

Compostagem

Ciência e prática para a gestão de resíduos orgânicos

Caio de Teves Inácio

Paul Richard Momsen Miller



S210
R210
S620
R620

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Solos
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Compostagem

Ciência e prática para a gestão de resíduos orgânicos

Autores

*Caio de Teves Inácio
Paul Richard Momsen Miller*

***Embrapa Solos**
Rio de Janeiro, RJ
2009*

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Solos

Rua Jardim Botânico, 1024
CEP 22460-000 Rio de Janeiro, RJ
Tel: (21) 2179-4500
Fax: (21) 2274-5291
www.cnps.embrapa.br
sac@cnps.embrapa.br

Universidade Federal de Santa Catarina

Departamento de Engenharia Rural
Centro de Ciências Agrárias
Rod. Ademar Gonzaga, 1346
CEP 88034-001 Itacorubi-Florianópolis, SC

Supervisão editorial

Jacqueline Silva Rezende Mattos

Revisor Técnico

Fernando Fernandes, D.Sc.
Professor Associado, Universidade Estadual de Londrina (UEL)

Revisão de Língua Portuguesa

André Luiz da Silva Lopes

Normalização bibliográfica

Ricardo Arcanjo de Lima

Capa

Eduardo Guedes de Godoy

Tratamento das ilustrações

João Teves (Nitchol)

Editoração eletrônica

Jacqueline Silva Rezende Mattos
Rodrigo Lima Solís

1ª edição

1ª impressão (2009): tiragem 2.000 exemplares

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Embrapa Solos

135c Inácio, Caio de Teves.

Compostagem : ciência e prática para a gestão de resíduos orgânicos / Caio de Teves Inácio e Paul Richard Momsen Miller. — Rio de Janeiro : Embrapa Solos, 2009.

156 p.: il.

ISBN 85-85864-31-6

1. Compostagem. 2. Resíduos orgânicos. 3. Uso agrícola. I. Miller, Paul Richard Momsen. II. Título.

CDD (21.ed.) 631.8

© Embrapa 2009

Autores

Caio de Teves Inácio, Ms.C.
Pesquisador da Embrapa Solos
Centro Nacional de Pesquisa de Solos

Paul Richard Momsen Miller, Ph.D.
Professor Associado do Departamento de Engenharia Rural,
Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Santa
Catarina (UFSC)

*Agradecemos o apoio de nossas famílias e amigos e
a todos os alunos e ex-alunos do pátio de compostagem da UFSC.*

Apresentação

É provável que a prática de compostagem, ou práticas similares, tenham surgido junto com os primeiros cultivos agrícolas feitos pelo homem. No entanto, foi no século XX que o agrônomo britânico *sir* Albert Howard sistematizou e apresentou para o Ocidente a compostagem que ele observou e aprendeu quando trabalhou na Índia, nas décadas de 20 e 30. Dois importantes títulos de Howard - *The Waste Products of Agriculture* (1931) e *An Agricultural Testament* (1939) - difundiram o método de compostagem nos países do Ocidente. A compostagem chega agora ao século XXI na condição de uma tecnologia de enorme potencial para a gestão de resíduos orgânicos, mas ainda negligenciada por muitos profissionais. Pesquisas sobre o processo de compostagem e o efeito de seu produto final, o composto orgânico, na agricultura e nos solos permearam o século XX. O processo de compostagem e as propriedades do composto foram estudados de forma científica principalmente a partir de 1930, podendo-se citar alguns livros e artigos referenciais tais como Waksman (1939), Jeris e Regan (1973), Gotaas (1956), Poincelot (1975), Stevenson (1982), Haug (1993) e muitos outros. No Brasil, o livro "Fertilizantes Orgânicos" lançado em 1987, pelo professor Edmar José Kiehl, foi um dos pioneiros a se dedicar à compostagem, seguido de outros que contribuíram para disseminar esta técnica no Brasil, como Pereira Neto (1996), com trabalhos na área de compostagem de lixo, e o grupo do Prof. Fernando Fernandês (1999) na compostagem de lodo de esgoto. Em 1993, Frederick C. Miller publicou a excelente revisão intitulada *Composting as a Process Based on the Control of Ecologically Selective Factors*, na qual chama a atenção para "um racional entendimento da ecologia da compostagem". Nos EUA, Eliot Epstein lança em 1997 *The Science of Composting*, livro abundante em informações que discute a compostagem profundamente a partir de pesquisas de diversos autores.

Este livro se destina a ajudar a promover o conhecimento sobre compostagem no Brasil e difundir técnicas de baixo custo e capazes de serem adaptadas as mais diversas condições, em regiões, cidades e propriedades agrícolas deste país. Aqui cabem parênteses: não estamos falando de "usinas de compostagem", dessas que se espalharam pelo país e resultaram, em geral, em péssimas experiências (isto também aconteceu nos EUA). Encaramos a compostagem como uma técnica de extrema utilidade para a gestão de resíduos orgânicos dos centros urbanos e indústrias (principalmente agroindústrias), além de sua relevante utilidade agrícola.

De fato, a compostagem será indispensável para o desenvolvimento sustentável. Ela representa a reciclagem dos nutrientes que nos alimentam, da matéria orgânica que

mantém os solos vivos e produtivos, e a possibilidade de que esta reciclagem ocorra entre o campo e a cidade (e as indústrias) de maneira ampla e benéfica. Sendo assim, precisamos insistir e melhorar o nosso conhecimento e nossa prática sobre compostagem, métodos de avaliação e monitoramento da qualidade dos resíduos capazes de produzir compostos de alto valor agrônomo e ambientalmente seguros.

Centros urbanos, indústrias de papel, centrais de abastecimento, a agricultura e a criação de animais são exemplos de grandes geradores de resíduos orgânicos, que podem ser "compostados", desde não contenham eventuais contaminantes que possam prejudicar a qualidade do produto final. E isto já acontece, mas não na escala necessária. É uma questão de eficiência ecológica reciclar esses resíduos orgânicos através da compostagem, não só pelos benefícios do uso agrícola do composto, mas também pelos benefícios quando consideramos que estamos todo dia enviando para aterros e lixões toneladas de resíduos fontes metano (gás do efeito estufa), efluentes poluentes, e que atraem vetores de doenças. Na agricultura baseada nos adubos químicos solúveis, o aproveitamento benéfico dos resíduos orgânicos e da compostagem acabou minimizado, resultando, por exemplo, na poluição de rios por esterco das criações de suínos. Essa minimização da importância da compostagem e da matéria orgânica gerou empobrecimento dos solos e lavouras mais suscetíveis a pragas e doenças dependentes do uso intensivo de agrotóxicos.

Esforços foram concentrados para o tratamento dos lodos de esgoto através da compostagem para uso agrícola. Cabe aqui ressaltar o título Impacto Ambiental do Uso Agrícola do Lodo de Esgoto, de autores brasileiros, publicado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Resíduos como os lodos têm alto potencial para a compostagem, mas também requerem análises complementares para seu uso seguro na agricultura. A compostagem ainda é superficialmente conhecida por biólogos, engenheiros, químicos e agrônomos. E, também, minimamente aplicada pelo poder público ou empresas privadas. Muitos métodos usados e difundidos no Brasil resultam em processos problemáticos, principalmente a respeito de odores desagradáveis. Apesar de plenamente evitável através de técnicas de manejo e conhecimento mais aprofundado do processo de compostagem.

O ponto de partida deste livro foi a experiência reunida pelos autores na condução do pátio de compostagem da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, em Florianópolis, Estado de Santa Catarina. O projeto de Coleta Seletiva e Compostagem de Resíduos Urbanos foi iniciado em 1994 nas dependências do Centro de Ciências Agrárias - CCA. Logo se expandiu para todo o campus

recolhendo resíduos orgânicos dos restaurantes, refeitórios e do biotério central. O pátio de compostagem tornou-se um laboratório a céu aberto, formando alunos, servindo de objeto para pesquisas e de modelo para observação e replicação. O modelo deste projeto piloto baseado na técnica de "leiras estáticas com aeração passiva", aperfeiçoado para tratar restos de alimentos, alcançou êxito e foi replicado para outros municípios, empresas e para Centrais de Abastecimento.

Complementar a toda a experiência adquirida no projeto da UFSC, este livro reúne o conhecimento presente em fontes e trabalhos científicos relevantes, nacionais (incluindo de pesquisadores da EMBRAPA) e estrangeiros, que foram profundamente estudados e seus assuntos relacionados com a prática conhecida. Atualmente a EMBRAPA SOLOS mantém variados projetos de pesquisa e difusão da compostagem financiados pela FAPERJ - Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro e pela FINEP - Financiadora de Estudos e Projetos.

Apesar deste livro se concentrar na descrição, discussão e entendimento da compostagem como um processo baseado na ecologia microbiana, discutem-se também a aplicação da compostagem como instrumento da gestão de resíduos e a utilização do composto na agricultura.

Concentramos nosso esforço em descrever de forma mais clara possível a relação entre aspectos científicos e práticos da compostagem de forma a permitir um entendimento facilitado, mas sem superficialidades exageradas, que levem a difusão da compostagem como ferramenta essencial da gestão de resíduos orgânicos na agricultura, no meio urbano e nas indústrias, direcionada para a produção de adubos orgânicos como produto final.

Os autores

Sumário

Apresentação	31
--------------------	----

CAPÍTULO 1

A COMPOSTAGEM NA GESTÃO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS

1.1. Introdução	15
1.2. Gestão de resíduos urbanos	18
1.2.1. A fração orgânica como alvo da reciclagem	19
1.2.2. Bases e estratégias	20
1.3. Compostagem de lodos de esgoto	21
1.4. A Gestão de resíduos agrícolas e agroindustriais	23
1.4.1. Classificação dos resíduos sólidos segundo normas brasileiras	24
1.4.2. Serviço ambiental da propriedade rural pela compostagem	25
1.4.3. A compostagem no meio rural: utilização do composto e avanços técnico-científicos na agricultura	27

CAPÍTULO 2

CONCEITOS BÁSICOS E MICROBIOLOGIA DA COMPOSTAGEM

2.1. O processo de compostagem	31
2.2. Resíduos orgânicos para compostagem	36
2.3. Transformações bioquímicas	37
2.4. Dinâmica microbiana	43
2.4.1. Grupos microbianos	46
2.5. Oxigênio	49
2.6. Umidade	50
2.7. Relação Carbono/Nitrogênio e outros nutrientes	52
2.8. Granulometria	53
2.9. pH	54

CAPÍTULO 3

MÉTODOS DE COMPOSTAGEM

3.1. Introdução	55
3.2. Compostagem com revolvimento de leiras	56
3.3. Leiras estáticas com aeração forçada	57
3.4. Compostagem em sistemas fechados ("reatores")	59
3.5. Leiras Estáticas com Aeração Passiva (Método UFSC)	61
3.6. A escolha de um método de compostagem	68

CAPÍTULO 4

CONTROLE DOS FATORES ECOLÓGICOS EM LEIRAS ESTÁTICAS DE COMPOSTAGEM

4.1. Introdução	73
4.2. Produção e transferência de calor	75
4.3. Balanço hídrico	80
4.4. Suprimento de oxigênio	83
4.5. As características dos resíduos influenciando o manejo da compostagem	90

CAPÍTULO 5

ASPECTOS AMBIENTAIS

5.1. Introdução	97
5.2. A observação das leiras de compostagem	98
5.3. Controle de moscas	100
5.4. Geração de chorume (percolado)	103
5.5. Emissão de odores	105
5.6. Eliminação de organismos patogênicos (saúde humana)	108
5.7. Efeitos sobre metais pesados	112
5.8. Degradação de poluentes orgânicos	118
5.9. Segurança e saúde ocupacional	119

CAPÍTULO 6

PROJETO DO PÁTIO DE COMPOSTAGEM

6.1. Introdução	121
6.2. Escolha do local	121
6.3. Solo e drenagem do terreno	123
6.4. Tratamento de efluentes	125
6.5. Controle tecnológico	128

CAPÍTULO 7

BENEFÍCIOS DO COMPOSTO ORGÂNICO PARA USO AGRÍCOLA

7.1. Introdução	131
7.2. Estabilidade e maturidade do composto	132
7.3. Fonte de nutrientes	133
7.4. Substâncias húmicas	137
7.5. Supressão de fitopatógenos	137
7.6. Considerações finais sobre o papel da compostagem e o uso do composto nos solo	140

CAPÍTULO 8

A FRAÇÃO ORGÂNICA COMO ALVO DA COLETA SELETIVA - ESTUDO DE CASO

8.1. Introdução	141
8.2. Histórico do município	141
8.3. O sistema de gestão de resíduos	142
8.4. Os números da reciclagem orgânica	143
8.5. Problemas solucionados	143
8.6. Outros resultados alcançados	144
8.7. Conclusão do estudo de caso	144

A compostagem na gestão de resíduos orgânicos

1

Capítulo

Caio de Teves Inácio
Paul Richard Momsen Miller

1.1 Introdução

A compostagem¹ de resíduos orgânicos gera um benefício como produto final, o composto orgânico para uso agrícola, constituindo-se num processo que possibilita o cumprimento dos itens considerados fundamentais no conceito de desenvolvimento sustentável para o eficiente tratamento e disposição de resíduos sólidos: (a) Minimização de impactos ambientais; (b) Minimização de rejeitos; (c) Maximização da reciclagem.

Reciclar nutrientes e matéria orgânica para os solos agrícolas são benefícios diretos proporcionados pela compostagem de resíduos orgânicos, de qualquer origem, desde que não contêm poluentes que possam contaminar o solo. Outros benefícios se relacionam com impactos ambientais diretos e indiretos oriundos da disposição, ou uso como insumo agrícola, de certos resíduos orgânicos. Com o uso do composto orgânico, pode-se reciclar uma gama

macronutrientes² e micronutrientes³, que em princípio foram extraídos pelas colheitas agrícolas. Esses elementos são essenciais para as plantas e sua reciclagem pode proporcionar a substituição ou a redução na necessidade do uso de fertilizantes minerais. A concentração desses nutrientes no produto final é variável em função da origem dos resíduos utilizados na compostagem. A reciclagem de matéria orgânica, isto é, carbono orgânico para o solo, traz benefícios múltiplos à capacidade produtiva do solo melhorando sua estrutura, aeração, drenagem e capacidade de reter e disponibilizar água as plantas. Lembrando que os solos sob cultivo tendem a perder fração significativa desta forma de carbono. Uma parcela de 5 a 10% dessa matéria orgânica se apresenta na forma de substâncias húmicas (ácidos húmicos, ácidos fúlvicos e humina) que desempenham papel importante na capacidade de troca de cátion do solo e, ainda, são

¹ Ver definições no Capítulo 2.

² Nitrogênio, Fósforo e Potássio; e os nutrientes secundários Cálcio, Magnésio e Enxofre.

³ Boro, Cloro, Cobalto, Cobre, Ferro, Manganês, Molibdênio, Zinco.

substâncias bioativas que "estimulam o crescimento e o desenvolvimento do sistema radicular das plantas" (CANELLAS, 2005, p.224). O composto orgânico possui ainda efeito supressivo em algumas doenças de plantas cujos agentes sobrevivem no solo devido à larga variedade e quantidade de microrganismos presentes na massa do composto.

Mas além desses efeitos diretos da compostagem e do uso do composto orgânico na agricultura, pode-se destacar benefícios ambientais como: (a) redução da poluição de recursos hídricos; (b) aumento da vida útil de aterros sanitários; (c) mitigação de emissões de metano oriundo da disposição de resíduo urbanos. Definitivamente, a compostagem deve ser encarada como uma biotecnologia ambiental. Os benefícios da escolha da compostagem como estratégia fundamental para compor o gerenciamento de resíduos orgânicos, seja no ambiente urbano ou rural, ou sejam tais resíduos oriundos de grandes geradores como agroindústrias ou complexos industriais, são de tal forma abrangentes e robustos que não seria mais coerente mantê-los enquadrados apenas como aquela "antiga técnica agrícola para aproveitar os esterco e restos vegetais nas pequenas propriedades agrícolas". Encarar a compostagem como uma biotecnologia ambiental significa colocá-la nos mais variados currículos técnicos e superiores, e inseri-la de forma consistente nos programas e planos de gestão de empresas e governos.

É também, apresentá-la como uma oportunidade de negócio para área privada, que vai da prestação de serviço à produção e comercialização de insumos para agricultura, reflorestamentos e paisagismos. A compostagem, sendo uma biotecnologia ambiental, traz soluções integradas para problemas rurais e urbanos representando um elo de benefícios mútuos.

Diversas atividades e setores da economia geram grandes quantidades de resíduos sólidos orgânicos. Um exemplo são os restos de alimentos da fração orgânica dos resíduos urbanos (restaurantes e CEASA's), subprodutos de matérias primas de origem vegetal ou animal de agroindústrias, lodos de tratamento de esgotos, lodos de tratamento de efluentes de indústrias de alimentos, sobras das indústrias madeireiras, lodos e resíduos da indústria de papel e celulose, resíduos de podas urbanas, dejetos animais e restos de culturas agrícolas no meio rural (Figura 1.1). Estes são exemplos de materiais que podem ser incluídos em um programa de gerenciamento de resíduos baseado no aproveitamento e tratamento por métodos de compostagem.

Os resíduos orgânicos são biodegradáveis, isto é, se decompõem por ação microbiológica e de pequenos animais e invertebrados quando dispostos no ambiente natural. Nem por isso podemos concluir que são resíduos que não merecem grande atenção quanto aos

potenciais impactos ambientais e para a saúde. A fração orgânica dos resíduos urbanos é responsável pela geração de impactos ambientais importantes em áreas de aterros sanitários e depósitos irregulares, e impactos à salubridade dos ambientes urbanos pela atração de vetores de doenças. Os dejetos de animais no meio rural constituem uma fonte de poluição dos recursos hídricos e são meio de proliferação de moscas. Os subprodutos de origem animal ou vege-

tal das agroindústrias se igualam aos dejetos quanto aos potenciais de poluição. E, os lodos de esgoto, além do potencial poluidor e de transmissão de doenças, representam custos elevados nos sistemas urbanos de tratamento. Veremos adiante como o papel fundamental das técnicas de compostagem na gestão de alguns desses resíduos, com ênfase em novas estratégias de gerenciamento, métodos e resultados robustos e promissores.

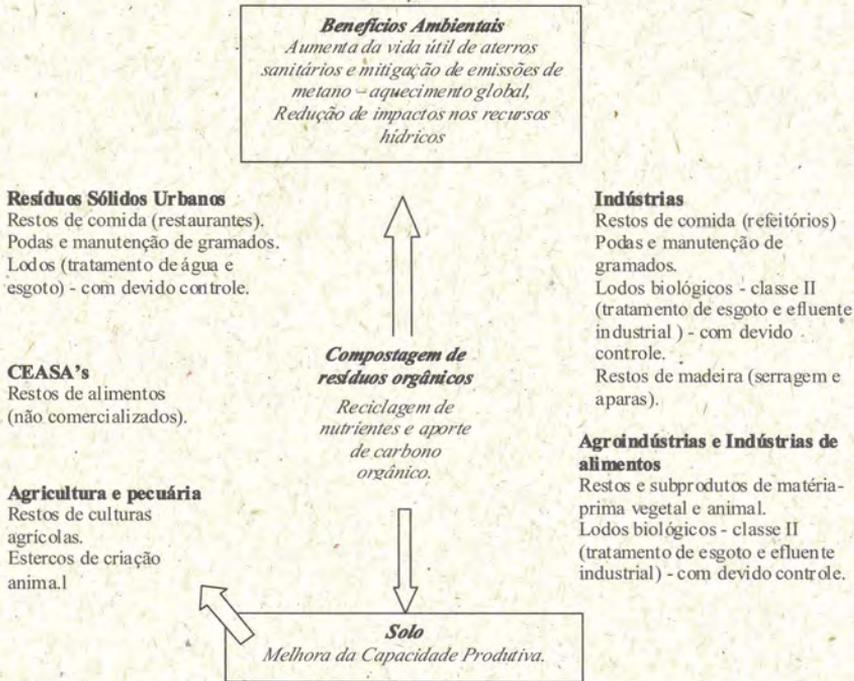


Figura 1.1 - Setores grandes geradores de resíduos orgânicos que podem ser gerenciados (tratados e aproveitados) pela aplicação de métodos de compostagem e identificação dos benefícios diretos aos solos agrícolas e os benefícios ambientais gerais.

1.2 Gestão de resíduos urbanos

O principal desafio do gerenciamento de resíduos urbanos é reciclar a maior quantidade possível de resíduos para reduzir de modo significativo a quantidade a ser disposta nos aterros. Isto aumentaria a vida útil dos aterros e diminuiria seus custos operacionais. Neste sentido, a principal estratégia tem sido a ênfase na reciclagem de embalagens.

Apesar desses esforços, na realidade brasileira, uma pequena parte é efetivamente reciclada e os aterros, sanitários ou não, recebem grande quantidade de resíduos recicláveis - incluindo a fração orgânica representada pelos restos de alimentos. Aterros sanitários são necessários e representam um investimento alto para os municípios. Além disso, tendem a ter um custo relativo maior para as pequenas cidades. Modelos de coleta seletiva de recicláveis também têm apresentado custos elevados por tonelada coletada o que por vezes inibe a adoção desses sistemas. Exemplos de métodos mal sucedidos de compostagem de resíduos orgânicos também são comuns. No entanto, novos métodos de compostagem de baixo custo em aplicação no Brasil têm demonstrado eficiência e, em consequência, permitido o aumento da reciclagem municipal em curto espaço de tempo.

O gerenciamento de resíduos urbanos tem se concentrado em programas de coleta seletiva, no reaproveitamento e/ou geração de tecnologias de reciclagem de

materiais como vidro, papel, plásticos, alumínio entre outros, que representam 12 a 13% do total gerado. Segundo Costa (1996), pequena fração destes materiais é realmente reciclada, apesar da existência de tecnologias de reciclagem relativamente econômicas para a maioria das classes de resíduos. A fração orgânica dos resíduos sólidos domésticos (RSD) representa em peso de 45 a 60% do total coletado. É esta fração que disposta em aterros gera grandes volumes de chorume e gás metano, além de atrair vetores de doenças.

