária.

Nos experimentos de bancada e nas análises diárias visuais de degradação, umidade, geração de percolado e odor, ficou nítida a dificuldade de se compostar resíduo orgânico em ambiente fechado e de baixo volume, onde a temperatura e carga inicial de microorganismos decompositores são baixas. Como comentado anteriormente, comprovou-se a necessidade de adaptações nos equipamentos para melhorar a qualidade do composto, mesmo para o equipamento de volume médio (bombona de 200 litros).

Nos experimentos em caixas plásticas e isopor, as amostras com os inóculos EM e Serapilheira apresentaram melhores resultados, tanto na umidade (teste da mão), quanto decomposição (visual). Os experimentos indicaram aumento de temperatura, porém apenas a Serapilheira atingiu a faixa da fase termofílica (acima de 45°C).

A interpretação integrada dos resultados analíticos enviados pelos laboratórios do IPT juntamente com os outros parâmetros observados, e que influenciam o processo de compostagem, permitiu identificar os inóculos Serapilheira e EM como os ideais ao modelo de processo objetivado, bem como a necessidade de se trabalhar sistemas automatizados, com os controles necessários: isolamento térmico, sistema de aquecimento, com ajuste fino, sistema de aeração / revolvimento e sistema de exaustão.

Desta forma, é possível desenvolver processos de compostagem acelerados em espaços pequenos e com a obtenção de composto orgânico de boa qualidade, atendendo uma demanda presente em todas as cidades brasileiras, a gestão correta dos resíduos orgânicos e uma maior preocupação com a saúde de todos os seres vivos.

Diante das observações realizadas ao longo da elaboração deste trabalho e dos resultados obtidos, cabe ressaltar algumas recomendações para eventuais estudos a serem realizados:

- avaliar a produção e aplicação direta de enzimas para acelerar o processo de compostagem.
- realizar os testes com todos os resíduos gerados num restaurante e avaliar a adição de carbono e enzimas.
- avaliar outros parâmetros de qualidade do composto final para atender exigências do MAPA e de comercialização.
- o uso de equipamentos pequenos, sem a adição externa de calor, não apresentou boas taxas de compostagem e aquecimento. O baixo volume de alimento, serragem (carbono) e inóculo não forneceram estrutura suficiente para se atingir a fase termofílica.
- desenvolver novos equipamentos automatizados - com controle de temperatura, agitação e exaustão – com materiais leves e baratos, compactos e ergonômicos.
- o protótipo desenvolvido saiu a um custo aproximado de R\$ 15.000, considerando apenas os custos dos materiais.

8. REFERÊNCIAS

ANDRADE, A. G.; TAVARES, S. R. L.; COUTINHO, H. L. C. **Contribuição da serapilheira para recuperação de áreas degradadas e para manutenção da sustentabilidade de sistemas agroecológicos.** Informe agropecuário, Belo Horizonte, v. 24, n. 220, p. 55-63, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10004. Resíduos sólidos. classificação.** São Paulo, 1987.

AUTORIDADE MUNICIPAL DE LIMPEZA URBANA (AMLURB), do município de São Paulo, 2014. Disponível em: <<http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/regionais/amlurb/formularios/index.php?p=4631>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

BARREIRA, Luciana Pranzetti; PHILIPPI, Arlindo Junior; RODRIGUES, Mario Sergio. **Usinas de compostagem do Estado de São Paulo: qualidade dos compostos e processos de produção.** Artigo técnico: maio de 2006.

BRASIL. Lei n. 12.305 de 2 de Agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei n. 9605 de 12 de Fevereiro de 1998; e da outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 3 Ago. 2010 Seção 1 p.3.

CLIMATE AND CLEAN AIR COALITION MUNICIPAL SOLID WASTE INITIATIVE (CCAC MSWI). **Evaluation and recommendation report of the pilot composting plant in the Lapa District of the city of Sao Paulo.** São Paulo, 2016.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE (FUNASA). **Lixo e Saúde**, 2013. Disponível em: <http://www.funasa.gov.br/site/wp-content/files_mf/cart_lixo_e_saude_2.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2018.

GLOBAL FOOTPRINT NETWORK. **Living Planet Report**, 2014

HANISCH, C. **Is Extended Producer Responsibility Effective?** Environ Sci Technol, 34 (7), 2000.

HIGA, T.; PARR, J.F. **Beneficial and Effective Microorganisms for a Sustainable Abiculture and Environment.** Atami, Japão: International Nature Farming Research Center, 1994.