Os aterros sanitários são um componente essencial de disposição final num sistema de gestão de resíduos urbanos. No entanto, Mähler (2002) cita que apenas 10% dos resíduos sólidos coletados são depositados em aterros sanitários dotados de impermeabilização de base, sistemas de tratamento de efluente (chorume), dispersão dos gases e confinamento dos resíduos sólidos pela cobertura diária com material inerte. As áreas adjacentes também sofrem com a desvalorização do valor dos imóveis e/ou terrenos. Não raramente a escolha de uma área para aterro sofre pressões fortes da sociedade da área de influência, o que resulta em aterros sanitários cada vez mais distantes das áreas de coleta, o que aumenta os custos de transporte dos resíduos.

Os aterros sanitários representam um investimento considerável para os municípios e têm vida útil curta, em média 20 anos. "A situação financeira dos muni-

cípios mostra que, quando relacionada à receita existente em cada um, os investimentos necessários para a implantação de um aterro sanitário são três vezes maiores para os municípios com menos de 10.000 habitantes, do que para as grandes aglomerações com mais de 200.000 habitantes" (SANTA CATARINA, 2003).

O município de Garopaba, no litoral de Santa Catarina a 80 km da capital Florianópolis, optou, em 2003, pela implantação de projeto denominado de Reciclagem Orgânica que possibilitou elevar os índices médios de reciclagem para cerca de 30% no primeiro ano de execução. A estratégia adotada consistiu na priorização da coleta seletiva da fração orgânica em grandes geradores e compostagem termofílica em pátios de baixo custo. O Capítulo 8 apresenta este estudo de caso detalhadamente. Esta alternativa de gerenciamento de resíduos foi desenvolvida pela Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, e tem sido aplicada com sucesso no campus universitário e em outros pequenos municípios do Estado e, também, pela CEASA - Central de Abastecimento de São José-SC. Este modelo de compostagem e coleta seletiva, ainda em sua fase piloto em 1998, já havia sido apontado e reconhecido, como "uma importante alternativa para gerenciamento municipal (...) para que haja a redução do volume de resíduos depositados em aterros e aumento da vida útil destes, bem como, o combate aos lixões" (INÁCIO et al., 1998).

1.2.1 A fração orgânica como alvo da reciclagem

A coleta seletiva deve ser priorizada em qualquer sistema municipal de tratamento e disposição de resíduos sólidos, e se apresenta como a única maneira de proporcionar o adequado acondicionamento das diferentes categorias de resíduos possibilitando que estes sejam mais facilmente destinados às suas respectivas operações de tratamento e reciclagem, diminuindo as perdas e os custos com o transporte e a separação em usinas (LEITE, 1995).

A coleta seletiva da fração orgânica é indispensável para que o seu tratamento através da compostagem constitua um modelo eficiente e econômico. O não cumprimento deste item exige a montagem de "usinas" de compostagem baseadas em esteiras e operações de separação, em geral com infra-estrutura onerosa. Este tipo de modelo leva a produção de um produto final de baixa qualidade com grande quantidade de partículas de materiais indesejáveis, possível contaminação com metais pesados e muitas vezes aspecto deplorável e mau cheiro. Quando a fração orgânica é separada na origem, nas residências, ela não se mistura com a fração inerte (vidro, plástico, papel) resultando num composto de bom aspecto e boa qualidade. As altas temperaturas (55°C a 85°C) atingidas durante o processo de transformação dos resíduos na compostagem garantem a ausência de patógenos comuns ao ho-

mem no produto final que será utilizado como condicionador de solo.

1.2.2 Bases e estratégias

A Reciclagem Orgânica é um modelo complementar de gerenciamento que tem as seguintes bases (Figura 1.2):

1. **ESTRATÉGIA** - Priorização da coleta seletiva da fração reciclável orgânica nos grandes geradores⁴ (restos de comida e das indústrias de alimentos e agroindústrias);

2. **BASE TECNOLÓGICA** - Compostagem em Leiras Estáticas com Aeração Passiva ou com Aeração Forçada;

3. **DESCENTRALIZAÇÃO** - O tratamento deve ser descentralizado com vários páti- os de compostagem para evitar gastos excessivos com o transporte do resíduo.

E tem como principais benefícios:

1. **RECICLAGEM** - Proporciona alto índice de reciclagem e conseqüente o aumento da vida útil dos aterros;

2. **COMPOSTO** - Gera um benefício; o composto orgânico para uso na agricultura e fertilização de parques e jardins municipais. A coleta seletiva da fração orgânica reduz os riscos de contaminação do composto, influenciando na qualidade do produto final.

3. **REDUÇÃO DA POLUIÇÃO** - Diminui a quantidade de matéria orgânica que vai para os aterros sanitários reduzindo a geração de chorume (percolado) e o odor desagradável, bem como, a geração de metano, um gás do efeito estufa.

A implantação e manutenção de projetos de coleta seletiva e compostagem dos resíduos orgânicos pode apresentar custos menores que as coletas convencionais/aterros e as coletas seletivas de recicláveis. O trabalho de Matusaki (1995) calculou os custos operacionais de um projeto piloto para cinco bairros da cidade de Florianópolis, e chegou a uma redução projetada de custos por tonelada de resíduos de cerca de 47% em comparação com a coleta convencional e deposição no aterro da cidade. Já Zambonim (1997) realizou uma análise de eficiência econômica dos projetos de compostagem do campus da UFSC e da Central de Abastecimento - CEASA, no município de São José/SC, e chegou a resultados de redução de 29,5% e 36,2%, respectivamente, nos custos por tonelada de resíduo em relação ao sistema convencional. Apesar de se tratarem de pequenos projetos com capacidade de compostagem entre 1,5 a 5,0 toneladas de resíduos orgânicos por dia, esses resultados são um indicativo do padrão de custos para projetos de compostagem de resíduos urbanos, con-

⁴ Por exemplo, a cidade do Rio de Janeiro adota a coleta extraordinária classificando como grandes geradores de resíduos aqueles com geração de mais de 120 litros ou 60 kg de resíduos por dia.



Figura 1. 2 - Diagrama de estratégias, base tecnológica e benefícios da reciclagem orgânica.

siderando a tecnologia empregada, nas condições econômicas do Brasil. O estudo de caso da implantação de um projeto de compostagem de resíduos urbanos em Garopaba/SC é descrito no Capítulo 8, e, também, demonstrou essa vantagem em relação aos custos operacionais.

Os resultados dos estudos dos diversos projetos, acima citados, demonstram que a coleta seletiva e compostagem da fração orgânica do lixo devem ser priorizadas em um plano de tratamento de resíduos sólidos que visa a redução em curto prazo da quantidade de detritos destinados aos aterros sanitários. A reciclagem orgânica constitui, ainda, uma estratégia de gerenciamento de resíduos com potencial de integração entre os setores da sociedade, propiciando maior conscientização da população e a divisão de responsabilidades referentes

ao controle da poluição urbana e ambiental. A compostagem é uma tecnologia que não exige investimentos altos e gera um produto benéfico, o composto orgânico. Este pode ser utilizado na produção de alimentos caracterizando a ciclagem de nutrientes entre o meio rural e urbano. A utilização do composto na agricultura representa um insumo importante e eficiente no controle biológico natural de doenças de plantas e substituição dos adubos industriais. A redução do uso de agrotóxicos em muito depende da utilização do composto orgânico.

1.3 Compostagem de lodos de esgoto

Os sistemas de tratamento de esgotos e outros efluentes com carga orgânica geram resíduos sólidos ao final do processo denominados lodos de esgoto ou simplesmente lodos biológicos. Segun-

do orientação da Water Environmental Federation - WEF, caso este material tenha uma composição predominantemente orgânica e possa ter uma utilização benéfica, estes resíduos devem ser denominados de Biossólidos (ANDREOLI; PEGORINI, 1998). A reciclagem agrícola desses biossólidos é uma das formas mais benéficas de se gerenciar esses resíduos por representar aporte de nutrientes e matéria orgânica ao solo, com reflexos na formação de agregados do solo, na capacidade de retenção de água e na redução do uso de fertilizantes industrializados (ANDREOLI; PEGORINI, 1998, citando várias fontes). No entanto, esta reciclagem agrícola de lodos deve seguir critérios técnicos de prevenção de impactos ambientais relacionados a metais pesados (elementos traço), excesso de nitrato e carga de fósforo, e presença de patógenos e helmintos (parasitas intestinais) no material que vai ao solo agrícola. O prognóstico no Brasil é de um aumento rápido da geração de lodos de esgoto com os novos investimentos em saneamento já previstos pelos governos municipais, estaduais e federal, ou seja, construção de redes de coleta de esgoto e estações de tratamento.

No Brasil, assim como nos EUA e Europa, existem normas ambientais que regulam a reciclagem agrícola de lodos de esgoto. Para nós a resolução CONAMA nº 375 (BRASIL, 2006) regula este

tema trazendo parâmetros e limites de concentração dos agentes potencialmente poluentes. Nossa resolução é baseada na norma 40 CFR 503 para reuso de biossólidos editada pela Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA, na sigla em inglês). Ambas as normas restringem a aplicação dos biossólidos a certas culturas agrícolas, excluindo a aplicação em campos de hortaliças, e indicam a compostagem termofílica como uma técnica de redução de patógenos da massa de lodo tratado. O município de Jundiaí produz 200 ton/dia de lodos de esgoto com 18% de sólidos e recicla 100% do material na agricultura após o tratamento pelo processo de compostagem termofílica. A compostagem deste lodo com fibras vegetais - bagaço de cana e podas urbanas trituradas - permitiu o enquadramento do produto final, o composto orgânico, como biossólido Classe A conforme a resolução CONAMA nº 375 (BRASIL, 2006) pela redução de ovos de helmintos viáveis e outros patógenos na massa do material⁵. Neste município a área de compostagem é coberta e o método inclui o revolvimento mecânico das leiras. A cobertura para evitar o aporte de água de precipitação é desejável para a compostagem de lodo devido à alta umidade desse material. O composto tem sido aplicado em áreas de café, cana-de-açúcar e eucalipto. Além do aporte de macronutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo, a aplicação

⁵ Dados apresentados pelo Eng.º. Agr.º. Fernando C. Oliveira no VI Simpósio Interamericano de Biossólidos, na palestra Manejo de Biossólidos das Lagoas Aeraças de Jundiaí/SP. ABES- RJ. Rio de Janeiro, 27-29 de agosto de 2008.

do composto produzido proporcionou maior capacidade de manutenção de níveis adequados de umidade no solo e, conseqüentemente, de água disponível para a planta cultivada. Este efeito sobre a umidade do solo é típico quando incorporamos ao solo várias toneladas por hectare de matéria orgânica estabilizada, como neste caso.

Segundo Fernandes⁶ (2008), a compostagem de lodos apresenta claras vantagens quanto a: (a) flexibilidade tecnológica, podendo empregar sistemas simples para as pequenas quantidades, até sistemas mais sofisticados para quantidades maiores de lodo; (b) permite usar o lodo com grau de estabilização variável, podendo inclusive processar lodos não estabilizados, se tomadas as precauções de controle de odor; (c) produção de biossólido Classe A, de acordo com a Resolução 375 do CONAMA, se o processo de compostagem for bem conduzido; (d) segurança sanitária já que o processo elimina os patógenos presentes no lodo; (e) fácil manuseio e transporte do produto final, em contraste com o lodo pastoso; (f) fixação de carbono, reciclagem e ausência de passivos, e (g) qualidade agroquímica (presença de substâncias húmicas). As limitações da compostagem de lodo estão relacionadas à necessidade de obtenção de materiais estruturantes, como palhas, serragem, podas urbanas trituradas, o

que implica em custos de transporte e manuseio para o gestor do lodo e na necessidade de monitoramento e controle do processo biológico. A aplicação de lodo de esgoto estabilizado pela via alcalina⁷ tem sido amplamente utilizada para viabilizar a reciclagem agrícola também no Estado do Paraná, região metropolitana de Curitiba (BITTENCOURT et al., 2008). Resultados de rendimento de lavoura comparando lodos estabilizados com cal e lodos compostados apontam para uma melhor resposta ao primeiro produto. Esta resposta pode estar relacionada ao maior teor de nitrogênio (N) na forma de nitrato (NO_3^-) comum aos lodos de esgoto ou mesmo ao efeito da própria cal, elevando o pH do solo. O lodo compostado tende a apresentar menor teor de nitratos em função da perda de nitrogênio em forma de amônia (NH_3) volatilizada durante o processo de compostagem e, também, pela conversão das formas solúveis de N em N-orgânico. O excesso de nitrato, altamente solúvel, no material aplicado ao solo leva a um maior risco de contaminação de águas superficiais e subsuperficiais.

1.4 A gestão de resíduos agrícolas e agroindustriais

Existem no meio rural várias fontes de geração de resíduos orgânicos, seja dentro da propriedade rural ou fora dela, de origem vegetal ou animal, seja de fonte agrícola, agroindustrial ou municipal.

⁶ Palestrante no VI Simpósio Interamericano de Biossólidos. ABES- RJ. Rio de Janeiro, 27-28 de agosto de 2008.

Esta abordagem se compatibiliza com a visão de microbacia hidrográfica com unidade de gestão de recursos hídricos, notadamente microbacias de forte economia agrícola. Gerenciar os resíduos orgânicos de forma adequada traz benefícios relacionados à prevenção da poluição de cursos d'água e solo, diminuição de foco de doenças para as lavouras e produção de adubos orgânicos para uso agrícola. A compostagem se constitui uma técnica importante para tratamento dos resíduos gerados no meio rural, apesar de pouco difundida entre agricultores no Brasil, a não ser entre agricultores orgânicos⁸.

O domínio da técnica por produtores rurais pode propiciar a reciclagem de resíduos oriundos da própria propriedade ou de agroindústrias e em certos casos até de cidades próximas. Neste caso, estaria se formando um serviço ambiental da propriedade rural baseado na compostagem de resíduos orgânicos de diferentes fontes.

A compostagem de restos vegetais e esterco de animais de criação é uma prática antiga utilizada por agricultores para acelerar a decomposição dos restos vegetais das lavouras e hortas como também para eliminar as sementes indesejáveis⁹

presentes no esterco, o que resultava em um adubo de melhor valor agrônômico. Com a modernização da agricultura e a difusão dos adubos químicos de alta solubilidade, a compostagem foi praticamente abandonada e esquecida pelos agricultores atuais.

1.4.1 Classificação dos resíduos sólidos segundo as normas brasileiras

A compostagem tem a possibilidade de tratar uma gama variada de resíduos orgânicos. Mesmo assim, quando nos referimos a resíduos agroindustriais e urbanos, é preciso se certificar sobre a origem destes resíduos para evitar qualquer risco de contaminação.

A Norma Técnica da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), NBR 10.004 - Resíduos sólidos classificação, divide os resíduos da seguinte forma:

Classe I - perigosos;

Classe IIa - não inertes;

Classe IIb - inertes.

Apenas os resíduos Classe IIa interessam à compostagem e mesmo assim sua

⁷ Processo de estabilização alcalina prolongada para higienização, o qual consiste na adição de cal e armazenamento mínimo de 30 dias, período em que o pH é mantido acima de 12. Utilizam-se misturas de cal virgem em dosagens de 30 a 50% em relação aos sólidos totais de lodo. O processo é eficiente na inativação dos ovos e larvas de helmintos (EPA, 1992; THOMAZ-SOCCOL et al., 1999; FERNANDES et al., 1996, citados por BITTENCOURT et al., 2008).

⁸ Agricultura Orgânica, Natural, Biodinâmica e outras correntes de agricultura alternativa.

composição deve ser conhecida, pois alguns resíduos nesta classe apresentam composição incompatível para produzir um composto de boa qualidade. Resíduos urbanos do tipo poda de árvores e capinas, ou resíduos agroindustriais do tipo bagaço de cana de açúcar, restos de madeira não tratada, palhas e resíduos de silos, são a priori sem contaminação e podem ser usados na compostagem. Outros resíduos de processos industriais (lodos de sistemas de tratamento de efluentes, madeira tratada, etc) dependem de análise química e monitoramento constante para que não impliquem em risco de contaminação indesejável. A compostagem destes resíduos também deve ter a autorização do Órgão Ambiental competente, que determinará as condições ambientalmente seguras para o processamento destes resíduos.

1.4.2 Serviço ambiental da propriedade rural pela compostagem

A gestão de resíduos orgânicos baseada na coleta e compostagem de resíduos orgânicos pode ser gerenciada pelas Associações de Produtores Rurais ou produtores independentes. Os produtores estariam ao mesmo tempo gerando um serviço ambiental e produzindo insumos importantes para sua agricultura, e, potencialmente, gerando renda e postos de trabalho, e aumentando sua competitividade (Figura 1.3).

O grande número de produtores rurais de hortaliças e grupos de agricultura orgânica presentes nas regiões produtoras de hortaliças (cinturões verdes) aponta para uma demanda potencial por composto orgânico, que tem amplo uso como fonte de nutrientes para as plantações e condicionador do solo. Soma-se a esse potencial a necessidade de municípios de pequeno e médio porte estarem buscando soluções para o destino de resíduos de podã e resíduos provenientes dos grandes distribuidores de hortaliças que absorvem a produção da região. Restaurantes e hotéis localizados no perímetro urbano desses municípios podem igualmente ser beneficiados pela coleta de seus resíduos orgânicos.

A difusão de métodos de compostagem de baixo custo e de técnicas de gerenciamento de pátios de compostagem e da coleta de resíduos orgânicos é uma estratégia que pode gerar grande impacto positivo, similarmente aos benefícios alcançados com gestão de resíduos urbanos baseada na reciclagem orgânica mostrada anteriormente.

Impactos esperados com a reciclagem orgânica integrada (urbano-rural-agroindústria):

a. Surgimento de um serviço ambiental gerenciado por Associações de Produtores, ou produtores individuais, com consequente geração de renda e postos

⁹ Sementes de plantas não cultivadas que competem adversamente com a cultura principal ("ervas daninhas").

de trabalho. A gestão dos resíduos orgânicos pode incluir uma unidade de compostagem centralizada ou várias unidades descentralizadas, conforme a viabilidade técnica e econômica, gerenciada pela Associação de Produtores.

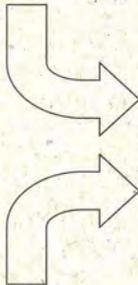
b. Maior reciclagem de resíduos orgânicos, tais como, podas, resíduos agrícolas, de hortaliças, e resíduos de agroindústrias gerados na região. Esta reciclagem tem como efeito melhorar a qualidade dos recursos hídricos - atingidos pela disposição.

c. Maior produção de composto orgânico de alta qualidade para uso agrícola. A oferta de tal insumo tem o potencial de aumentar a competitividade das propriedades rurais via manutenção da produtividade agrícola e visibilidade dos produtos orgânicos. O uso de composto orgânico tem o potencial de fazer a manuten-

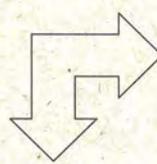
ção dos níveis de matéria orgânica nos solos agrícolas, e consequentemente, bons níveis de produtividade agrícola. A compostagem dos resíduos é uma forma de agregação de valor de grande impacto, sendo ainda, um insumo que pode ser certificado dentro das normas da agricultura orgânica, desde que os resíduos satisfaçam os requisitos de qualidade.

Uma série de circunstâncias são necessárias para que tal arranjo se forme. A primeira delas é a difusão das técnicas de compostagem para produtores rurais. Esta formação incluiria noções sobre as características dos resíduos e quais os riscos ambientais envolvidos. Os produtores devem ter plena noção de quando é necessário solicitar caracterizações, via análises químicas e consulta a profissionais habilitados, de resíduos de fontes industriais das quais há dúvida sobre

Resíduos Agroindustriais



Alguns resíduos urbanos
(coleta seletiva da fração orgânica e podas)



Comercialização do
excedente

Uso do composto
orgânico na agricultura

Figura 1.3 - Proposta de modelo de gestão integrada dos resíduos sólidos orgânicos baseada em unidades de compostagem descentralizadas, geridas por produtores rurais especializados, com emprego de tecnologia flexível e de baixo custo.

o processo. Igualmente importante a apresentação de formas de operacionalização e manuseio de resíduos orgânicos, dos custos envolvidos, dos tipos de máquinas e equipamentos disponíveis no mercado e da legislação ambiental pertinente.

1.4.3 A compostagem no meio rural: utilização do composto e avanços técnico-científicos na agricultura

No caso da suinocultura, a compostagem dos dejetos em contraponto ao uso de esterqueiras ou espalhamento direto no solo na forma de efluente líquido, possui vantagens quanto ao custo das instalações e das operações, bem como, reduz os riscos ambientais relacionados à aplicação desses dejetos nos solos agrícolas. A compostagem pode ser feita com o maquinário comum a uma propriedade agrícola, não há necessidade de novas construções, e o produto final da compostagem é mais estabilizado e de liberação lenta de nutrientes. Isto reduz os riscos ambientais da aplicação do esterco e também melhora a economicidade do transporte e aplicação, já que a compostagem reduz o volume e o peso final do resíduo tratado. Portanto, a composto orgânico potencializaria a reciclagem de nutrientes em um raio maior de alcance (distância de aplicação do local gerador do resíduo). A fase termofílica da compostagem, com temperaturas entre 55°C e 65°C, permite ainda

a redução e/ou eliminação de patógenos presentes no esterco.

Criadores orgânicos certificados na França, na região de Aldis, gerenciam os resíduos da criação em cama sobrepostas de feno. A arquitetura das instalações possui espaço de armazenamento em um tipo de sótão, acima das baias dos animais. A cama misturada aos dejetos é retirada para formar leiras de compostagem do lado das granjas. Em que pese as diferentes condições climáticas e particularidades do manejo dos animais, com o uso de cama ou não, o uso de água para lavagem das baias de criação deve ser no reduzido a mínimo para que os dejetos possam ser tratados como resíduos sólidos na compostagem. O uso de peneiras de separação da fase sólida tem possibilitado a compostagem desta parte, mas mantém a necessidade de tratamento da fase líquida gerada em grande quantidade.

Os dejetos animais têm trazido desafios de manejo com o aumento das unidades de criação animal confinado. No Estado de Santa Catarina, a grande quantidade de dejetos gerados na mesorregião Oeste Catarinense, que concentra a maior criação de aves e suínos por unidade de área do Brasil (MIRANDA, 2007), tem resultado em forte pressão ambiental, principalmente, relacionada à poluição dos recursos hídricos. Apesar dos dejetos de animais serem um importante insumo orgânico para o solo e lavouras, a intensidade de aplicação e falta de cri-

térios, aliada a grande quantidade de dejetos disponível, transformaram este insumo em uma causa de poluição (SEGRANFREDO, 2007). Esforços têm sido aplicados pela pesquisa e pela extensão rural em novas técnicas e tecnologias que sejam capazes de absorver tal quantidade de dejetos. Os principais impactos dos dejetos estão relacionados à carga de nutrientes (Nitrogênio, Fósforo e Potássio), alta DBO¹⁰, coliformes fecais (e patógenos relacionados) e ao conteúdo de zinco e cobre, proveniente de suplementos alimentares.

Considerando a possibilidade de reciclagem de nutrientes pela aplicação dos dejetos nos solos agrícolas uma relação é relevante: a concentração das unidades de criação animal confinado e a área de lavouras temporárias que podem receber este insumo. Ressalta-se que de fato "nem toda a área de lavoura temporária (...) é passível de ser utilizada para reciclagem de nutrientes, haja vista que do ponto de vista econômico existe uma distância máxima entre o local de produção e o seu local de destino. Além disso, existem limitações nas características químico-físico e biológicas que impedem que a totalidade da área agrícola seja possível de ser utilizada na reciclagem de nutrientes" (MIRANDA, 2007, pg. 31).

Particularmente para dejetos suínos, o

uso de água para eliminação do material para esterqueiras é uma prática que, além de aumentar o volume de resíduos, torna o dejetos suíno um efluente líquido. Nesta forma, a abordagem de tratamento passa a ser a de tratamento de um efluente e não mais de um resíduo sólido (ou pastoso). O emprego de sistemas de tratamento de dejetos similares aos sistemas de tratamento de esgotos em lagoas em série predominam nas granjas suínoclas (HIGARASHI et al., 2007). Do ponto de vista da melhor gestão de resíduos, o uso da água para eliminação dos dejetos das granjas é uma prática que deve ser minimizada pelo criador. A separação da fase sólida dos dejetos suínos em peneiras especialmente projetadas permite o uso deste material em leiras compostagem. Da mesma forma, o uso de cama sobrepostada é compatível com a compostagem dos dejetos. O sistema de criação de suínos em cama sobrepostada é uma tecnologia de manejo de dejetos na fase sólida, onde a cama é constituída de maravalha, serragem, palhas ou outros substratos. A revisão feita por Nunes (2003) apresenta os resultados e dados de diversos autores que demonstram que o sistema de manejo com cama sobrepostada traz vantagens como; (a) aumento da concentração de nutrientes nos resíduos viabilizando o uso como fertilizante; (b) reduz a quantidade gerada de resíduos a serem tratados; (c) reduz a umidade dos

¹⁰ Demanda Biológica de Oxigênio, medida em mg de O₂/l. Quanto maior a DBO, maior o consumo de oxigênio para biodegradação em corpos hídricos.

resíduos; e, (d) não afeta a produtividade animal, e que a compostagem de dejetos sólidos e líquidos de suínos é uma prática viável e recomendável, com alta capacidade de tratamento dos dejetos e produção de composto orgânico de alta qualidade.

Além dos resíduos animais, as propriedades agrícolas produzem vários tipos de resíduos vegetais. A maior parte permanece no solo de plantio, mas as operações colheita e beneficiamento, por exemplo, de cebola, hortaliças, geram grandes quantidades de resíduos que são dispostos fora da área de lavoura. Esses resíduos são fontes de inóculos de fitopatógenos, mas constituem também matéria-prima para compostagem. Neste caso, a compostagem atua como uma prática que controle de fontes de inóculos de fitopatógenos na medida em que as temperaturas termofílicas eliminam esses inóculos. No caso de hortaliças, a retirada de restos vegetais da área de produção (solo) para a compostagem é uma prática altamente recomendável para evitar que o tecido vegetal remanescente se torne meio de sobrevivência de certos fitopatógenos. É importante que o agricultor de hortaliças perceba que os restos da lavoura precisam ser manejados para evitar o recrudescimento das doenças e que a melhor forma para esse manejo é transformar esses restos em matéria-prima para compostagem (sua fábrica de húmus e agentes de controle biológico no solo).

Em Ituporanga, Santa Catarina, a compostagem foi novamente incorporada as recomendações para produção agrícola da região, grande produtora de cebola. A difusão do método de compostagem foi realizada pela EPAGRI - Empresa de Pesquisa Agropecuária e Difusão de Tecnologia do Governo do Estado, em convênio com o Departamento de Engenharia Rural da Universidade Federal de Santa Catarina, a partir de 1996, com o objetivo de possibilitar ao agricultor a produção de um composto orgânico de alta qualidade para ser utilizado na fase de produção de mudas de cebola. Esta ação fez parte do projeto de Manejo Agroecológico da Cebola para o Alto Vale do Itajaí, Santa Catarina.

A matéria prima principal, neste caso, são os restos de cebola provenientes da colheita e beneficiamento, formados por bulbos avariados, de tamanho não comercial, folhas e películas. Este material recebe tradicionalmente um destino inadequado na região. Estes restos da colheita, quando não permanecem, em parte, próximos às áreas de plantio, são jogados nas margens dos rios da região, onde ficam apodrecendo por longo tempo. Constituem, assim, mais uma fonte de inóculos de doenças para a cultura e agente poluidor dos cursos d'água, já que parte destes resíduos pode carregar frações de inseticidas e fungicidas (agrotóxicos). O tratamento deste material se torna possível e eficiente através da compostagem, que pela intensa atividade microbiológica favorece a degradação

dos resíduos de agrotóxicos e, representa ainda a oportunidade de se reciclar nutrientes na forma de adubo orgânico.

O composto orgânico possui a propriedade de liberar lentamente os nutrientes nele contidos não ocorrendo, portanto, saturações na solução do solo, principalmente com nitrogênio. Estas saturações são comuns na utilização de adubos de alta solubilidade, ou mesmo com a aplicação de esterco fresco, e causam a poluição de águas por elevação na concentração de nitratos. O nitrogênio em forma de nitrato quando em excesso sofre fácil lixiviação decorrente do movimento de percolação da água no perfil do solo, terminando por atingir o lençol freático. O composto é hoje uma ferramenta utilizada em pesquisas realizadas com controle biológico de fitopatógenos no solo.

O controle de doenças por supressão dos patógenos pela atividade de microorganismos antagonistas (*Trichoderma*) e o favorecimento de associações simbióticas de fungos micorrízicos nas raízes das plantas que teriam efeito positivo sobre a sanidade vegetal através da redução da atividade patogênica de outros fungos habitantes e/ou invasores do solo, são mecanismos que podem ser induzidos com a utilização do composto (MILLER et al., 1996). A ONU reconhece a utilização do composto orgânico como a melhor alternativa no processo de substituição e eliminação do brometo-de-metila na desinfecção de solos. O brometo-de-metila possui ação destrutiva sobre a camada de ozônio reconhecidamente maior que a dos cloro-fluor-carbonos (CFCs) (BANKS, 1995).

Conceitos básicos e microbiologia da compostagem

2

Capítulo

Caio de Teves Inácio
Paul Richard Momsen Miller

2.1 O processo de compostagem

A definição de compostagem pode variar conforme o enfoque microbiológico, agrônômico ou de engenharia ambiental. Mas todas ressaltam o caráter aeróbio e termofílico, o que exclui totalmente processos anaeróbios. Sendo assim, a compostagem é um processo de biodecomposição da matéria orgânica dependente de oxigênio e com geração de calor, levando a temperaturas típicas de 50°C a 65°C, e picos que podem chegar à mais de 70°C. Abaixo duas definições de datas diferentes e pequenas variações de enfoque:

"O processo de compostagem pode ser definido como uma decomposição aeróbia e termofílica de resíduos orgânicos por populações microbianas quimiorganotróficas¹ existentes nos próprios resíduos, sob condições controladas, que produz um material parcialmente estabilizado de lenta decomposi-

ção, quando em condições favoráveis" (PARR; WILSON, 1980 apud LAMBAIS, 1992).

"Compostagem é a decomposição biológica e estabilização de substratos orgânicos, sob condições que permitem o desenvolvimento de temperaturas termofílicas como o resultado do calor produzido biologicamente, para produzir um produto final que é estável, livre de patógenos e sementes de plantas e pode ser benéficamente aplicado na terra" (HAUG, 1993).

Epstein (1997) resalta ainda, em sua definição para compostagem, o caráter "controlado" da decomposição biológica que leva a um "produto estável semelhante ao húmus", denominado de composto orgânico. Como bem resume Epstein, a compostagem é "manejada ou otimizada" para atingir certos objetivos os quais são:

¹ Classificação segundo o tipo de metabolismo. Neste caso as substâncias orgânicas são usadas com fonte de energia, fonte de carbono e doador de elétrons. Incluem-se aí fungos, a maioria das bactérias, os animais e protozoários.

⇒ decompor matéria orgânica potencialmente putrescível para um estado estável e produzir um material que possa ser usado para o melhoramento do solo ou outros benefícios;

⇒ decompor resíduos em um material benéfico: a compostagem pode ser economicamente favorável como alternativa quando comparada aos custos dos métodos convencionais de disposição de resíduos;

⇒ tratar resíduos orgânicos infectados com patógenos para que possam ser usados benéficamente e de maneira segura; e

⇒ promover a bioremediação e a biodegradação de resíduos perigosos - neste caso com controles específicos do processo visando a despoluição de um substrato.

A compostagem é um processo biológico e de ecologia complexa por envolver

grupos variados de microorganismos em sucessão que transformam o substrato em decomposição e que afetam e são afetados pelos fatores físicos e bioquímicos envolvidos durante o processo. Diferencia-se da simples decomposição da matéria orgânica que ocorre na natureza por ser um processo com predominância da ação de microorganismos termófilos e transcorrer em temperaturas em torno de 60 °C na massa em decomposição (Fig. 2.1). Dois grupos principais de microorganismos agem na compostagem; os mesófilos que possuem atividade ótima até 45 °C, e os termófilos que atuam numa faixa acima de 45 °C até 75°C.

É importante considerar a temperatura tanto como consequência quanto determinante da atividade microbiana por constituir um forte fator seletivo sobre os microorganismos e influir no fluxo de ar e perda de umidade. Muitos

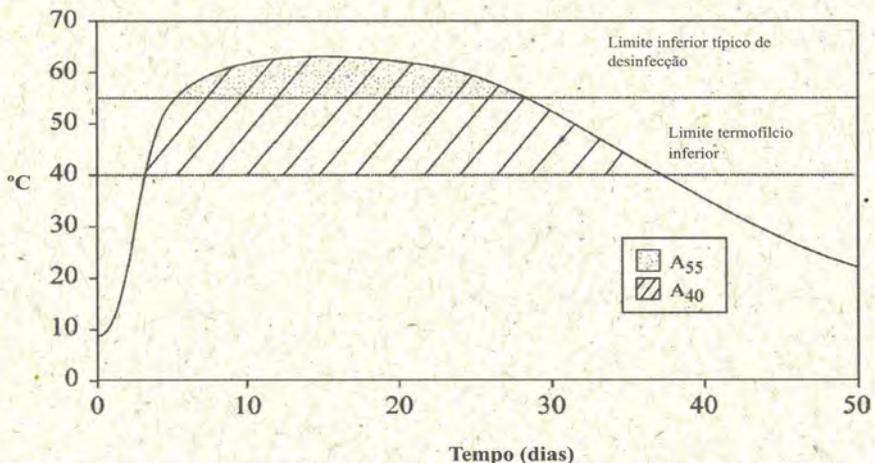


Figura 2.1 – Variação típica de temperatura em processos de compostagem. Fonte: Mason & Milke, 2005.

autores têm demonstrado que “a taxa de atividade microbiana na compostagem decresce a temperaturas acima de 60°C e que taxas ótimas de decomposição ocorrem entre 50-60°C, e que o máximo absoluto alcançável na compostagem é aproximadamente 82°C” (MILLER, 1993). Temperaturas termofílicas são extremamente desejáveis no tratamento de resíduos através da compostagem por destruírem muitos patógenos e larvas de mosca. Normas para operação de pátios de compostagem têm apontado uma tempe-

ratura crítica para destruição de patógenos humanos a partir de 55°C . Do ponto de vista agrônomo, esta temperatura é capaz de destruir muitos patógenos de plantas, sendo que 63°C é a temperatura crítica para inviabilizar sementes de ervas daninhas (RYNK, 1992).

A ação de degradação biológica usa o O₂ disponível para transformar o carbono do substrato orgânico para obter energia, o que libera CO₂, água e gera calor (Figura 2.2).

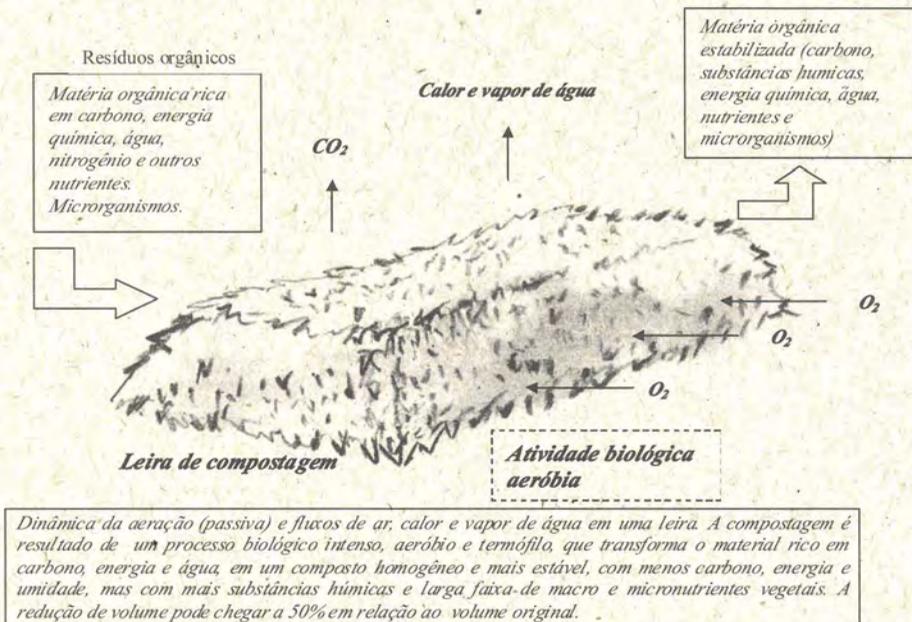


Figura 2.2 - Representação esquemática do processo de compostagem, considerando o método em leiras estáticas com aeração natural passiva.

Diferentes métodos de compostagem buscam promover e controlar este processo biológico intenso que se reflete na temperatura. O mais comum deles é a montagem de leiras em camadas dos diferentes materiais orgânicos – resíduos vegetais, esterco, resíduos orgânicos industriais, serragens, etc - com revolvimentos ou aeração passiva ou forçada, e, existem também, tecnologias baseadas em reatores fechados e automatizados, como veremos no Capítulo 3.

Em um efeito de mão dupla a temperatura no processo de compostagem e a sucessão de grupos de microrganismos se influenciam mutuamente, a observação da temperatura, resultado da concentração de calor, torna-se o retrato do bom andamento do processo em suas fases:

Fase Inicial: ocorre a expansão das colônias de microrganismos mesófilos e intensificação da ação de decomposição, liberação de calor e elevação rápida da temperatura. Do ponto de vista operacional, esta fase deve levar de no máximo 24 horas até atingir temperatura de 45°C no interior das leiras. Mas, dependendo das características do material orgânico e do método, é possível que seja mais longa - até 3 dias - ou mais curta - menos de 15 horas;

Fase Termófila: caracterizada por temperaturas acima de 45°C, predominando a faixa de 50 a 65°C, quando ocorre plena ação de microrganismos termófilos, com intensa decomposição do material, com formação de água metabólica, e ma-

nutenção da geração de calor e vapor d'água. A dinâmica de fluxo de ar (aeração) na leira de compostagem é fortemente influenciada nesta fase. O calor gerado impulsiona a aeração por convecção, e a acelerada decomposição pode gerar o colapso do substrato orgânico dificultando fortemente o suprimento de ar (oxigênio);

Fase Mesófila: fase de degradação de substâncias orgânicas mais resistentes por microrganismos mesófilos, redução da atividade microbiana e consequente queda da temperatura da leiras e perda de umidade. Enquanto a fase termófila anterior é dominada por bactérias, daqui em diante os fungos e actinomicetos têm papel igualmente relevante;

Maturação: ocorre a maturação do composto com grande formação de substâncias húmicas, a atividade biológica é baixa e o composto perde a capacidade de auto-aquecimento. Agora, a decomposição ocorre a taxas muito baixas e prosseguirá quando o composto orgânico for aplicado ao solo, liberando nutrientes.

Diversos fatores influenciam essa sucessão de grupos de microrganismos e são afetados por ela também durante o processo de compostagem: conteúdo de oxigênio, conteúdo de água, relação Carbono/Nitrogênio do substrato, pH, potencial de oxi-redução, transformações e pequenas perdas de nitrogênio, distribuição dos macro e microporos, estrutura (densidade aparente), e tamanho das partículas do substrato. O interes-

sante é que nenhum desses fatores é afetado exclusivamente pela ação dos microrganismos ou conteúdo do substrato. Todas as variações nesses fatores dependem também de fatores relativos à montagem da leira de compostagem como, grau de mistura e posição de camadas dos materiais e suas características de conteúdo. Estas características não se resumem a relação C/N dos materiais orgânicos, mas também características físicas como a capacidade de absorção e retenção de água e condutividade térmica. O formato das leiras influi no fluxo de ar, vapor d'água e retenção de calor, o que afeta plenamente a ecologia dos microrganismos do processo.

Em geral, os materiais orgânicos usados na compostagem já contêm os microrganismos necessários à compostagem, chamados microrganismos "nativos". O uso de inoculantes na compostagem tem o objetivo de garantir a rápida colonização dos materiais e, conseqüentemente, uma bem sucedida fase inicial do processo, com elevação da temperatura da leira em curto espaço de tempo. O inoculante é o material que serve como fonte extra de microrganismos necessários para o início do processo de compostagem. Existem inoculantes comerciais que trazem uma espécie de microrganismo ou mais de uma, em veículo sólido (pó) ou líquido, e alguns se parecem com o próprio chorume que escorre das leiras. O uso do próprio composto, pronto ou

não, como inoculante é bastante eficiente. Outros materiais já pesquisados são: esterco curtido, serrapilheiras, terra preta, o próprio chorume das leiras, esterco bovino diluído e conteúdo ruminal (COSTA et al., 2005). No entanto, o uso de inoculantes é controverso, sejam estes comerciais ou não. Por ser a compostagem um processo que envolve um grande número de espécies de microrganismos que interagem e competem fortemente no processo de sucessão, o uso de inoculantes com uma única estirpe ou poucas espécies selecionadas é vista com reservas. Considera-se que a chance de influência no processo de compostagem através de inoculantes seria mínima ou não se daria (GOULEKE et al., 1954; POINCELOT, 1975 apud EPSTEIN, 1997, p. 73).

A experiência dos autores na compostagem de restos de alimentos, cama de biotério (serragem e dejetos de cobaias) e restos vegetais (gramas e folhas) aponta para o uso do próprio composto, pronto ou em maturação, como um excelente inoculante auxiliar. Apesar de não ser este uso necessário para o início do processo de compostagem, o uso do composto como inoculante misturado às camadas dos materiais orgânicos se mostrou uma excelente prática para acelerar a fase inicial, isto é, alcançar em 24 horas temperaturas termofílicas (>45°C), e, assim, impedir a proliferação de larvas de mosca², que costuma ser um problema na

² Para esse efeito é necessário atingir pelo menos 50°C.

compostagem destes materiais. Reconhece-se, no entanto, da mesma forma que os autores citados, que esta influência do *composto-inoculante* é apenas inicial, não sendo preponderante para degradação ou não dos materiais orgânicos. Mas não há dúvida que o manejo e a montagem cuidadosa da leira que promovem a aeração satisfatória ainda são os fatores essenciais para a compostagem, incluindo a "arquitetura" da leira, observação das características dos materiais e da umidade adequada.

2.2 Resíduos orgânicos para compostagem

Na agricultura e na pecuária temos os restos de culturas agrícolas, partes folhosas de vegetais ou cascas de grãos, frutos não comercializados, esterços de criações animais, como ruminantes, equinos, suínos e aves. Todos esses materiais podem ser aproveitados na compostagem, como uma forma de tratamento destes resíduos, e para reciclagem de nutrientes e matéria-orgânica nas lavouras através da aplicação do composto orgânico nos solos. As mais diversas agroindústrias representam fontes de resíduos orgânicos, de origem vegetal ou animal, que igualmente podem ser aproveitados na compostagem, por exemplo, os resíduos de beneficiamento de grãos com palhas e cascas. As indústrias de transformação de matérias-primas florestais como a indústria da celulose que geram as polpas e as madeiras e serrarias que

geram pó de serra e maravalhas. Parques industriais com seus refeitórios para funcionários geram restos de alimentos e restos da manutenção das áreas verdes. Os centros urbanos e suas centrais de abastecimento geram resíduos e excedentes de restos de alimentos, frutas e verduras e podas de árvores. Há ainda os lodos de esgoto produzidos nas estações de tratamento.