HIGA, T.; WIDIDANA, G. N. **The concept and theories of effective microorganisms.** p. 118-124. In Parr, S.B. Hornick, and C.E. Whitman (ed.) Proceedings of the First International Conference on Kyusei Nature Farming. U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C., USA, 1991.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos**: Relatório de Pesquisa. Brasília: IPEA, 2012.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). **Relatório Técnico**. São Paulo, 16 de maio de 2017. N° 150 287-205.

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

LOPEZ-REAL JM. **Agroindustrial waste composting and its agricultural significance**. Proceedings of the Fertilizer Society, 1990.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). **Instrução Normativa nº25/2009**, de 23 de julho de 2009. Normas sobre as especificações e as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos fertilizantes orgânicos simples, mistos, compostos, organominerais e biofertilizantes destinados à agricultura. Brasília: MAPA, 2009.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Política Nacional de Resíduos Sólidos**, 2010. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/pol%C3%ADtica-de-res%C3%ADduos-s%C3%B3lidos>. Acesso em maio de 2018.

MUGICA, Yerina; SPACHT, Andrea. **San Francisco Composting from fork to farm and back**. Food waste case study: empower cities to prevent, rescue, and recycle, 2017.

OLIVEIRA, E. C. A.; SARTORI, R.H.; GARCEZ, T. B. **Compostagem**. Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura Luiz de Quieroz. Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas. Piracicaba, 2008.

organisation for economic co-operation and development (OECD). **Extended Producer Responsibility (EPR) (Output area 2.3.4)**. Disponível em: <http://www.oecd.org/env/waste/factsheetextendedproducerresponsibility.htm>. Acesso em maio de 2018.

PEREIRA NETO, J. T. **Manual de Compostagem – Processo de baixo custo**. Belo Horizonte: Fundo das Nações Unidas para a Infância, UNICEF, 1996.

PREFEITURA DE SÃO PAULO (PMSP) - Secretaria do Verde e Meio Ambiente. Associação Nacional de Transportes Públicos - ANTP. **Apresentação do Inventário de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa do Município de São Paulo para o período de 2003 – 2009**. São Paulo: SVMA 2011. Disponível em: http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/meio_ambiente/menu/index.php?p=167735. Acesso em 20 mar. 2018

RODRIGUES, M. S.; SILVA, F. C.; BARREIRA, L. P; KOVACS, A. **Compostagem: reciclagem de resíduos sólidos orgânicos**. In: Spadotto, C.A.; Ribeiro, W. Gestão de Resíduos na agricultura e agroindústria. FEPAF. Botucatu. p. 63-94, 2006.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM RURAL (SENAR). **Programa Olericultura Orgânica: Compostagem, Módulo II**. São Paulo, 2012.

SÃO PAULO. **Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos da Cidade de São Paulo (PGIRS)**, 2014. Disponível em <
<http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/servicos/arquivos/PGIRS-2014.pdf>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

SHIRALIPOUR, Aziz; MCCONNELL, Dennis B.; SMITH, Wayne H.. **Uses and benefits of MSW compost: A review and an assessment**. Department of Environmental Horticulture and Center for Biomass Energy Systems, University of Florida, Gainesville, FL 32611, U.S.A, 1992.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). **Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2016**. Brasília, março de 2018.

STENSTRÖM, Maria; RITCHEY, Tom. **Scenarios and Strategies for Extended Producer Responsibility**. Adapted from a report to the Swedish Ministry of the Environment. April, 2004.

TEIXEIRA, L.B.; OLIVEIRA, R.F. de; FURLAN JUNIOR, J.; CRUZ, E. de S.; GERMANO, V.L.C. **Compostagem de lixo orgânico urbano no município de Barcarena**, Pará. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2000. 25p. (Embrapa Amazônia Oriental. Documentos, 59).

WORLDWATCH INSTITUTE (WWI). **Global Municipal Solid Waste Continues to Grow**. Disponível em: < <http://www.worldwatch.org/global-municipal-solid-waste-continues-grow-0>>. Acesso em 20 mar. 2018.

WORLD HEALTH STATISTICS (WHS). **Monitoring health for the SDGs, sustainable development goals**. Disponível em: <http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/272596/9789241565585-eng.pdf?ua=1&ua=1>. Acesso em 01 out. 2018.

ZUCCONI F & BERTOLDI M. **Composts specifications for the production and characterization of composts from municipal solid waste**. In Compost: production, quality and use, M de Bertoldi, M.P. Ferranti, P.L'Hermite, F.Zucconi eds. Elsevier Applied Science, London, 30-50 p, 1986.