Na compostagem estes materiais serão misturados e combinados de forma planejada de acordo com características como, pH, conteúdo de água, relação C/N e dimensões físicas. Portanto, as leiras formam um "grande banquete" para a ação dos microorganismos, constituído de açúcares, glicérides, proteínas, celulose, lignina, e diversas substâncias orgânicas e minerais. A Tabela 2.1 sugere algumas condições que levam em consideração o resultado final da combinação dos materiais. Deve-se considerar que a relação C/N apresentada no quadro não leva em conta a necessidade de estruturação da leira com material de lenta degradação, mas expressam uma condição favorável para a decomposição em tempo não prolongado (até 80 a 90 dias) e sem perdas excessivas de nitrogênio. A manutenção de uma umidade adequada, isto é, nem escassa nem excessiva, é um fator de extrema importância para o processo de biodecomposição que nas atividades de campo nem sempre é fácil de ser alcançada.

Tabela 2.1 – Condições sugeridas para uma rápida compostagem.

Condições	Faixa adequada ^a	Faixa preferível
Relação Carbono- Nitrogênio (C:N)	20:1 – 40:1	25:1 – 30:1
Umidade	40-65% ^b	50-60%
Concentração de oxigênio	Maior que 5%	Muito maior que 5%
Tamanho de partícula (cm)	0,3-1,5 (1/8 -1/2 polegadas)	Vários ^b
pH	5,5 - 9,0	6,5 – 8,0
Temperatura (°C)	43,5 – 65,5 (110-150°F)	54,5 – 60,0 (130-140°F)

Fonte: Rynk (1992).

^a Estas são recomendações que visam uma *rápida* compostagem na maioria dos casos, porém também pode-se obter bons resultados fora dessas especificações.

^b Depende dos materiais usados, tamanho das leiras ou pilhas, e das condições climáticas.

2.3 Transformações bioquímicas

No processo de compostagem a ação microbiológica é intensa e transforma os materiais orgânicos por completo alterando suas características físicas e químicas. As bactérias formam o grupo mais ativo no processo inicial da compostagem e em toda fase termofílica. Os actinomicetos são importantes na degradação de substratos orgânicos relativamente complexos. Os fungos, em sua grande maioria mesófilos, crescem melhor quando a umidade na leira é menor, na fase mais avançada do processo.

Enquanto moléculas mais simples são usadas como fonte de energia disponível, outras mais complexas vão sendo quebradas em substratos mais simples, e, pela intermediação dos microrganismos, vai se seguindo o rearranjo em substâncias mais complexas durante todo o processo de compostagem. Moléculas voláteis com potencial para odores fortes se formam.

Substâncias húmicas também são construídas pela ação microbiológica. A mistura de partículas e a textura no material original vai se tornando cada vez mais homogênea e a atividade microbiana vai cedendo refletindo na redução gradual da temperatura da massa do composto. Enfim, em dado momento não é mais possível se distinguir o material original da montagem da leira. O composto, produto final, é apenas um material orgânico escuro de partículas pequenas, de textura plástica e friável e com cheiro agradável de terra. A compostagem permite a redução do volume e do peso do material original, algo importante considerando o tratamento de resíduos orgânicos. A perda de carbono, através do CO₂, e a intensa perda de vapor (umidade) são responsáveis por reduções de 25-50 % no volume e 40-80 % no peso total.

A matéria orgânica que sofrerá decomposição e transformação via ação de va-

riadas espécies de microrganismos é formada também por variados tipos de substâncias orgânicas de maior ou menor resistência a esta biodecomposição (Tabela 2.2). Veremos adiante que esta característica das substâncias orgânicas, isto é, a suscetibilidade a biodegradação, influencia imensamente a condução do processo de compostagem e o controle dos fatores ecológicos (no interior das leiras) que favorecem a compostagem. É comum na literatura encontrarmos uma abordagem simplificada que relaciona a resistência à biodegradação com o tempo total da compostagem. Este tipo de interpretação

simplificada pode resultar em erros na montagem de leiras, formação da mistura e escolha de materiais, e condução dos métodos de compostagem.

Podemos considerar que a matéria orgânica para a compostagem, em geral resíduos, é constituída por sete grandes grupos de substâncias, a saber: carboidratos e açúcares; proteínas; e gorduras, que são decompostos mais facilmente, e; hemicelulose; celulose; e lignina; com decomposição muito mais lenta. O sétimo grupo de constituintes são os materiais minerais. Epstein (1997 p. 80) explica que a proporção

Tabela 2.2 – Biodegradação e mineralização relativa de substâncias orgânicas (Baseado em Epstein, 1997).

Prontamente biodegradáveis

Açúcares
Carboidratos, glicogênio, pectina
Ácidos graxos, glicerol
Lipídios, gorduras
Amino ácidos
Ácidos nucléicos
Proteínas

Biodegradação mais lenta

Hemicelulose
Celulose
Chitín
Moléculas de baixo peso

Resistentes a biodegradação

Lignocelulose
Lignina
Moléculas de baixo peso, compostos alifáticos e aromáticos

desses constituintes nos materiais orgânicos é bastante variável; por exemplo, lodos de esgoto e restos de alimentos contêm relativamente "baixas quantidades de celulose e lignina em comparação com madeiras, palha de trigo e bagaços vegetais, os quais contêm mais proteína e menos gorduras ou celulose que os restos de alimentos". Mas para definirmos matéria orgânica de forma geral, isto é, que considere também a matéria orgânica presente no solo e no próprio composto pronto devemos incluir as substâncias húmicas³, como descrito em MacCarthy et al. (1990), apud Epstein (1997), que define matéria orgânica como "(1) compostos identificáveis de alto peso molecular tal como polissacarídeos e proteínas; (2) substâncias mais simples tal como açúcares amino-ácidos e outras moléculas pequenas; e (3) substâncias húmicas".

A fonte de energia e carbono para os microrganismos na compostagem é a matéria orgânica. Substâncias mais suscetíveis a biodegradação constituem a fonte primária de energia e carbono disponíveis. Essa disponibilidade é de suma importância para o início do processo de compostagem e toda fase termofílica. As demais substâncias tal como, lignina, celulose e hemicelulose, são apontadas como as principais fontes de carbono e energia ao longo de todo o processo de compostagem, mas não são fontes de pronta

disponibilidade. Açúcares e outros carboidratos tendem a ser completamente biodegradados na compostagem enquanto lipídios, celulose e hemicelulose podem ser reduzidas em 60 a 75% num período de 60 dias de compostagem. A decomposição das substâncias orgânicas é dependente da atividade microbiana que por sua vez precisa encontrar condições favoráveis na massa do compostagem de disponibilidade de oxigênio, temperatura e umidade; por exemplo, a biodegradação da lignina é fortemente influenciada pela temperatura e a concentração de oxigênio (EPSTEIN, 1997, p. 83-89).

Como dito anteriormente, o metabolismo microbiano que decompõem as substâncias orgânicas presentes nos resíduos leva à formação de substâncias húmicas (Figura 2.4), através de diversas vias bioquímicas, que são responsáveis por grande parte dos benefícios do uso agrícola do composto e de suas características físicas típicas. Benites et al. (2004, p.17) quantificaram a formação de ácidos húmicos (AH), que na compostagem de aparas de grama aumentou de 32 g/kg para 70 g/kg, enquanto os ácidos fúlvicos (AF) aumentaram de 35 g/kg para 39 g/kg, para um período de 82 dias de compostagem, o que resultou na elevação da relação AH/AF de 0,8 para 2,2, refletindo "o consu-

³ Ver Capítulo 7.

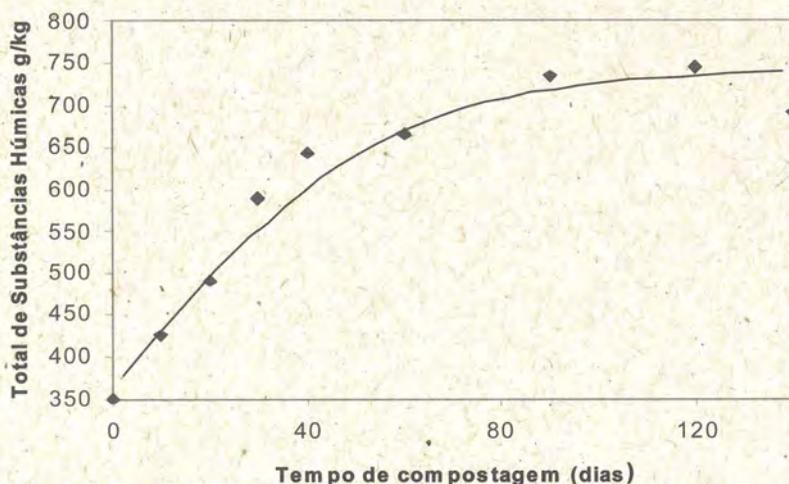


Figura 2.3 – Formação de substâncias húmicas durante a compostagem de esterco bovino.

Fonte: Epstein, 1997, p. 93.

mo de compostos orgânicos de baixo peso molecular durante a compostagem, os quais estão incluídos na fração ácido fúlvico, e produção de compostos de maior peso molecular, a partir da biotransformação da lignina e de mecanismos de síntese microbiana."

Os nutrientes que se tornam disponíveis durante a decomposição permanecem no composto dentro da massa microbiana e nas substâncias húmicas. O produto final tem baixa atividade biológica, mas é rico em microrganismos e em restos de microrganismos (parede celular e contido citoplasmático). "Com aproximadamente 30 dias de compostagem, o conteúdo de substâncias húmicas no material orgânico pode passar de 28%, no momento da instalação, para 44%." Também há uma alteração na qualidade dessas substâncias húmicas durante o processo e "o aumento do nível de ácidos húmicos repre-

senta o gradiente de humificação e maturidade do composto" (HSU; LO, 1999, apud CANELLAS, 2005). As Figuras 2.3 e 2.4 mostram o comportamento dessas transformações da matéria orgânica que se traduzem na maturação do composto, deixando claro a relação inversa entre o aumento das substâncias húmicas totais e a relação C/N.

A compostagem retém a maior parte dos nutrientes presentes no material original na forma de substâncias orgânicas estáveis. Uma fração do conteúdo de nitrogênio é perdida na forma de amônia que volatiliza das leiras junto com o vapor d'água. As práticas adotadas e os próprios materiais da compostagem influenciam nesta perda. Por exemplo, os revolvimentos de leira favorecem a perda de amônia, enquanto cobrir as leiras com composto evita tais perdas.

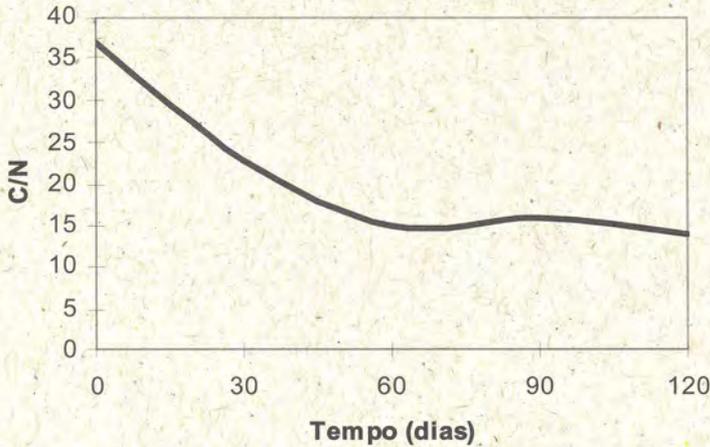


Figura 2.4 – Relação C/N durante a compostagem de podas de árvores de bagaço de laranja (precisa redesenhar). Adaptado de Fialho et al., 2005.

Durante o processo de compostagem, a decomposição de moléculas orgânicas mineraliza nutrientes resultando em fosfato (PO_4^{3-}), íon potássio (K^+), amônio (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-). Enquanto o nitrogênio e fósforo são imobilizados por bactérias, o potássio resultante de decomposição de tecidos vegetais continua em sua forma iônica, sujeito a lixiviação. Por isso, pequenas quantidades são encontradas no chorume percolado das leiras. Enquanto o nitrogênio e fósforo encontrados no chorume estão na forma de biomassa microbiana, o potássio continua na forma iônica, e sua concentração varia de acordo com a diluição do chorume por quantidades variáveis de chuva. A absorção de potássio, um cátion, por argila dar-se-á imediatamente quando o chorume atingir a base da leira. No manejo da leira para utilizar com adubo, esta camada superfi-

cial de argila poderá ser incorporada ao composto. Mas a relação entre concentração de K e a matéria seca do chorume analisado, evidencia que grande parte desse elemento está presente na massa microbiana perdida no chorume em vez de apenas solúvel em água, segundo o monitoramento de leiras de compostagem realizado pelos autores (CARIONI et al., 2001). Essa perda não é significativa em sistemas bem manejados e considera-se que praticamente todo o aporte de P e K do material original é encontrado no composto final.

A dinâmica do N é mais dependente da relação C/N, e a qualidade do carbono energético disponível. Se há carbono energético em abundância, todo o nitrogênio proveniente da degradação será assimilado em biomassa microbiana. Toda operação de compostagem deveria

ter por objetivo a assimilação de nitrogênio disponível. A perda de controle sobre estes fatores pode ocasionar perda de nitrogênio do sistema por vários meios, e a produção de gases nocivos. Portanto, perdas de N podem ocorrer através da volatilização da amônia (NH_3) durante a fase termofílica se não houver fontes de carbono disponível suficientes para ação microbiana ou pelo excesso de N. Essas duas situações levam ao acúmulo de NH_3 que pode ser volatilizado ou nitrificado. Mas microrganismos nitrificadores são inibidos acima de 51°C o que favorece as perdas de N por volatilização. As reações de nitrificação (oxidação da amônia a nitrato) só ocorrem pela ação de bactérias aeróbias do grupo nitrossomasas e nitrobacter que tem uma faixa ótima de atividade entre 26°C e 32°C e uma faixa ampla de atividade de 5 a 40°C (CARDOSO, 1992, p. 110-112). Na fase de maturação e durante a estocagem do composto, com a falta de carbono disponível e conseqüente mineralização do nitrogênio pela ação microbiana, nitrito e nitrato podem ser desnitrificados, em uma reação de redução bioquímica formando N_2O e N_2 que são gases e são perdidos para a atmosfera. Pode haver perdas de amônio (NH_4^+) e o nitrato (NO_3^-) e nitrito (NO_2^-) no chorume, mas havendo intensa atividade microbiana essas perdas são desprezíveis.

Sendo assim, duas condições principais levam a maior perda de N: excesso de N e falta de carbono disponível. Isto signi-

fica que deve-se buscar materiais com muito carbono e ter especial atenção aos fatores ecológicos que influenciam a atividade microbiana na compostagem, isto é, manter fatores como umidade e aeração em faixas adequadas, principalmente. Algumas estratégias sugerem ainda a manutenção da temperatura abaixo de 60°C , o que pode ser mais difícil na prática elevando os custos de operação. Em relação ao carbono, é importante ter como fonte tipos de carbono prontamente disponível e de carbono menos disponível (como mostrado na Tabela 2) formando a massa da compostagem.

No início da decomposição da matéria orgânica o meio se torna ácido pela liberação de ácidos orgânicos, mas, em seguida, há formação de ácidos húmicos que também formam humatos alcalinos. O pH sofre ainda efeito da mineralização do nitrogênio orgânico, que corresponde a maior parte do N da matéria orgânica é transformado em N amídico e depois em N amoniacal, elevando assim o pH devido à reação alcalina, característica da amônia (NH_3) (FIALHO et al., 2005). A ocorrência de os elevados teores de pH final (em torno de 9,0) "podem estar relacionados à formação de grupos fenólicos durante o processo de biotransformação da lignina, ou ainda pelo aumento da concentração de sais" (BENITES et al., 2004, p.12). O papel tamponador dos grupos fenólicos e a predominância desses grupos nos ácidos húmicos extraídos do composto é algo relatado em diversos trabalhos.

Sempre houve tentativas de *acelerar* o processo de compostagem ou enriquecer a composição química final do composto utilizando na mistura produtos minerais como calcário e fontes de fósforo. O calcário é fonte de Ca e Mg e deve ser usado em quantidades de 1% a 2% do peso seco dos resíduos orgânicos. Quantidades maiores podem elevar o pH, aumentar as perdas pela volatilização de NH_3 , além de influir nas populações de microrganismos. O uso de fosfato de cálcio é citado como um promotor da taxa de decomposição, principalmente de celulose e hemicelulose, quando misturado em quantidades não maiores que 2%. No entanto, "adição de fosfato natural de baixa solubilidade (p.ex. fosfatos de Araxá e Patos de Minas) praticamente não aumenta o teor de P disponível" pois as condições favoráveis a solubilização, como baixo pH, não ocorrem de maneira expressiva em geral na compostagem (PEIXOTO, 2005, p. 407).

2.4 Dinâmica microbiana

A atividade biológica em uma leira de compostagem é complexa e dependente de fatores e relações ecológicas, isto é, da relação entre as diferentes populações de microrganismos (Tabela 2.4) e destas com os fatores do ambiente da leira, os quais sofrem influência também do sistema de manejo. Apesar da complexidade, a compostagem pode prescindir de intervenções constantes (revolvimentos e aeração forçada) para cumprir suas fases quando a ecologia da leira é bem compreendida.

Compreender que "o processo de compostagem é uma sucessão de atividades microbiológicas pelas quais o ambiente criado por um grupo de microrganismos convida a atividade do grupo sucessor" (EPA, 1994) é o primeiro passo pra um manejo eficiente. Essa sucessão na leira de compostagem é influenciada por fatores como disponibilidade de energia e nutrientes, pH, umidade, oxigênio disponível e temperatura do substrato. Como bem explica Miller (1993, p. 534), "na dinâmica da comunidade microbiana da compostagem, muitos dos fatores seletivos que favorecem ou desfavorecem diferentes populações são eles mesmos resultado da atividade de existência dessas populações". Microrganismos mesófilos (que crescem melhor entre 25-45 °C) não desaparecem simplesmente devido às altas temperaturas, eles são também os agentes da elevação inicial da temperatura. A compostagem é marcada pelo fluxo contínuo de comunidades selecionadas pela mudança contínua das condições ambientais (dentro da leira), que por sua vez são determinadas pelas atividades anteriores.

Bactérias, fungos e actinomicetos importantes na decomposição do substrato podem ser classificados como mesófilos e termófilos. Microrganismos mesófilos são dominantes na massa da compostagem na fase inicial do processo quando as temperaturas são relativamente baixas. Esse primeiro grupo de microrganismos usa o oxigênio disponí-

vel para transformar o carbono do substrato orgânico para obter energia, o que libera CO_2 e água metabólica, além de calor. Este calor será conservado no interior da leira elevando rapidamente a temperatura do substrato. O armazenamento deste calor depende sempre do tamanho da leira, da umidade inicial e características dos materiais usados. Quando a temperatura atingir o limite de 45°C , os microrganismos mesófilos morrem ou tornam-se dormentes. Estes deverão recolonizar a biomassa da compostagem quando a temperatura decrescer. A partir desse ponto o grupo termófilo, que cresce melhor entre 45°C e 70°C , torna-se ativo, consumindo rapidamente o substrato disponível, multiplicam-se rapidamente e ocupam o lugar dos mesófilos na maior parte da matriz da leira de compostagem. A atividade do grupo termófilo gera uma quantidade de calor ainda maior que o grupo anterior e a temperatura dentro da leira pode ultrapassar em certas condições os 70°C . Enquanto houver substrato disponível de fácil decomposição, os microrganismos termófilos continuaram em grande atividade, decompondo o material e gerando calor. Ao tempo que nutrientes e energia contida no substrato se tornam escassos a atividade deste grupo diminuiu e a temperatura decresce como consequência, abrindo espaço para o crescimento de certos microrganismos mesófilos novamente.

Este grupo dominará a massa do material até que toda fonte energética de fácil obtenção seja utilizada.

Além da variação de temperatura, ao longo do processo de compostagem o ambiente no interior da leira sofre fortes alterações. A intensa atividade microbiana é responsável por profundas oscilações na temperatura, pH, umidade (ou potencial matricial⁴), e conteúdo de oxigênio, além de modificações de estrutura física e na composição bioquímica do substrato. Geralmente essas oscilações além de amplas e, algumas vezes, repentinas, podem ocorrer de maneira desuniforme nas diferentes partes da leira. O estágio de 'ignição' da compostagem, as primeiras horas do processo, reflete a intensa ação de decomposição do substrato pelos microrganismos. Em pouco menos de 24 horas a temperatura pode se elevar a 50°C devido às reações exotérmicas de decomposição das substâncias orgânicas; a taxa de oxigênio disponível diminui bruscamente criando sítios de anaerobiose; o pH torna-se rapidamente ácido com o substrato repleto de ácidos orgânicos e a umidade se eleva pela produção de água das reações bioquímicas em andamento. Todo esse quadro ambiental de mudanças contínuas e acentuadas é resultado do ataque aos materiais orgânicos de grupos de microrganismos dos quais as bactérias sobressaem.

⁴ Potencial matricial é definido como a força ou energia pela qual a água é adsorvida a uma superfície de partícula orgânica ou mineral e é expressa em bars ou kPa.

As bactérias têm efeito mais significativo no processo de decomposição sendo o grupo mais ativo no estágio inicial da compostagem, processando rapidamente compostos como carboidratos, proteínas primárias e açúcares. Cerca de 80-90% do material é transformado por bactérias. Fungos, os quais competem com as bactérias por energia e nutrientes contidos no substrato, têm um importante papel mais ao final do processo quando a leira perde umidade, já que estes toleram ambientes com baixa umidade melhor que as bactérias. Alguns tipos de fungos são fundamentais na decomposição da celulose até por terem menor exigência do elemento nitrogênio (EPSTEIN, 1997; EPA, 1994; POULSEN, 2003). Bactérias concentram a utilização em substâncias com relação C/N entre 10:1 e 20:1, enquanto fungos agem até 150:1 e 200:1. Isto se reflete na predominância inicial de bactérias na compostagem de lodos de esgoto e esterco enquanto os fungos estão adaptados a degradar os carboidratos complexos remanescentes (MILLER, 1998, p. 529).

Diversos trabalhos de investigação têm sido efetuados e apresentado dados da compostagem de variados tipos de materiais como, palhas, composto para cogumelos, aparas de madeira, biossólidos, restos de comida, esterco. Os resultados dos estudos variam de acordo com o substrato, processo de

manejo, foco investigativo, técnicas de análise microbiana.

Miller (1993, p. 534) resume os resultados dizendo que os trabalhos apresentam:

“...para bactérias um pico de contagem por grama de substrato na faixa de 10^8 a 10^{12} a temperaturas de 55-65 °C, enquanto para temperaturas mesofílicas a contagem pode ser uma ordem de magnitude mais alta. Populações de actinomicetos termófilos atingem o pico após o auge da população bacteriana, e frequentemente alcançam contagens na faixa de 10^7 a 10^8 . O auge da população de fungos termófilos, na faixa de 10^6 a 10^8 , ocorre muito depois da onda bacteriana, normalmente quando a temperatura declina abaixo dos 50°C. Acima de 60°C os fungos são normalmente ausentes, e acima de 70°C os actinomicetos são geralmente excluídos”.

Portanto, a 50°C tem-se encontrado a maior diversidade de comunidades microbianas termófilas, com crescimento de fungos, bactérias e actinomicetos. No entanto, Epstein (1997, p. 55) cita vários autores que reportam o crescimento de microrganismos acima de 75°C em diferentes ambientes. Isolados de composto como o *Actinomyces thermofuscus*⁵ crescem até 65°C e em

⁵ Waksman et al (1939).

torno de 75°C certos grupos de bactérias (*esporiformes*) "são predominantes e talvez os únicos organismos" (WAKSMAN, 1939). Em contraponto a afirmação de que acima de 60°C a atividade da compostagem cessa ou se reduz fortemente; estes microrganismos explicariam os métodos de compostagem que operam satisfatoriamente com temperaturas acima de 60°C. É importante considerar que a massa da compostagem possui gradientes dinâmicos de temperatura (RANDLE; FLEGG, 1978), e que a comunidade microbiana é sensível a pequenas mudanças de temperatura (MILLER, 1993. p. 522).

2.4.1 Grupos microbianos

Bactérias. As bactérias são abundantes nos solos e participam de importantes transformações relacionadas à decomposição da matéria orgânica e ciclagem de elementos. Espécies dos gêneros *Bacillus* e *Clostridium*, entre outras, comuns no solo e na compostagem, possuem a capacidade de formar endósporos, estruturas de resistência quando as condições ambientais se tornam desfavoráveis. O metabolismo das bactérias é variado. Existem espécies fotossintetizantes, fixadoras de nitrogênio, outras são capazes de oxidar compostos minerais de nitrogênio e enxofre ou fixar CO₂. Bactérias possuem crescimento rápido e atividade respiratória vigorosa. (CARDOSO, 1992, p.1-8).

A importância da atividade bacteriana no processo de compostagem foi demons-

trada quando da compostagem de lodo de esgoto sob temperaturas favoráveis (abaixo de 60°C) mais de 40% dos sólidos voláteis foram decompostos nos primeiros 7 dias, e esta atividade é em sua maior parte bacteriana (MILLER; FIENSTEIN, 1985; STROM, 1985 apud MILLER, 1993). Outras fontes apontam a capacidade de certos grupos de bactérias para decompor substâncias aromáticas relacionadas à lignina (EPSTEIN, 1993, p. 53). Os sistemas de compostagem comumente mantêm a temperatura na faixa entre 50-60°C. Numerosas referências demonstram que esta alta faixa de temperatura é seletiva para bactérias, e especialmente para o gênero *Bacillus* spp. E que acima de 65°C amostras proveram quase monoculturas de *B. stearothermophilus*. Apesar da larga predominância de bactérias anaeróbicas, para Miller (1993): "existe provavelmente, no grupo termófilo, bactérias anaeróbicas obrigatórias que são significantes no sistema de compostagem, apesar das listas não reportarem, já que existe evidência da redução de SO₄⁻⁴ ocorrendo sob condições termofílicas na compostagem".

Actinomicetos. Actinomicetos, que são bactérias filamentosas, preferem pH neutro ou fracamente alcalino e são capazes de degradar substratos orgânicos relativamente complexos como a lignocelulose. Alguns são termófilos, tolerando temperaturas na faixa dentro de 50°C, e alguns mesmo dentro da faixa de 60°C. Na compostagem esses microrganismos tem presença forte na fase termofílica (>40°C). A maioria dos

actinomicetos cresce melhor sob condições úmidas, mas aeróbias. Estas condições são mais comuns na compostagem depois que a maior parte dos substratos de pronta disponibilidade foi utilizada. Actinomicetos são uma importante parte da comunidade microbiana na compostagem por agirem na conversão da hemicelulose e celulose em compostos de fácil degradação como açúcares e amido (VANDERGHEYNST; LEI, 2003).

Fungos. Os fungos podem ser encontrados em solos com pH de 3,0 a 9,0 e são predominantes em solos ácidos. Estes podem ser unicelulares, ou pluricelulares (filamentosos) e grande parte produz esporos. Os fungos possuem filamentos tubulares chamados de hifas. Um conjunto de hifas ramificadas é denominado micélio. Todos os fungos obtêm o carbono para a síntese celular da matéria orgânica (quimiorganotróficos) (CARDOSO et al., 1992).

Fungos são praticamente excluídos da fase de alta temperatura da compostagem porque apenas um pequeno grupo de fungos podem crescer acima de 50°C, embora um número muito restrito tenha sido descoberto que podem crescer a 62°C. Os trabalhos de Selman A. Waksman⁶ já apontavam que fungos que podem crescer a 50°C em compostagem com esterco, mas rapidamente morrem a temperaturas de 65°C ou maiores. *Phanerochaete chrysosporium* é um fungo conhecido por

degradar lignina e algumas substâncias recalcitrantes. *Humicola insolens* aparece como o fungo mais termotolerante, presente acima de 70°C (EPSTEIN, 1997).

A atividade de decomposição e o crescimento de fungos é menor que das vigorosas bactérias. Daí a desvantagem dos fungos na utilização do substrato disponível no início da compostagem. Muitos fungos preferem condições aeróbias. A restrição de água disponível frequentemente decresce durante os estágios avançados da compostagem favorecendo o crescimento micelial de fungos e actinomicetos mais que bactérias (MILLER, 1989).

Quando se trata da análise do produto final, o composto orgânico, "uma análise microbiológica padrão no composto é basicamente determinada pela concentração de seis grupos funcionais de microorganismos: bactérias aeróbias, bactérias anaeróbias, fungos, actinomicetos, pseudomonas e bactérias fixadoras de nitrogênio. Laboratórios modernos podem avaliar a concentração desses grupos no produto final e esta análise serve como um guia de interpretação para determinar a qualidade do composto" (BESS, 1999). Análises do composto podem identificar a presença de microorganismos que agem na supressão de patógenos do solo de importância agrônômica, como o gênero *Trichoderma*.

⁶ Dois trabalhos de S. A. Waksman e colegas são muito citados em microbiologia e compostagem:

Thermophilic decomposition of plant residues in composts by pure and mixed cultures of microorganisms, e *Thermophilic actinomycetes and fungi in soils and composts*. Ambos publicados na *Soil Science* (1939).

Tabela 2.4 – Bactérias, fungos e actinomicetos identificadas na compostagem de diferentes substratos e em diversos sistemas.

Espécies / Bactérias	Espécies / Fungos	Espécies / Actinomicetos
<i>Bacillus</i>	Zigomicetos	<i>Actinobifida chromogena</i>
<i>B. brevis</i>	<i>Absidia</i>	<i>Nicrobispora bispora</i>
<i>B. circulans complex</i>	<i>A. ramosa</i>	<i>Micropolyspora faeni</i>
<i>B. coagulans type A</i>	<i>Absidia sp.</i>	<i>Nocardia sp.</i>
<i>B. coagulans type B</i>	<i>Mortierella turficola</i>	<i>Pseudonocardia thermophila</i>
<i>B. licheniformis</i>	<i>Mucor</i>	Streptomyces
<i>B. sphaericus</i>	<i>M. miehei</i>	<i>S. rectus</i>
<i>B. stearothersophilus</i>	<i>M. pusillus</i>	<i>S.thermofuscus</i>
<i>B. subtilis</i>	<i>Rhizomucor sp.</i>	<i>S. thermoviolaceus</i>
<i>Clostridium</i>	Ascomicetos	<i>S. thermovulgaris</i>
<i>C. thermocellum</i>	<i>Allescheria terrestris</i>	<i>Sireptomyces sp.</i>
<i>Clostridium sp.</i>	<i>Chaetonium thermophilum</i>	Thermoactinomyces
<i>Pseudomonas sp.</i>	<i>Dactylomyces crustaceus</i>	<i>T. vulgaris</i>
	<i>Myriococcum albomyces</i>	<i>T. sacchari</i>
	<i>Talatomyces (Penicillium)</i>	Thermomonospora
	<i>T. dupontii</i>	<i>T. curvata</i>
	<i>T. emersonii</i>	<i>T. viridis</i>
	<i>T. thermophilus</i>	<i>Thermomonospora sp.</i>
	<i>Thermoascus aurantiacus</i>	
	<i>Thielavia</i>	
	<i>T. thermophila</i>	
	<i>T. terrestris</i>	
	Basidiomicetos	
	<i>Coprinus</i>	
	<i>C. lagopus</i>	
	<i>Coprinus sp.</i>	
	<i>Lenzites sp.</i>	
	Deuteromicetos	
	<i>Aspergillus</i>	
	<i>A. fumigatus</i>	
	<i>Humicola</i>	
	<i>H. grisea</i>	
	<i>H. insolens</i>	
	<i>H. lanuginosa</i>	
	<i>H. stellata</i>	
	<i>Sporotrichum thermophile</i>	
	<i>Malbranchea pulchella</i>	
	<i>Scytalidium thermophilum</i>	
	(formalmente conhecido como	
	<i>Tonula thermophila</i>)	
	<i>Mycelia Sterilia</i>	
	<i>Papulaspora thermophila</i>	

Fonte: Miller, 1993, p. 530-534. Citando diversos autores.

2.5 Oxigênio

A compostagem termofílica é um processo fundamentalmente aeróbio. Sob condições aneróbias as altas temperaturas não são alcançadas. Conceitualmente, aerobiose e anaerobiose se referem a gradientes de condições altamente oxidantes e de redução, respectivamente. Nos solos, condições aeróbias e anaeróbias podem coexistir com certa proximidade e a matriz do composto pode exibir a mesma variação em microsítios por razões similares (MILLER, 1993).

Na prática, a compostagem é um processo predominantemente aeróbio, e não totalmente aeróbio. É comum a formação de microsítios e até zonas internas anaeróbias (<10% de O_2) devido ao in-

tenso consumo de O_2 pelo metabolismo microbiano (Fig. 2.5) que pode superar o suprimento de O_2 via difusão passiva ou mesmo com aeração forçada. Em leiras de compostagem este efeito é comum e tende a se concentrar na porção central. Por isso, não se descarta a participação de microrganismos anaeróbios facultativos no processo de biodecomposição. Diversos trabalhos demonstram a formação de CH_4 , resultado da atividade anaeróbia em leiras de compostagem (AMILINGER et al., 2008; INÁCIO et al., 2009), e alguns autores relacionam a relativa elevação na emissão de CH_4 e N_2O à pobreza na qualidade operacional do processo (THOMPSON et al., 2004). Evidências de redução de SO_4^{4-} apontam também para presença de bactérias anaeróbias obrigatórias (MILLER, 1993).

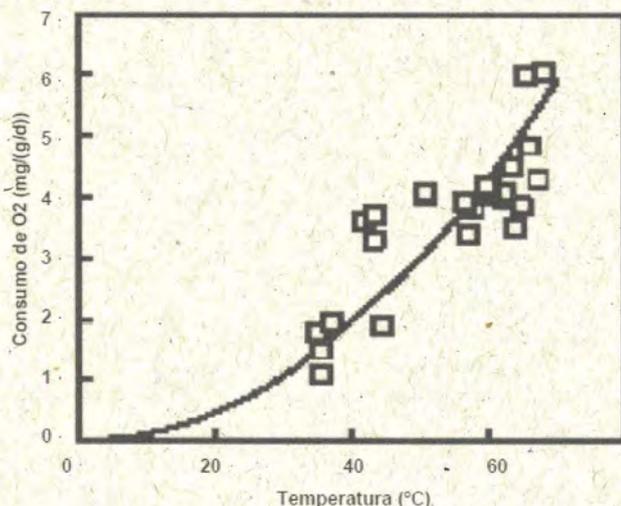


Figura 2.5 – Relação entre temperatura e taxa de consumo de oxigênio (taxa de degradação) na compostagem. Fonte: Epstein (1997).

É mais útil e fundamental compreender e saber qual grupo metabólico está sendo favorecido na compostagem, independente do grupo microbiano taxonômico. Como bem explica Neves:

"A liberação da energia acumulada nos compostos orgânicos é processada através de reações de oxido-redução, ou seja, o composto orgânico energético se torna oxidado enquanto alguma outra substância se torna reduzida, ocorrendo, assim, uma transferência de elétrons da substância doadora (que se oxida), para a substância receptora (que se reduz). Essa decomposição é realizada por uma gama variada de microorganismos que diferem quanto à natureza do receptor final de elétrons usado em suas reações de oxido-redução. Deste modo, os processos metabólicos para oxidação da matéria orgânica e liberação de energia podem ser separados em três grupos principais: respiração aeróbia, na qual o oxigênio é o receptor final dos elétrons; respiração anaeróbia, na qual são empregados receptores de elétrons inorgânicos, diferentes de oxigênio, como NO_3^- e SO_4^{2-} , e fermentação, na qual a oxidação ocorre sem a utilização de aceptores externos de elétrons." (Neves, 1992, p. 17-31).

A Figura 2.6 mostra as rotas de liberação de energia de compostos orgânicos e o fluxo de elétrons na biodecomposição. Sem oxigênio sufici-

ente a matriz da leira se torna anaeróbia. A decomposição anaeróbia envolve diferentes tipos de microorganismos e diferentes reações bioquímicas. Estes processos são geralmente considerados mais lentos e menos eficientes que processos aeróbios. Processos anaeróbios geram compostos intermediários, muitos desses compostos têm forte odor e alguns merecem preocupação.

A fermentação é um processo que pode ocorrer nas leiras de compostagem, ou em microsítios anaeróbios ou de forma generalizada quando a difusão de oxigênio é muito deficiente, sendo sintoma de mal andamento do processo. Fermentação se refere especificamente ao metabolismo sem um aceptor inorgânico terminal de elétrons (O_2 , NO_3^- ou SO_4^{2-}) e, como resultado, produz como ácidos orgânicos e álcoois, ainda ricos em energia que se acumulam no meio. "Fermentação no uso técnico é equivalente a fosforilação, e o uso indiscriminado como sinônimo para decomposição deve ser evitado por ser confuso e impreciso" (MILLER, 1993, p. 517).

2.6 Umidade

A manutenção da umidade adequada é importante por dois motivos: 1- a água é necessária no metabolismo microbiano; 2 – a água concorre com o oxigênio pelos mesmos espaços na matriz⁷ da leira. Portanto, o excesso, e a escassez de água são capazes de estancar a atividade microbiológica, o primeiro por via indireta impedindo a difusão do oxigênio na leira,

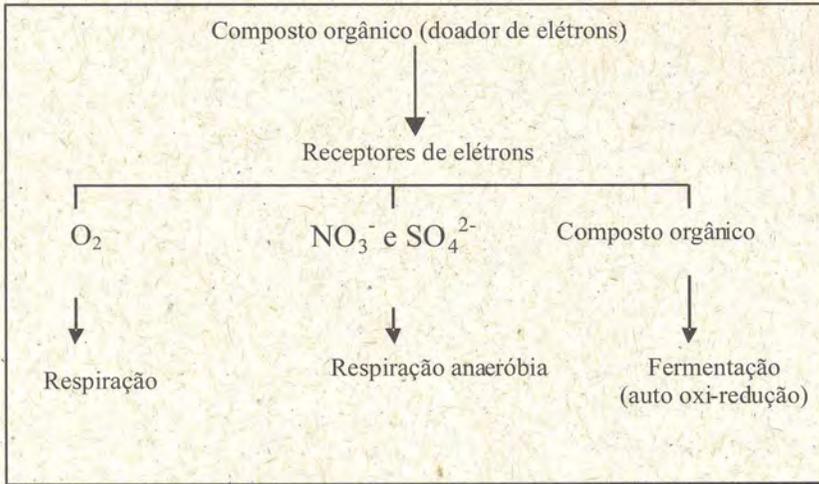


Figura 2.6– Liberação de energia de compostos orgânicos (moléculas orgânicas). Fluxo de elétrons. Fonte: adaptado de Cardoso (1992).

e o segundo por via direta reduzindo a umidade a níveis desfavoráveis para atividade biológica da compostagem.

Em teoria, a atividade biológica é ótima quando os materiais estão saturados. Esta cessa inteiramente abaixo de 15% de conteúdo de umidade. No entanto, na prática procura-se equilibrar e manter a umidade na compostagem entre 40% e 65%. Mas essa faixa pode variar conforme a aplicação, como no caso da compostagem de substratos para produção de cogumelos em que se trabalha com 68-74% de umidade (MILLER, 1993). Experiências têm mostrado que o processo de compostagem fica inibido a conteúdos de umidade abaixo de 40%. Apesar da atividade microbiana continuar a esses níveis,

esta se torna baixa e insuficiente para manter a atividade termofílica que move toda a compostagem. Já níveis acima de 65%, a água desloca muito do ar presente nos espaços porosos da matriz da leira e reduz a continuidade entre os poros, limitando a difusão do ar e, conseqüentemente, propiciando condições para atividade microbiana anaeróbia.

Durante a compostagem a quantidade de água dentro da leira de compostagem muda com a evaporação e precipitação, mas também com a formação de água metabólica⁸. Geralmente mais água evapora do que é adicionada e a umidade tende a diminuir durante o processo de compostagem. Materiais altamente absorventes, tais como aparas de madeira, pro-

⁷ Termo que traduz o arranjo formado pelas fases sólida (resíduos orgânicos e minerais), líquida (basicamente água e elementos dissolvidos) e gasosa (ar e elementos gasosos constituintes).

porcionam “poder tampão” à leira evitando tanto a saída de água por escoamento quanto à excessiva evaporação, podendo manter a umidade favorável em maior parte da leira e por mais tempo, mesmo em condições desfavoráveis como a influência de ventos fortes e secos sobre a leira. A remoção de água por evaporação é considerável com substratos de alta energia como resíduos de comida e esterços, por exemplo. Esta remoção que pode resultar em um conteúdo de umidade em torno de 20-30% é influenciada pela alta produção de calor liberado na decomposição desses materiais.

Alguns trabalhos indicaram que, quando o potencial matricial se torna mais negativo que -70kPa , a colonização por bactérias foi extremamente inibida. O potencial considerado ótimo para colonização por bactéria se aproximadamente -20kPa . Um potencial matricial mais negativo pode ser traduzido em menor água disponível (livre) para atividade microbiana. De fato, esses valores negativos significam a força que o filme de água está retido pelas partículas. Isto é particularmente importante para atividade de bactérias. Fungos e actinomicetos seriam menos afetados pela variação do potencial matricial devido à estrutura em micélios, no entanto eles são bem menos importantes na fase mais ativa da compostagem, crescendo fracamente acima de 50°C . Por fim, existe uma grande produção de água metabólica du-

rante a compostagem que é geralmente desconsiderada. Cálculos teóricos apontam que por cada grama de compostos voláteis de lodo de esgoto seria produzido 0.72g de água. Outros trabalhos encontraram valores que variaram de 0.55g a 0.63g de água por grama de composta. Essas variações são atribuídas a produção de biomassa e características do material original (MILLER, 1993, p. 524).

2.7 Relação Carbono/Nitrogênio e outros nutrientes

Carbono e nitrogênio são os nutrientes mais importantes para a atividade microbiana e conseqüentemente para a compostagem. A relação carbono/nitrogênio (C/N) de um determinado resíduo orgânico têm influência direta sobre atividade microbiana e sobre os grupos que vão predominar em sua decomposição resultando em maior ou menor tempo de completa decomposição ou humificação. Quanto maior a C/N, maior o tempo de decomposição do material. Em geral, considera-se relação C/N acima de 50, alta, e valores entre 30 e 40 mais adequados a compostagem. Pode-se comparar a decomposição no solo de aparas de madeira (C/N = 300-500), extremamente lenta, com a de restos de verduras (C/N = 16), rápida. Os microorganismos usam de 25 a 30 partes de C para cada parte de N assimilada. O carbono é usado com fonte de energia e para formar a

⁸ Resultado da respiração microbiana: matéria orgânica + $\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$.

estrutura das células microbianas, enquanto o nitrogênio é importante na formação das proteínas e, especialmente, do DNA e RNA microbiano, influenciando diretamente na capacidade de reprodução e crescimento da população das diferentes espécies de bactérias, fungos e actinomicetos.

A relação C/N da mistura inicial de resíduos orgânicos influencia diretamente no tempo de compostagem, ou seja, na obtenção do produto final desejável para uso agrícola. O que se traduz no tempo necessário para obtenção em um composto orgânico de baixa C/N (< 20). Em geral, é esta a ênfase dada pela maioria dos autores no tema. No entanto, a relação C/N dos diferentes materiais deve ser também interpretada segundo a influência sobre outros fatores ecológicos fundamentais da compostagem que não somente o tempo de duração do processo. Um fator ecológico importante influenciado pela relação C/N é a aeração, ou a capacidade do ar se difundir pelos espaços livres dentro da leira de compostagem, seja por uma difusão passiva ou por aeração forçada. A relação C/N da mistura tem efeito direto na porosidade da leiras (ou espaços livres de ar), que também é influenciada pela granulometria do material. Materiais de alta C/N, como as podas urbanas e as aparas de madeira, conferem "forte estrutura" as leiras de compostagem. Materiais de baixa C/N costumam ser mais tenros, isto é, ter alto conteúdo de água, e perdem sua estrutura logo que se inicia

a biodegradação. Portanto, não funcionam como materiais "estruturantes" para a leira e tendem a diminuir rapidamente os espaços livres para difusão de ar. Em geral, o excesso de materiais com baixa C/N resulta no colapso da estrutura de uma leira de compostagem resultando na interrupção do processo aeróbio e redução das temperaturas, reflexos da diminuição da atividade microbiana. Este quadro em uma leira de compostagem, por exemplo, de restos de alimentos com C/N 14 a 16, facilmente gera mau cheiro e proliferação de moscas durante a decomposição. A relação C/N também influencia no padrão de temperatura no processo de compostagem. Tanto o carbono disponível quanto o conteúdo de nitrogênio, quando elevados ou adicionados, resultam em temperaturas mais altas e/ou fases termofílicas mais prolongadas.

O uso de resíduos de alta C/N na compostagem pode realmente resultar em um produto final com C/N acima de 20 devido à remanescência destes materiais, geralmente mais grosseiros no produto final. Assim, a operação de peneiramento pode retirar os materiais mais grosseiros que influenciam na alta C/N do produto final, obtendo apenas o material mais humificado e de baixa C/N, mais fino.

2.8 Granulometria

Da mesma forma que a relação C/N, a granulometria (tamanho de partículas) dos resíduos usados na mistura definem a extensão de superfície disponível para

a ação dos microorganismos e, também, influencia a aeração da leira de compostagem, via manutenção da porosidade. Do ponto de vista microbiológico, quanto menor a granulometria do material mais rápida será a decomposição pelos microorganismos que terão maior superfície de ação, onde ocorre a decomposição.

Já em relação à montagem das leiras de compostagem, a granulometria da mistura deve manter a porosidade da leira para a difusão do ar (aeração). Isto remete diretamente a recomendação de triturar os resíduos para uma compostagem mais rápida. Esta prática, por exemplo, não é recomendável quando lidamos com restos de alimentos, que são materiais de rápida decomposição e tendem a formar muita água metabólica durante a fase termofílica da compostagem. No entanto, reduzir a granulometria pela trituração será sempre desejável para restos vegetais de alta C/N como podas de árvores ou mesmo restos de culturas agrícolas como plantas de milho ou capineiras. Pode-se encontrar diferentes recomendações para a granulometria na compostagem, por exemplo, Rynk (1992) recomenda tamanho de partícula de 0,3 a 1,5 cm, para uma compostagem "rápida", mas comenta que essa medida é bastante flexível para uma compostagem satisfatória e pode variar com os "materiais usados, tamanho de leiras ou pilhas e das condições ambientais".

2.9 pH

O pH do meio tem influência em qualquer atividade microbiana. Diferentes espécies de microorganismos se adaptam e têm atividade ótima em diferentes faixas de pH. O pH de cada resíduo utilizado na mistura para compostagem vai influenciar a dinâmica microbiana principalmente na fase inicial da compostagem. Misturas ácidas ($\text{pH} < 4$), por exemplo, com excesso de restos de polpas de frutas e cascas de frutas, podem retardar a ação microbiana que predomina na compostagem, já que uma porção menor de espécies tem plena atividade metabólica em faixas extremas pH, muito ácidas ou muito básicas. Deve-se ter atenção para formar misturas que resultem em um pH médio entre 5,0 a 7,0, plenamente satisfatório a atividade microbiana. Na prática, isso é facilmente alcançado por que estamos sempre misturando diferentes materiais orgânicos. No entanto, alguns autores indicam a faixa entre 6,5 a 9,6 como a mais satisfatória para um processo termofílico (Epstein, 1997, p. 48). Logo na fase inicial da compostagem o pH tende a cair, devido à formação de ácido orgânicos, mas com a elevação da temperatura, tende a subir e se manter entre o pH 6 a 7, dependendo da mistura de resíduos. Alguns resíduos como o lodo de esgoto que recebe adição de calcário, apresentam pH acima de 12, mas isso não parece ser limitante para a compostagem deste material que é realizada sempre em misturas formadas com podas de árvores.

Caio de Teves Inácio
Paul Richard Momsen Miller

3.1 Introdução

A descrição da compostagem como parte de um grupo de processos de “decomposição aeróbia de sólidos”, citada por VanderGhenyst (1997), nos dá uma perspectiva muito prática do ponto de vista científico e da engenharia. Ou seja, a compostagem como forma de tratamento e aproveitamento de resíduos sólidos orgânicos.

A compostagem como técnica de tratamento de resíduos orgânicos constitui basicamente de práticas que favorecem a decomposição biológica em temperaturas entre 55°C e 75°C (termofílicas) de grandes volumes de matéria orgânica. As técnicas são baseadas nas características físicas e químicas dos materiais empregados e buscam garantir a aeração interna da leira, umidade favorável ao processo e o equilíbrio na relação C/N (Carbono orgânico/Nitrogênio total). Es-

sas condições ótimas levam a alta atividade microbológica que gera calor no interior da das leiras¹ de compostagem.

A qualidade da engenharia do processo repousa sobre alguns aspectos específicos:

⇒ evitar a proliferação de moscas e a atratividade a outros vetores;

⇒ evitar a ocorrência de odores fortes e desagradáveis;

⇒ evitar excessiva produção de chorume (percolado das leiras);

⇒ gerar um produto final sem riscos de contaminação do solo e água e adequada para o manuseio;

⇒ adequado para uso na agricultura e recuperação de solos.

¹ Neste livro abordamos com mais detalhes a compostagem *em leiras*. Pode-se substituir este termo por *biomassa da compostagem* quando consideramos que existem métodos de compostagem em reatores (confinada), como veremos adiante, quando não necessariamente são feitas leiras.

Basicamente estes aspectos são dependentes das altas temperaturas (55-75°C) proporcionadas durante o processo de compostagem as quais também garantem a ausência de patógenos no produto final que será manuseado (GOLUEKE, 1984; CALIFORNIA INTEGRATED WASTES MANAGEMENT BOARD, 2001). Por sua vez, o nível termofílico é resultado da atividade microbiológica predominantemente aeróbia e, portanto, dependente do fluxo de ar adequado dentro da leira de compostagem.

Os métodos de compostagem podem ser separados em grupos conforme o tipo de aeração, grau de revolvimento das leiras, ou se é realizado em leiras ou de forma confinada (por ex. biorreatores). Veremos que certas práticas podem ser comuns aos diferentes grupos, por exemplo, um método confinado pode ter uma fase em leiras, com ou sem revolvimento. Ou mesmo métodos de leiras estáticas podem ter práticas de montagem de leiras totalmente particulares que influenciam sobremaneira na eficiência do processo de compostagem. Podemos classificar os seguintes grupos² em: (1) Leiras Estáticas com Aeração Natural (2) Leiras Estáticas com Aeração Forçada, (3) Compostagem com Revolvimento de Leiras, e (4) Compostagem em Reatores (confinada). Para cada grupo destes podemos ter métodos diferentes, variações e usos de

tecnologias específicas (e patenteadas) conforme o caso. Este livro dá ênfase ao método em Leiras Estáticas com Aeração Passiva utilizado no pátio de compostagem da UFSC, que é um método semi-mecanizado de baixo custo e que tem demonstrado possuir características que possibilitam sua rápida difusão e atendimento aos requisitos de uma "boa compostagem", como citado anteriormente.

3.2 Compostagem com revolvimento de leiras

A compostagem com revolvimento de leiras é o método mais difundido no Brasil, sendo o mais utilizado nas chamadas "usinas de triagem e compostagem" que fizeram algum sucesso na década de 80 e 90. O custo baixo de implantação e a simplicidade do método contribuíram para sua difusão. No entanto, o método mostrou-se ineficiente em alguns aspectos como, maiores custos operacionais que o esperado e dificuldades quanto ao controle de moscas, produção de chorume elevada e emissão de odores fortes. No Brasil, a concepção das "usinas de compostagem" para processar o material originado no refugo das esteiras de triagem de resíduo domiciliar urbano, frequentemente resultava em um produto final inadequado para o uso agrícola, com baixo valor comercial e, as vezes, rejeitado pelos agricultores. Além desses problemas, a necessidade de gran-

² Encontraremos em inglês os seguintes termos correspondentes: *Passively Aerated Windrowe, Aerated Static Piles, Windrow composting, e In-vessel composting*. (RYNK, 1992).

des áreas também é um ponto que vem impedindo a aceitação da compostagem nos dias de hoje pelos gestores municipais, por exemplo.

Atualmente no Brasil o método de leiras revolvidas ainda é usado por centros de pesquisa, empresas e companhias públicas na compostagem de resíduos, geralmente em volumes pequenos e situações específicas. Pátios operando com grandes volumes podem ser encontrados em algumas capitais brasileiras, em geral funcionando precariamente e com restrições operacionais e ambientais.

As leiras de resíduos no método com revolvimento de leiras podem ter dimensões variadas, mas usualmente são montadas leiras longas e de secção triangulares, já que os resíduos são simplesmente despejados com ajuda de pás-carregadeiras ou equipamentos similares. As leiras formadas seguem dimensões que facilitem as manobras do maquinário e o transporte dentro dos pátios de compostagem, dependendo de como a operação é concebida, mas usualmente as leiras têm 4,0 a 4,5 de base e 1,5 a 1,8 m no máximo. Neste método é comum uma frequente interrupção do processo de biodegradação aeróbia pelo colapso da massa percebido pela queda brusca da temperatura das leiras. O revolvimento constante das leiras é usado para recuperar a aeração do processo e, em alguns casos, reduzir a temperatura do material em decomposição. No entanto, o oxigênio fornecido pelo

revolvimento da leira se esgota rapidamente (EPSTEIN, 1997), em alguns minutos, ficando evidente que é um método ineficiente quanto a manutenção prolongada da aeração das leiras. Os revolvimentos são responsáveis também pela necessidade de pátios com grandes dimensões e também aumentam a geração de chorume e emissão de odores. Este método tem melhor desempenho na compostagem de grandes volumes de material vegetal, restos de poda, grama e folhas secas, do que na compostagem de materiais mais pesados, com grande conteúdo de água, por exemplo, restos de comida. As Figuras 3.1 e 3.2 mostram alguns tipos de máquinas utilizadas para o revolvimento de leiras.

3.3 Leiras estáticas com aeração forçada

A compostagem com aeração forçada utiliza equipamentos para insuflação ou aspiração de ar no interior das leiras. Esta tecnologia possibilitou resolver um típico problema da compostagem: a falta de oxigênio no interior das leiras causado pela forte atividade biológica nos primeiros dias do processo. Na maioria dos casos, a arquitetura das leiras e a estrutura do material, por exemplo, resíduos urbanos, não permitem o fluxo adequado de ar na leira. Além disso, após o início da biodecomposição a estrutura da leira tende a entrar em colapso reduzindo a possibilidade de haver um fluxo natural de ar. A aeração forçada é uma maneira mais eficiente que o revolvimento de leiras para manutenção

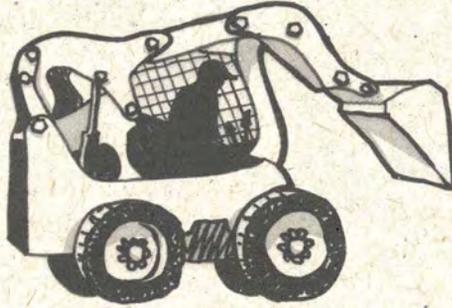


Figura 3.1 – A montagem ou o revolvimento de leiras de compostagem podem ser feitos com pás-carregadeiras leves (mini - carregadeiras) para prevenir a formação de buracos no terreno quando úmido pela chuva.

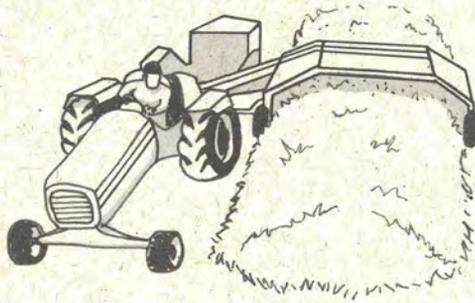


Figura 3.2 – O revolvimento de leiras de compostagem podem ser feitos com equipamentos específicos acoplados a tomada de potência do trator agrícola.

do processo de compostagem, via suprimento de oxigênio, principalmente na fase termofílica (EPSTEIN, 1997). Por esses aspectos, há um satisfatório controle da emissão de odores e redução na geração de chorume. A aeração forçada permitiu também leiras mais largas.

A insuflação ou aspiração de ar é feita por equipamentos específicos (compressores ou ventiladores) e através de tubos perfurados usualmente colocados

na base das leiras, mas podendo ocupar também partes internas da leira. A mistura de resíduos é colocada sobre a rede de tubos. As leiras permanecem estáticas durante toda a fase termofílica o que representa uma vantagem em termos de necessidade de área.

Mesmo com os equipamentos de aeração, e como não há revolvimentos, especial atenção deve ser dada à seleção e mistura dos resíduos que formam a

leira. O fluxo de ar satisfatório só se dará se houver porosidade suficiente e uniforme. Se isto não for observado, pode ocorrer desde uma distribuição desuniforme da aeração até a interrupção do processo de compostagem. A leira deve ter boa estrutura a qual mantém a porosidade durante todo o processo de compostagem. Esta é uma estratégia similar às leiras estáticas com aeração passiva (ver item 3.5), e por isso materiais como serragem, que apresentam resistência à decomposição e mantém a estrutura da leira durante praticamente todo processo, são usados na compostagem de lodos de esgoto, por exemplo.

Algumas estratégias (*Rutgers Strategy*) usam a aeração forçada para controlar a temperatura das leiras através de sensores de temperatura que acionam os aeradores quando a temperatura supera 55°C. Segundo alguns estudos, este seria um nível de temperatura ótimo para a atividade microbiana na compostagem. "O consumo de oxigênio e a evolução da temperatura (calor) são fortemente correlacionados porque ambos medem a mesma atividade" (COONEY et al., 1968 apud MILLER, 1993, p. 522). Esta estratégia se diferencia da aeração para suprir oxigênio. No entanto, a estratégia de aeração por controle da temperatura necessita de aeradores maiores e maior fluxo de ar quando comparada com o controle por intervalo de tempo, baseada no controle via suprimento de oxigênio (RYNK, 1992). "Nove vezes mais ventilação é requerida para remover

o calor do que para suprir oxigênio as leiras" (FINSTEIN et al., 1986 apud MILLER, 1993, p. 522).

No Brasil temos poucos exemplos de pátios de compostagem conduzidos em leiras com aeração forçada. Nos EUA, projetos de compostagem com aeração forçada têm substituído o revolvimento de leiras. No entanto, por necessitar de instalações específicas, os custos de implantação podem ser maiores que o simples revolvimento mecânico. Este pode ser um fator que tem impedido a difusão deste método de compostagem no Brasil.

A Figura 3.3 mostra o esquema de uma leira de compostagem com aeração forçada, que pode estar ligada num sistema de automação que aciona os aeradores quando a temperatura da leira cai – efeito da restrição da atividade microbiana pela falta de oxigênio. A Tabela 3.1 apresenta especificações para sistemas com aeração forçada. Neste método é possível o uso de biofiltros que têm a função de retirar, por sucção, as substâncias voláteis e causadoras de mau cheiro eventualmente formadas no interior da leira – como forma de controle de odores.

3.4 Compostagem em sistemas fechados ("reatores")

Existe um grupo de métodos de compostagem que confinam os resíduos em estruturas fechadas como, container, grandes cilindros de material metálico ou em concreto e alvenaria (Fig. 3.4). Estes

Tabela 3.1 – Especificações para sistemas de aeração forçada em compostagem.

Componente	Unidade	Sistema com controle por tempo	Sistema com controle por temperatura
Potência do aerador	HP	1/3-1/2	3-5
Taxa de fluxo de ar	Metro cúbico por minuto por peso seco de material (m ³ /min.ton)	0,71	2,83
Diâmetro dos tubos	Centímetros (cm)	10	15-20
Comprimento máximo do tubo	Metros (m)	23	15

Fonte: adaptado de Rynk, 1992.

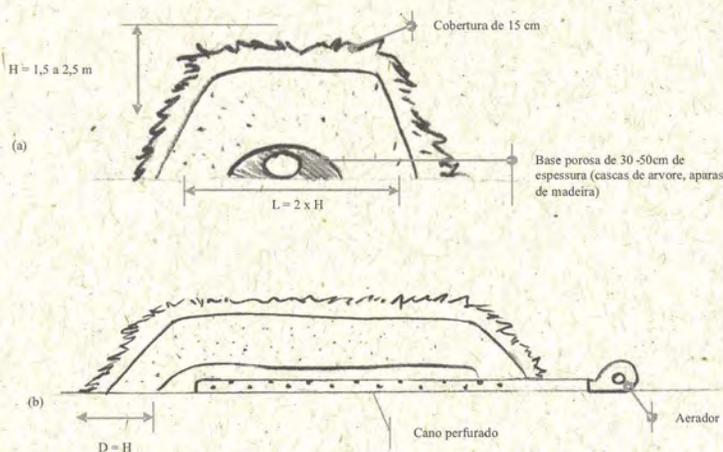


Figura 3.3 – Desenho esquemático da compostagem com aeração forçada de leiras. (a) corte transversal; (b) corte longitudinal. Fonte: adaptado de Rynk (1992).

métodos são totalmente dependentes de mecanismos para aeração forçada e o revolvimento mecânico da massa compostada. Por serem sistemas fechados, estes métodos sofrem menor influência das variações climáticas, principalmente chuva, ventos e neve, o que nas condições de países de clima temperado é mais problemático. Estes sistemas também possibilitam a automação do processo.

O processo é totalmente mecanizado e em geral ocupa menor área em relação aos outros métodos de compostagem. A fase termófila é reduzida levando alguns autores a chamarem este método de compostagem acelerada. O tempo de detenção no reator biológico pode variar de uma a quatro semanas, dependendo das características do resíduo e do tipo de equipamento. No entanto, a maturação

do material pode necessitar um longo período em torno de 60 dias. A homogeneidade da biodecomposição tende a favorecer o controle de patógenos e de odores (RYNK, 1992). A compostagem em reator é mais dependente de equipamentos mecânicos do que os sistemas de leiras reviradas ou leiras estáticas aeradas. "De um modo geral, os vários tipos de reator se enquadram em três categorias: reatores de fluxo vertical, reatores de fluxo horizontal e reatores de batelada, sendo que os dois primeiros são de fluxo contínuo" (TSUTYA, p. 78).

A compostagem em reatores biológicos é um sistema que necessita maior capital, tem maiores custos de operação e manutenção dos equipamentos, mas que pode ser atrativo pelo menor uso de mão-de-obra, menor necessidade de área, controle da qualidade do composto

e tempo de compostagem. Sendo estas duas últimas vantagens muito dependentes do tipo de material compostado e do gerenciamento das operações. Por outro lado, todos esses sistemas possuem patentes, devem ser comprados ou licenciados, ou projetados por especialistas e apresentam o risco de eventuais erros serem difíceis de reparar se o sistema for mal dimensionado ou a tecnologia proposta for inadequada.

3.5 Leiras estáticas com aeração passiva (método UFSC)

Neste item abordaremos as peculiaridades do método da Compostagem em Leiras Estáticas com Aeração Passiva, aperfeiçoado no âmbito do Projeto de Coleta Seletiva e Compostagem de Resíduos Urbanos da Universidade Federal de San-

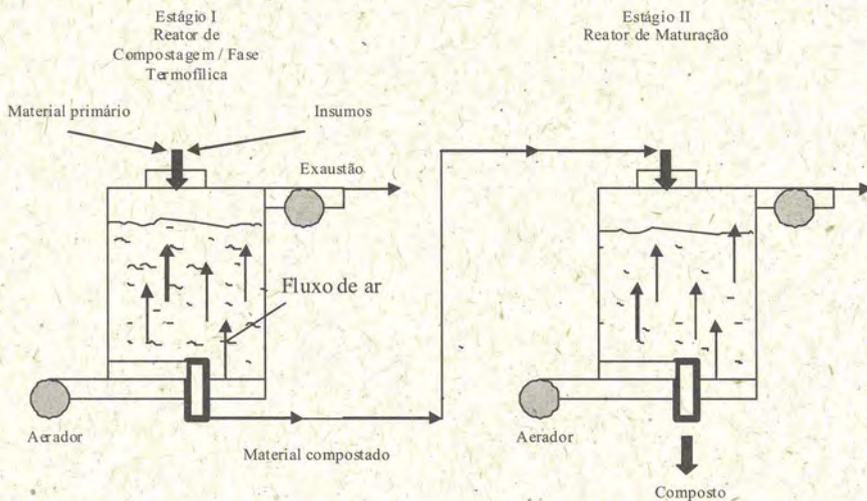


Figura 3.4 – Exemplo de sistema de compostagem confinada em biorreatores. Fonte: Rynk (1992).

ta Catarina – UFSC, em Florianópolis, com foco nos restos de alimentos gerados nos restaurantes do campus. Este método vem sendo difundido em municípios do Estado de Santa Catarina e, atualmente, foi adotado pela Embrapa Solos em projetos de compostagem no Estado do Rio de Janeiro.

Este método se caracteriza pelo emprego de algumas técnicas específicas que são descritas a seguir.

⇒ **Formato das leiras:** as leiras são montadas com paredes retas (ou próximo disso) em relação ao solo, geralmente com o auxílio de materiais como a grama cortada e outros restos vegetais que permitam a formação de paredes que se sustentam, conferindo um formato retangular a leira (Figura 3.8).

⇒ **Leira estática:** as leiras **não** são revolvidas frequentemente, por isso são denominadas leiras estáticas, e em geral apenas é feito um ou dois revolvimentos no fim da fase termofílica para homogeneizar e preparar o material para maturação.

⇒ **Densidade do substrato:** adiciona-se sempre uma proporção alta de material “estruturante”, geralmente de alta C/N e baixa densidade, como aparas de madeira e podas de árvores, de pelo menos 1/3 do volume total da leira;

⇒ **Carga contínua:** as leiras recebem novas cargas de resíduos periodicamente conforme a necessidade operacional.

Esta adição de resíduos ocorre, em geral, de 2 a 3 vezes por semana. Dependendo da quantidade inicial de resíduo, a leira começa com uma altura menor que a altura máxima operacional desejada. A leira ganhará altura com a adição das novas camadas de resíduos, mas também perderá altura durante o processo de biodecomposição.

⇒ **Mistura de camadas:** a cada nova carga de resíduos há a mistura, com uso de garfos agrícolas (Figura 3.7), com o material já em fase termofílica de decomposição.

⇒ **Cobertura:** as leiras são sempre cobertas com material vegetal como cortes de grama ou folhas, ou outro material vegetal qualquer, para que os restos de alimentos não fiquem expostos em nenhuma situação.

Büttenbender (2004) avaliou a viabilidade da compostagem em leiras estáticas com aeração passiva (Método UFSC) para o gerenciamento da fração orgânica dos resíduos sólidos do município de Angelina/SC. Para este autor:

“do ponto de vista operacional, o sistema de compostagem termofílica em leiras estáticas caracterizou-se como um processo flexível, de baixo custo, que utiliza equipamentos simples, sanitariamente adequado, e principalmente por requerer mão-de-obra reduzida, eliminando os revolvimentos periódicos na massa do lixo. [...] A configuração da leira associada

ao sistema de aeração, permitiram a permanência de temperaturas termofílicas durante o período de aproximadamente 120 dias. O elevado período de exposição dos agentes patogênicos a altas temperaturas gerou um composto orgânico isento de coliformes fecais nas quatro amostras analisadas. [...] Ficou constatado, ainda, o controle dos principais aspectos ambientais causados (vetores, odores e percolados)".

Todo o manejo da compostagem neste método é baseado no entendimento dos fatores ecológicos de uma leira de compostagem que afetam, portanto, a atividade biológica, principalmente o oxigênio, a umidade, a densidade e disponibilidade do substrato. A compostagem segue eficaz e segura, do ponto de vista ambiental e sanitário, sem a necessidade de revolvimentos constantes de leiras e/ou uso de aeradores. O método dá ênfase a meticulosa montagem da leiras levando em conta a "arquitetura" dessas leiras, isto é, sua forma, e a densidade da mistura dos resíduos.

Na literatura, encontra-se citado o método "Leiras Aeradas Passivamente" (*Passively Aerated Windrows*) que consiste no uso de tubos perfurados sob a leira no intuito de promover a aeração adequada da massa do material evitando revolvimentos e suprimento forçado de ar. Existem exemplos de pátios de compostagem que utilizam o método

com "túneis de ventilação", uma estrutura em madeira, em trapézio, que percorre longitudinalmente a leira, para facilitar a aeração. Mas mesmo neste caso são feitos revolvimentos de leiras (TEIXEIRA et al., 2004). Estes métodos diferem do método desenvolvido na UFSC, que não utiliza tubos perfurados e qualquer outro equipamento mas sim a arquitetura das leiras e disposição em camadas e mistura adequada dos resíduos, onde materiais que promovem estrutura (baixa densidade e de alta C/N) às leiras são fundamentais, como as aparas de madeira (*maravalha*), cascas de arroz, palhas e materiais similares.

Leiras estáticas, retangulares e com a proporção correta de material estruturantes (baixa densidade), se mantêm predominantemente aeróbias (2/3 do volume com $> 10\%$ de O_2) durante a fase termofílica apenas com a aeração passiva, formando um centro interno anaeróbio (INÁCIO et al., 2009). O que se reflete também no padrão de temperatura entre 55°C e 65°C apresentado normalmente por essas leiras, mostrando plena atividade microbiana. A Figura 3.5 mostra o comportamento típico do gráfico de temperatura de uma leira estática de restos de alimentos, cortes de grama e esterco.

O desempenho das leiras estáticas com tubos perfurados é também dependente da mistura de materiais e das dimensões da leira, ou seja, da estrutura formada pela massa de resíduos, já que os tubos

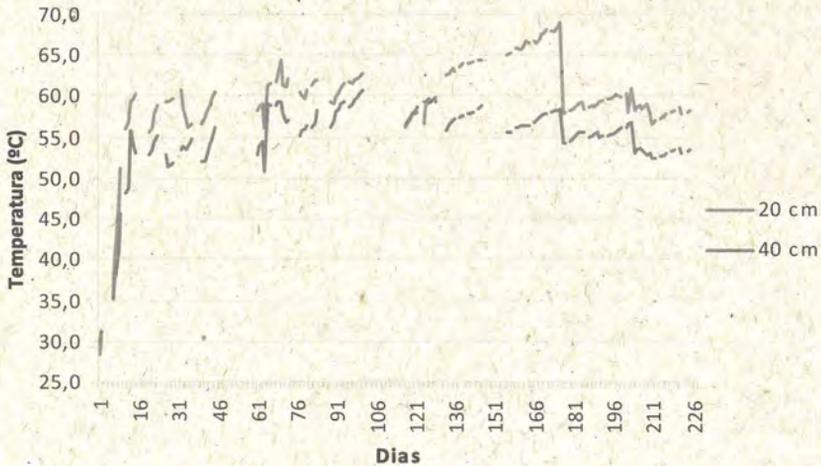


Figura 3.5 – Gráfico de médias de temperatura, em duas profundidades (20 cm e 40 cm), de uma leira estática de compostagem (método UFSC) de restos de alimentos, esterco de cavalo e cortes de grama, com 16 m de comprimento, 1,0 de altura e 1,5 de largura. Esta leira recebia cargas de resíduos semanalmente. Dados dos autores.

por si só não são capazes de garantir o fluxo de ar. A utilização de tubos perfurados acabou evoluindo para o uso de equipamentos capazes de suprir o fluxo de ar originando o método de: Leiras Estáticas com Aeração Forçada. A ecologia das leiras estáticas com aeração forçada é similar à ecologia das leiras com aeração natural, principalmente pela ausência de revolvimentos frequentes, mas são na verdade métodos diferentes que envolvem práticas específicas.

Os pátios de compostagem que vêm operando com as leiras estáticas e aeração passiva, todos atendendo à geração de resíduos urbanos, têm demonstrado capacidade de tratamento com alta qualidade ambiental destes resíduos que está relacionada a fatores como controle da geração de vetores, minimização da

produção de chorume, minimização na emissão de odores e qualidade do composto. Importante ressaltar que estes pátios trabalham com resíduos oriundos de segregação na fonte geradora e não com o resíduo sem segregação, como era comum nas “usinas de reciclagem”.

O método das leiras estáticas tem demonstrado também capacidade de absorver quantidades diárias de resíduos e suportar picos de recebimento, o que é importante da gestão de resíduos. Dependendo do gerenciamento da operação o processo leva de 3 a 6 meses, o que é o comum da compostagem.

Na operação desses pátios não há preocupação de acelerar o processo, até por haver menor necessidade de espaço que o método com revolvimentos de leiras em

função da menor movimentação de máquinas. O foco deste método, por lidar com restos de alimentos urbanos, é o controle da proliferação de moscas e formação de mau cheiro, o que é feito com sucesso pelo emprego das técnicas já citadas. Há também a vantagem de construir leiras que suportam novas cargas de resíduos após início da compostagem sem prejuízo do processo. Isto permite absorver picos no recebimento de resíduos ou resíduos problemáticos como restos de alimentos ou vísceras e restos de carcaças, por exemplo.

Esses pátios de compostagem são semi-mecanizados, isto é, trabalham de forma artesanal e com auxílio de máquinas, usualmente a uma pá-carregadeira leve. Alguns pátios de menor capacidade, cerca de 5,0 ton/dia de resíduos, utilizam o auxílio da máquina apenas para retirar as leiras em fase de maturação para as áreas de armazenamento. Outros de maior capacidade realizam toda a montagem da leira e o carregamento dos resíduos através da pá-carregadeira. Mesmo nesses casos é necessário o uso de ferramentas, como os garfos agrícolas e pás, para pequenos ajustes na montagem das leiras (Figura 3.7)

Nos pátios sem o auxílio de máquinas, as leiras têm dimensões entre 1,0 a 1,5 m de altura e 1,5 a 2,5 m de largura e o comprimento variável de 10,0 a 20,0 m (Figura 3.8). Leiras com montagem mecanizada têm sido construídas com dimensões maiores, até de 2,0 m de altura

e 3,0 m de largura. Importante ressaltar que as dimensões e a forma das leiras são importantes na compostagem com aeração passiva e estas podem variar conforme o tipo e a proporção dos resíduos que compõem a massa das leiras e a observação e a experiência do operador. Basicamente os operadores devem observar a temperatura no interior das leiras através de termômetros. Reduções abruptas a valores abaixo de 55°C são sintomas de interrupção do processo termofílico (e aeróbio).

Faz parte da observação rotineira abrir as leiras (retirar a camada de palha de cobertura), e retirar amostras internas da massa de material para verificar visualmente a decomposição dos materiais e verificar se há emissão de odores fortes e desagradáveis (oriundos de substâncias voláteis formadas no interior da leira devido à atividade de decomposição anaeróbia) ou excesso/falta de umidade.

A forma retangular das leiras estáticas (laterais retas) tem papel na manutenção e controle do fator ecológico mais importante, o oxigênio (aeração). Desta forma, materiais vegetais como resíduos de gramados, palhas de arroz e milho e bagaço de cana-de-açúcar, entre outros restos agrícolas, são usados para auxiliar na construção das leiras retangulares. Ao contrário do que algumas literaturas técnicas brasileiras descrevem, o formato piramidal não é, necessariamente, o mais adequado para as leiras de compostagem mesmo em períodos chu-

vosos. Leiras estáticas retangulares demonstraram capacidade para suportar precipitações elevadas no Sul do Brasil (>1.500 mm/ano), onde pátios com este método vêm operando desde 1994. Estudos realizados no pátio de compostagem da UFSC apontaram que a quantidade de chorume (percolado) das leiras foi pouco influenciada pela precipitação (chuva) sobre a leira. No entanto, observou-se que a temperatura da camada superficial da leira sofreu resfriamento momentâneo e o vento seco (baixa UR%) teve influência negativa sobre a compostagem retirando umidade através do vapor d'água que sai da leira.

O pátio de compostagem da UFSC, com montagem manual das leiras, recebe cerca de 5,0 toneladas de resíduos orgânicos diariamente, que incluem os restos de comida dos restaurantes do Campus Universitário e Hospital Universitário, cama animal do Biotério Central e restos

da manutenção dos jardins do campus. Os restos de comida chegam ao pátio em bombonas plásticas de 50 litros que possuem tampas e alças. Este tipo de acondicionamento permite a proteção do material no transporte e facilita o despejo manual dos resíduos nas leiras, restos de comida principalmente,

Cada leira é montada ao poucos; isto é, não é montada com sua altura máxima em um único dia. A leira recebe o material a cada 2 ou 3 dias em camadas, cama do biotério/restos-de-comida/cama do biotério. Esta sequência pode ser palha/restos-de-comida/palha ou, ainda, palha/cama-de-esterço/restos/palha, por exemplo. A proporção usual desses materiais e mostrada na Figura 3.6.

As aparas de grama são utilizadas na confecção das paredes das leiras, garantindo o perfil retangular das leiras e a cobertura das mesmas. Desta forma,

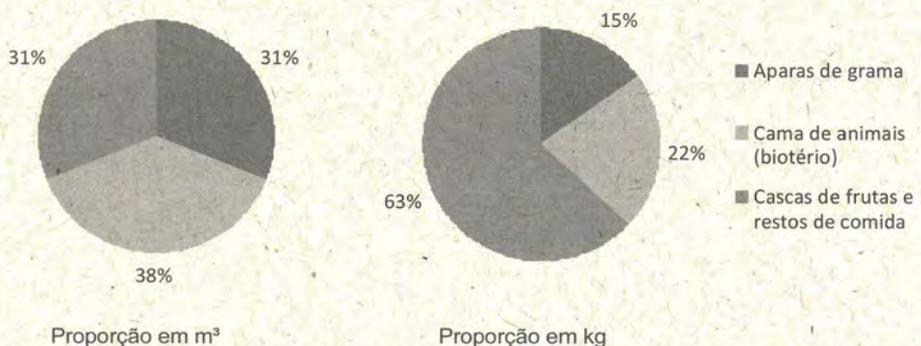


Figura 3.6 – Proporção usual dos resíduos orgânicos para montagem das leiras estáticas de compostagem do projeto de coleta seletiva do campus da UFSC. Fonte: Zambonim, 1997.

tem-se sempre um mínimo de 2 a 3 leiras sendo montadas simultaneamente no pátio. Este procedimento se mostrou adequado para prevenir à proliferação de moscas e para acomodar o fluxo diário de resíduo. Quando atingem a altura máxima para o conforto ergonômico, no caso da montagem manual, a leira pára

de receber os resíduos. Então, se aguarda o fim do processo termofílico para se remover, com ajuda de uma máquina (pá-carregadeira) e armazenar o composto para maturação. A Figura 3.9 mostra um esquema típico de um pátio de compostagem com leiras estáticas.

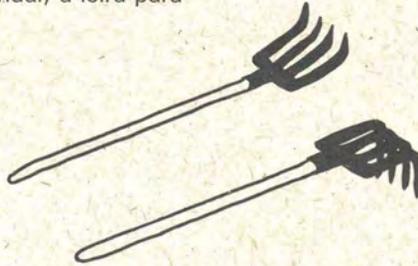


Figura 3.7 – Ferramentas (garfos) usadas para montagem de leiras de compostagem e manuseio dos resíduos.

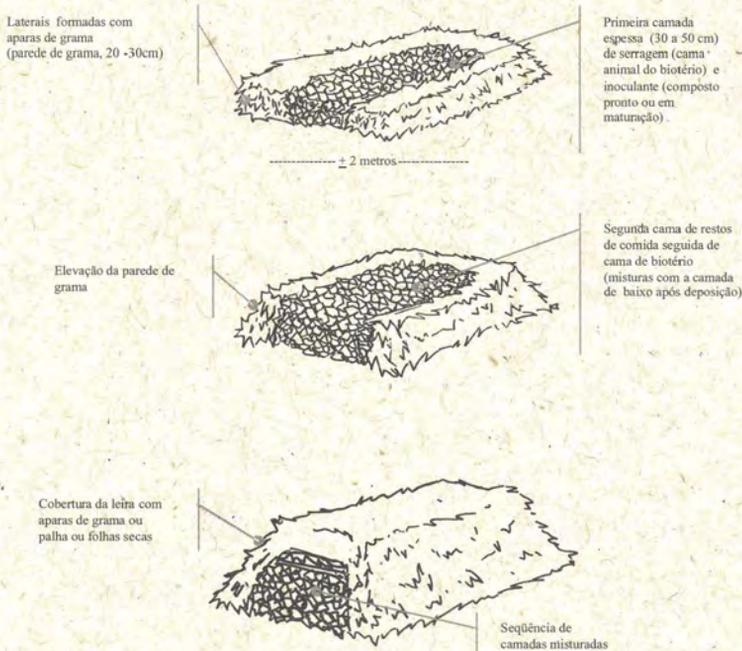


Figura 3.8 - Sequência de montagem de uma leira estática com aeração passiva para compostagem de resíduos de restaurantes, cama de biotério e aparas de grama do campus da UFSC, Florianópolis.

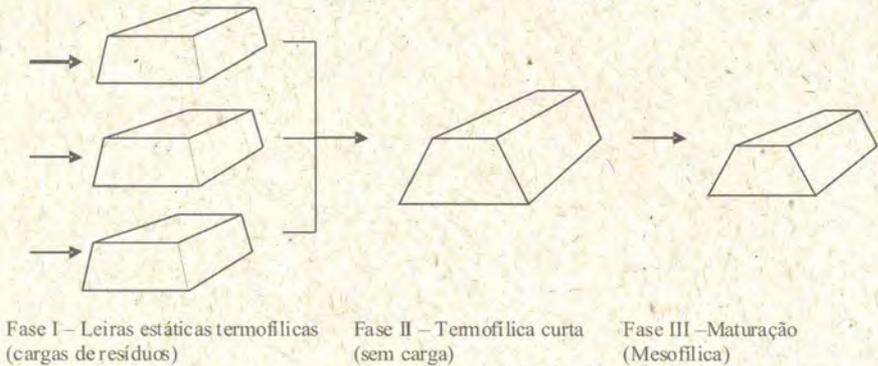


Figura 3.9 – Esquema ilustrativo das fases da compostagem em leiras estáticas com aeração passiva (Método UFSC). Fase I é a fase termofílica principal com recebimento de resíduos orgânicos. Esta fase se desenvolve sem revolvimentos. Fase II ocorre após o revolvimento para homegeinização e entrada na fase de maturação. Nesta fase pode ocorrer processo termofílico curto se houver carbono disponível para degradação. Fase III é a fase mesofílica quando ocorre maturação do composto.

3.6 A escolha de um método de compostagem

Diversas são as variáveis que devem ser analisadas na escolha de um método ou tecnologia de compostagem. A primeira delas é o tipo de resíduo disponível para a formação da massa a ser compostada. Cada método se ajusta melhor a certas características dos materiais a serem compostados, por exemplo, quando se tem para a compostagem apenas materiais vegetais como podas de parques e jardins e grama, o método de revolvimento de leiras poderá dar conta e ser mais simples de implantar. Se houver predominância de materiais pesados (umidade maior que 70%) de rápida degradação, como restos de comida, o revolvimento terá suas limitações e restrições para controle das condições ambientais do pátio. Nesses casos há em geral a necessidade de revolvimentos

frequentes e um monitoramento cuidadoso. Em geral, resíduos do processamento de produtos animais e restos gordurosos exigem técnicas e condições de compostagem apuradas, isto é, os operadores devem ter larga experiência com o método a ser empregado já que esses resíduos podem causar problemas com proliferação de moscas e odores fortes. O método com revolvimento é o menos indicado nesses casos. Testes em pequena escala com leiras estáticas com aeração passiva se mostraram perfeitamente satisfatórios quando as vísceras e restos de processamento foram colocados em leiras já em estado termofílico e formadas com serragem e restos de comida. Isso torna evidente que mais que saber se devemos revolver as leiras ou promover sua aeração por equipamentos, devemos construir uma leira com os mate-

riais certos para cada situação. Sistemas em reatores têm tido a preferência para a compostagem de resíduos de processamento animal por permitir o controle maior do processo e, principalmente, pelo potencial para evitar ocorrência de odores fortes. Para compostagem de estercos de animais de criação (agropecuária) é usual a escolha do método com revolvimento ou leiras estáticas. O método baseado na aeração forçada é um dos mais favoráveis para a maioria das situações.

Outras variáveis na escolha do método são: a área disponível, a localização e a proximidade de concentrações residenciais e a mão-de-obra e capital necessários para implantação e operação do sistema. O clima é uma variável importante em regiões com neve ou extremamente secas. Considerando aspectos citados os pátios com leiras estáticas com aeração natural apresentam grande possibilidade de sucesso em sua implantação e operação no Brasil. Por exigir pouca mecanização do processo e ser menor seu custo de implantação baixo, este método é extremamente atrativo. A redução na necessidade de área de operação pela ausência de revolvimentos é também um ponto favorável. Diversos pátios com esta técnica vêm operando próximos (cerca de 50 m) de concentrações residenciais há vários anos sem causar problemas com atração de vetores, pássaros ou odores fortes.

Nessas condições o cuidado no monitoramento das leiras é intensivo, mas plenamente eficaz. O método com aeração forçada é igualmente favorável tendo apenas um maior custo com equipamentos e energia elétrica. Já o método com revolvimentos pode se restringir às áreas rurais (ou distantes de habitações) devido aos constantes problemas com odores. A quantidade diária e o tipo de resíduo podem influir na localização dos pátios de compostagem. Pátios menores tendem a ter um potencial igualmente menor para causar problemas com odores para a vizinhança.

No Brasil existem diversos exemplos, em diferentes estados, de projetos que fracassaram devido à falta de controle com odores. Este fato também foi registrado em outros países, como os EUA, na década de 80 (EPSTEIN, 1997, p3-13). A maioria desses projetos era baseada no uso de revolvimento mecânico para compostagem de resíduos urbanos. Projetos com antigos reatores anaeróbios também fracassaram pela mesma razão. Existem exemplos no Brasil de pátios em operação, caso do pátio no Caju – Rio de Janeiro³, que pela inadequação do método, resíduos de comida de restaurantes coletados seletivamente, são recusados por tornarem a operação impraticável, apenas o resíduo domiciliar comum é aceito. Neste caso, os restos de comida que constituem boa parte da fração orgânica dos resíduos ur-

³ Esta situação foi relatada ao autor em visita à unidade de compostagem municipal no bairro do Caju, cidade do Rio de Janeiro, em 2003.

banos estão indo para o aterro sanitário apesar do esforço de segregação na fonte. Por outro lado, temos exemplos de pátios de leiras estáticas com aeração natural operando há 14 anos com este tipo de resíduo segregado na fonte geradora.

Os métodos variam num espectro que vai da ênfase na cuidadosa confecção das leiras até a ênfase na intervenção total através de máquinas e estruturas de engenharia. A primeira estratégia é consequência da observação dos fatores ecológicos que influenciam a atividade microbiana e a estrutura (porosidade) da leira de compostagem. O foco é o momento de montagem das leiras de compostagem, incluindo sua "arquitetura" (forma). Admite-se que uma leira pode ser confeccionada de modo que a aeração natural seja suficiente e favorável à atividade microbiana termofílica e durante todo, ou praticamente todo, o processo de compostagem. O revolvimento intensivo é uma estratégia que busca muito mais "consertar" uma leira de compostagem mal feita - que pode ser resultado das circunstâncias, mas pode ser um erro em si, isto é, o desconhecimento da ecologia de uma leira de compostagem. A ênfase no controle do processo via aeradores, para suprir oxigênio e/ou controlar a temperatura, faz parte de uma estratégia que busca manter o processo em "níveis ótimos" de atividade microbiana. A aeração forçada busca suprir a insuficiência da aeração natural - assim também poderemos considerar como uma estratégia que tenta "consertar

a leira". Em certa medida, esta estratégia ainda é dependente de cuidados mínimos na confecção das leiras de compostagem, principalmente os relacionados à porosidade da biomassa. Os métodos de compostagem confinada, os *bioreatores*, seguem a estratégia de buscar níveis ótimos de processo através do total controle, e suprimento, dos níveis de oxigênio, de temperatura, umidade, entre outros fatores. Seu principal objetivo é "acelerar" o processo de compostagem e ter total controle dos fatores que influenciam a atividade microbiana. Este controle ocorre via estruturas de engenharia diversas, totalmente fechadas ou não, que podem ou não incluir fases de revolvimento, mas sempre incluem a aeração forçada e o monitoramento da temperatura e umidade. Não obstante, esta estratégia inclui a fase em pátios para maturação do composto. O Quadro 2.1 mostra informações comparativas entre os métodos de compostagem citados.

O método com leiras estáticas com aeração passiva vem demonstrando, através de algumas experiências conduzidas no Brasil, alta adequação de uso para as condições brasileiras, tanto para municípios quanto empresas, industriais e instituições. A baixa necessidade de capital investido, o custo baixo de operação e manutenção, a disponibilidade de mão-de-obra e a disponibilidade de área são características que tornam a compostagem em leiras estáticas uma tecnologia com alto potencial de replicabilidade e sustentabilidade para as

condições brasileiras. No capítulo anterior, apresentamos alguns exemplos e modelos da aplicação da compostagem na gestão de resíduos orgânicos. No entanto, não descartamos a importância e as possibilidades de aplicação dos demais métodos de citados anteriormente. O importante é se ter claro as características de cada método, seus princípios e estratégias, seus custos de implantação e manutenção, para aplicá-los corretamente nas situações adequadas.

Quadro 1 – Informações comparativas entre métodos de compostagem.

Método de compostagem	Leiras estáticas com aeração passiva (Método UFSC)	Leiras com revolvimento periódico	Leiras com aeração forçada	Compostagem em reatores (In-vessel systems)
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> -Baixo custo de implantação. -Simplicidade de operação. -Necessita áreas menores em relação ao método de leiras revolvidas. -Não utiliza energia externa. -Satisfatório controle de odores. - Minimização da geração de chorume. - Pouca exigência de máquinas e equipamentos. 	<ul style="list-style-type: none"> -Baixo custo de implantação. -Simplicidade de operação e uso de máquinas comuns. -Menor exigência de acompanhamento técnico especializado em comparação com outros métodos. -Flexibilidade de processar grandes volumes de resíduos. -Produção de composto homogêneo. 	<ul style="list-style-type: none"> -Médio investimento inicial -Maior controle do processo, temperatura e aeração. -Permite menor tempo de compostagem que as leiras revolvidas. -Melhor controle de odores. Possibilidade de uso de biofiltros. -Menor necessidade de área que as leiras revolvidas. 	<ul style="list-style-type: none"> -Aceleração da fase de degradação ativa (maturação mais prolongada). -Melhor controle do processo de compostagem, aeração e temperatura. -Possibilidade de automação -Menor demanda por área -Possibilidade para controlar odores via biofiltros. -Potencial para recuperação de energia térmica (dependendo do sistema). -Independência de agentes climáticos.
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> -Dependente de operadores bem treinados e com conhecimento do processo da compostagem. -Utiliza muito material vegetal de lenta degradação (ex.: serragem) o que pode ser difícil de ser conseguido em alguns locais e elevar o custo da operação. -Montagem das leiras é mais demorada. -Em alguns casos pode exigir o peneiramento do composto para retirada de materiais de lenta degradação como a serragem remanescente, por exemplo. 	<ul style="list-style-type: none"> -Necessita de áreas maiores em relação ao método de leiras estáticas. -Necessidade de máquinas para o revolvimento e maior intensidade de uso, elevando o custo de manutenção e operação. -Elevada produção de chorume e difícil controle de odores. -A constante movimentação de máquinas fica dificultada em períodos chuvosos 	<ul style="list-style-type: none"> -Custo de implantação com equipamentos de aeração específicos. -Utiliza energia externa (elétrica). -Necessidade de bom dimensionamento do sistema de aeração e controle dos aeradores. -Custo com manutenção de equipamentos, aeradores e tubos perfurados. 	<ul style="list-style-type: none"> -Elevado investimento inicial. -Maior custo de operação e manutenção com os equipamentos (sistemas mecânicos especializados) -Maior produção de chorume na fase de degradação ativa. -Utiliza energia externa. -Menor flexibilidade operacional para tratar volumes variáveis de resíduos. -Risco de erro difícil de ser reparado se o sistema for mal dimensionado ou a tecnologia proposta for inadequada. -Tecnologias licenciadas.

Fontes: Adaptado pelos autores a partir de: Santa Catarina (2003); Nraes (1992); Fernandes et al. (1999); USEPA (2006); Epstien (1997).

Controle dos fatores ecológicos em leiras estáticas de compostagem

4

Capítulo

Caio de Teves Inácio
Paul Richard Momsen Miller

4.1 Introdução

O sucesso da compostagem está relacionado à qualidade do produto final, mas, cuja qualidade também está fortemente ligada ao bom andamento do processo, como por exemplo, na manutenção da fase termofílica. O objetivo de atingir certas características do composto, o produto final, para determinados usos deve vir acompanhado de um satisfatório entendimento do gerenciamento do processo de compostagem para atingir os resultados desejados. Por isso, "o entendimento racional da ecologia da compostagem prove as melhores bases para o desenvolvimento de estratégias de controle. Isto inclui o conhecimento sobre os fatores físicos, químicos e biológicos que determinam (e são seletivos para) a estrutura das comunidades microbianas e para as rotas da atividade metabólica dentro do ecossistema da compostagem" (MILLER, 1993, p.515).

O controle dos fatores ecológicos da compostagem pode ser abordado: (1) pela ênfase nos parâmetros de temperatura, oxigênio, umidade e tempo do pro-

cesso, ou (2) pela ênfase na estrutura da leira, a transferência de calor, o fluxo de ar e vapor, e balanço hídrico (Figura 4.1). Essas linhas se traduzem em diferentes métodos de compostagem (revolvimento, aeração forçada ou passiva, reatores) sem que estas duas ênfases sejam excludentes.

Neste primeiro caso, o foco é o monitoramento de tais parâmetros, quando possível, que fornecem informações que vão direcionar intervenções do tipo revolvimentos e/ou aeração forçada. Aqui encontramos sistemas retroalimentados que visam a manutenção da temperatura em torno de 50-60°C, na fase termofílica, ou o suprimento de O₂ programado. Em ambos os casos, via aeração forçada. Métodos com revolvimentos programados também se guiam pela observação da temperatura da leira. A temperatura e o consumo de oxigênio são altamente correlacionados na compostagem, já que ambos os parâmetros medem a atividade microbiana. Aqui temos então métodos baseados na intervenção do processo de

compostagem que visa manter níveis ótimos de biodecomposição. Pouca ou menor importância é dada a confecção da leira de compostagem já que as intervenções são programadas para corrigir as deficiências.

Já no segundo caso, o foco é a leira de compostagem. Procura-se confeccionar a leira de compostagem para que todo o processo ocorra sem necessidade de intervenções ou com intervenção mínima, satisfazendo-se os requisitos de aeração, temperatura, etc. Passa-se então do nível dos parâmetros para o nível dos fenômenos que influenciam o ecossistema da leira de compostagem e, conseqüentemente, favorece a atividade microbiana. A partir daí, detalhes antes negligenciados passam a ter papel importante, tais como, a forma da leira (sua "arquitetura"), as características dos materiais de reterem calor e água, e, também, a capacidade da leira para man-

ter sua estrutura porosa durante a fase termofílica. Assume-se a leira como um ecossistema microbiano com capacidade de autoregulação que tem a função de decompor a matéria orgânica. No entanto, a biodecomposição aeróbica e termofílica ocorrerá apenas sobre certas condições de estrutura da leira, de transferência de calor, do fluxo de ar e vapor, e de balanço hídrico (umidade). Tais fenômenos serão manejados a partir das práticas de montagem da leira de compostagem e não apenas ao longo do processo.

Os itens seguintes procuram explicar detalhadamente o manejo dos fatores ecológicos com base no processo de compostagem em leiras estáticas com aeração passiva (Método UFSC), descrito no capítulo anterior, o qual não utiliza aeração forçada e nem o revolvimento frequente das leiras. As leiras são construídas com as paredes retas, com o

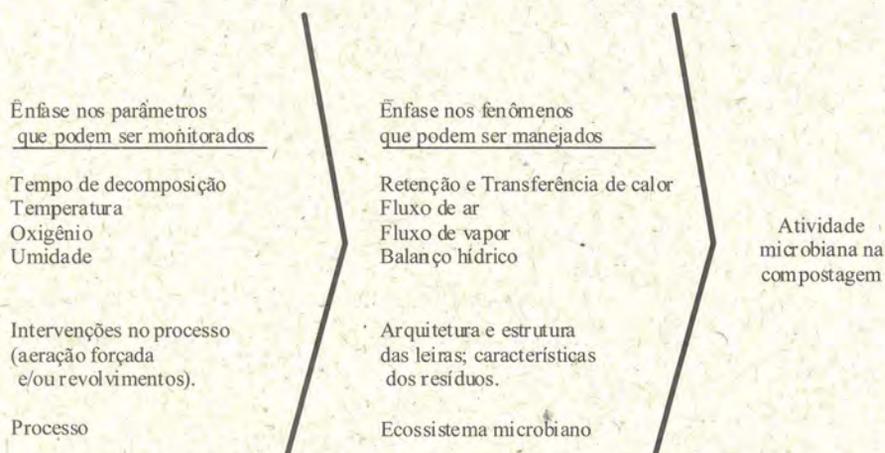


Figura 4.1 - Representação dos níveis de ênfase e as respectivas estratégias para o controle dos fatores ecológicos na compostagem. As ênfases são diferentes, mas não são excludentes.

uso de cortes de grama, e não em formato piramidal, para favorecer a circulação e difusão do oxigênio dentro da leira. Este cuidado com a forma da leira entre outros fatores como; o uso de grandes quantidades de serragem, camadas espessas de palha como cobertura e o "rodízio de leiras", que é a deposição de camadas de resíduos em intervalos de 2 a 3 dias, e a mistura dessas camadas, têm garantido o sucesso deste processo de compostagem.

4.2 Produção e transferência de calor

No processo de leiras estáticas é fundamental favorecer a produção de calor e, principalmente, manejar a transferência desde calor dentro da leira e sua saída junto com o vapor d'água. A produção de calor, oriunda da atividade microbiana, é o "motor" da compostagem e a transferência desse calor rege os outros fatores ecológicos importantes, o fluxo de ar (aporte de oxigênio) e ao conteúdo de água da leira (Figura 4.2).

A atividade de transformação da biomassa pela atividade microbiana gera grande quantidade de calor que se acumula. O aumento de temperatura na compostagem é resultado de uma maior retenção de calor de que de suas perdas. As perdas de calor seguem ser pela: (a) perda em forma de calor sensível com a saída de gases e em forma de calor latente da evaporação do vapor d'água (mais intensa); (2) perdas por condução, convecção e radiativa (menos intensa) (Figura 4.3). A baixa condutividade térmica típica da matéria orgânica reduz as perdas por condutividade e resulta em grande acumulação do calor. No entanto, leiras de pequeno volume (< de 1 m³, por exemplo), ou com maior relação superfície/volume (baixas e largas ou estreitas e compridas) tendem a perder mais calor. A escolha das dimensões das leiras de compostagem pode ser um fator usado para regular a temperatura média adequada ao processo. Mas sempre lembrando que a principal forma de perda de calor das leiras é via a saída ascendente do vapor d'água.

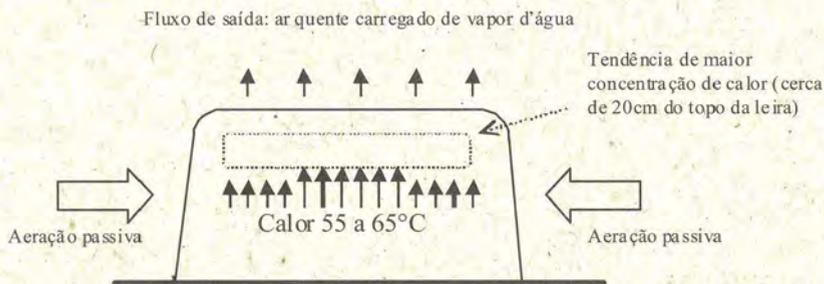


Figura 4.2 – Esquema do fluxo interno de ar e vapor em uma leira de compostagem com aeração passiva. O calor gerado força a fluxo ascendente do ar úmido do interior da leira influenciando a difusão do ar externo pelas paredes laterais (aeração passiva). Corte transversal da leira estática de compostagem.

Apesar de diversos autores citarem a importância de se controlar temperaturas em torno de 55°C para evitar perdas de nitrogênio e a inibição da atividade dos microorganismos termofílicos, na compostagem em leiras estáticas o manejo do fluxo de calor é o fundamental. A manutenção de altas temperaturas, como (65°C ou mais) tem papel na ativação do fluxo de ar. Portanto não se faz qualquer tipo e controle da temperatura no processo de leiras estáticas, ao contrário, procura-se reter calor gerado. Os níveis de temperatura são auto-regulados pela atividade microbiana.

A temperatura nas leiras de compostagem pode exceder 65°C nas zonas mais centrais, ao longo do processo, podendo representar cerca de 60% do volume total, o que pode significar que a atividade microbiana é mais restringida pelo excesso de calor na leira do que pela falta de O₂. Os revolvimentos sempre resultam no imediato esfriamento da leira, que voltará a se aquecer com o aumento da atividade biológica. Áreas centrais e na base das leiras têm a tendência de mostrar temperaturas em torno de 70°C associadas a concentrações de O₂ de 2% (RANDLE; FLEGG, 1978).

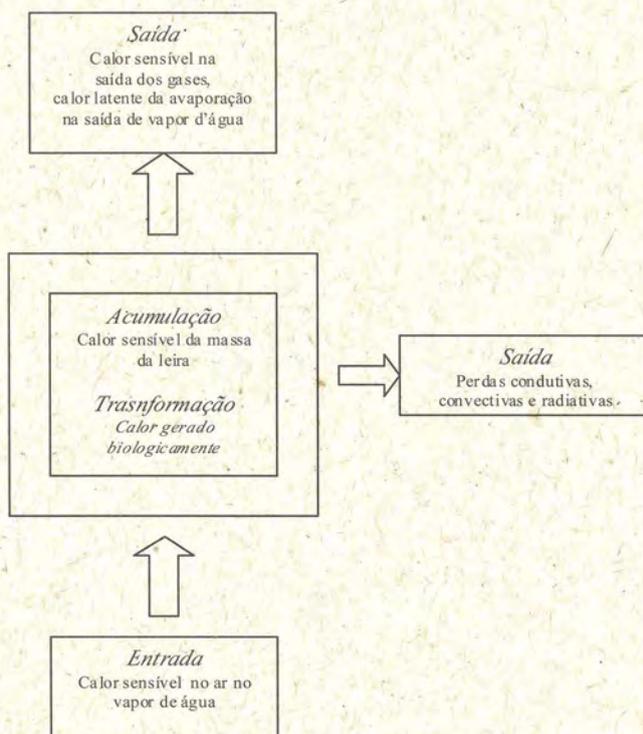


Figura 4.3 - Representação do balanço térmico na compostagem. Fonte: Mason e Milke, 2005.

Das diversas formas de transferência de calor que ocorrem na compostagem, como radiação, condução, evaporação e "calor sensível do ar", estas duas últimas são mais significantes na compostagem (Quadro 2). A produção de calor é característica da compostagem e seu acúmulo leva a elevação da temperatura. A curva de evolução da temperatura da compostagem é influenciada pelo manejo das leiras de compostagem e, pelo ambiente externo. Em muitas configurações de leiras de compostagem, tal como leiras piramidais, não ocorre uma significativa convecção. Em leiras

construídas com formato retangular, isto é, com laterais retas, observa-se significativa transferência de calor por convecção (MILLER, 1993).

A temperatura interna de uma leira de compostagem é influenciada por condições atmosféricas como variação da umidade relativa do ar e velocidade do vento (Figura 4.4). O aumento na velocidade dos ventos reduz a umidade relativa do ar ambiente fazendo com que o fluxo de vapor saindo da leira se intensifique. A saída de vapor contendo grande quantidade de calor faz a curva de

Quadro 2 – Termodinâmica da compostagem

Conceitualmente o balanço térmico para um sistema de compostagem pode ser descrito como a seguir:

Acumulação = Entrada – Saída + Transformação

Aqui, o termo *acumulação* se refere ao calor sensível do material durante o processo de compostagem, a *entrada* é a entalpia no ar (aeração passiva ou forçada) e da radiação, a *saída* é a entalpia da emissão de gases, incluindo o calor latente da evaporação de água presente no vapor que sai do sistema, e as perdas pelas paredes, e o termo transformação (reações) se refere ao calor gerado biologicamente (ver Figura 3). Em termos matemáticos a expressão pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{d(mcT)}{dt} = GH_i - GH_o - UA(T - T_a) + \frac{dBVS}{dt} H_c$$

Onde, *m* é a massa do material em compostagem (kg), *c* é o calor específico da mistura do composto (kJ/kg°C), *T*, *T_a* são a temperatura da mistura do composto e a temperatura ambiente (°C), *t* é o tempo (s), *G* é o fluxo de massa de ar seco (kg/s), *H_{i,o}* é a entalpia do ar de entrada (i) e o ar de saída (o) (kJ/kg), *U* é o coeficiente geral de transferência de calor (kW/m²C), *A* é a área de transferência de calor (m²), *BVS* são os sólidos voláteis biodegradáveis (kg), e *H_c* o calor de combustão (kJ/kg-BVS removido).

Fonte: Mason e Milke, 2005^a.

temperatura decrescer. Ambos efeitos, retirada de umidade e perda de calor, podem reduzir a atividade microbiológica termofílica e, dependendo da intensidade, interrompe-la. Este efeito, quando ocorre no início do processo de compostagem, na transição da fase mesofílica para termofílica, pode gerar condições para ocorrência de eventos anaeróbios no interior da leira, gerando um processo de decomposição anaeróbia e fermentação. Este quadro favorece o crescimento de larvas de mosca doméstica (*Musca domestica*) e formação de odores fortes.

No processo de leiras estáticas o armazenamento do calor é conseguido através do uso de aparas de madeira como material volumoso e da disposição deste material em camadas. A apara de madeira tem dois efeitos na retenção do calor. Por sua baixa condutividade térmica ($0,06 \text{ kcal/m}^{\circ}\text{C h}$) a apara de madeira limita ainda mais a transferência do calor por condução; sendo usada como a camada superior esta funciona retendo calor e umidade (Quadro 3). Esta camada de aparas de madeira, com alta capacidade de absorção retém parte do fluxo ascendente de vapor que sai da leira. Isto é

importante já que o armazenamento de calor é fortemente determinado pela água devido ao seu calor específico, e porque o conteúdo de água é em média 2/3 da massa de composto. Assumindo que a matriz do composto tem uma condutividade térmica entre a madeira ($0,17 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$) e a água ($0,556 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$); o calor pode estar sendo armazenado mais rápido do que sendo perdido por condução. Aproximadamente 90% da remoção do calor ocorrem via evaporação, 10% pelo calor sensível, baseado em condições de suprimento de ar com 60% de UR e 25°C e condições de saída em 100% de UR e $50\text{-}70^{\circ}\text{C}$ (MacGREGOR et al., 1981 apud MILLER, 1993). Deve-se observar que esses percentuais podem variar em função das dimensões da leira de compostagem. A Figura 4.4 mostra a importância da perda de calor via saída de umidade junto com o fluxo de ar ascendente, em uma leira de aparas de grama de restos de alimentos, provocada por eventos microclimáticos, aumento da velocidade do vento e queda na umidade relativa do ar. O gráfico abaixo demonstra que tais eventos influenciaram na redução da temperatura interna da leira sugerindo que houve uma forte perda de calor via saída de vapor de água.

Quadro 3 – Efeito condensador de vapor a as aparas de madeira em leiras estáticas.

As leiras de compostagem montadas ao ar livre sofrem influência e alterações nos seus processos internos devido às variações de umidade do ar e ocorrência de ventos. A umidade do ar tem influência sobre as perdas de calor das leiras de compostagem, reduzindo a temperatura interna no processo. O gradiente de umidade entre o ar e a superfície da leira aumenta a saída de vapor de água (evaporação) contido nas leiras removendo de maneira uniforme grandes quantidades de calor.

Considerando o método UFSC, de leiras estáticas, a utilização de serragem seca como camada superior nas leiras de compostagem tem forte influência na retenção do vapor d'água, e conseqüentemente evita a perda de grandes quantidades de calor. Esta camada funciona como um condensador, resfriando o ar quente com fluxo ascendente e alta umidade relativa (UR), diminuindo as perdas de água (a serragem funciona como esponja).

Pode-se admitir que uma fina camada de vapor adjacente à superfície úmida (da leira de compostagem, por exemplo, tem alta umidade absoluta e é normalmente 100% saturada e que o "poder de secamento" é maior quanto maior a diferença entre a saturação de pressão de vapor e a pressão de vapor ambiente, isto é, o déficit de saturação (diferença entre as temperaturas do bulbo-úmido e bulbo-seco).

Portanto, camadas de materiais que evitem estas perdas de água e calor que ocorrem na evaporação são importantes em climas secos e com ventos fortes (como visto na Figura 3). Além deste fator, a baixa capacidade de condução de calor da serragem quando seca, também ajuda na diminuição da perda de calor, já que esta camada forma um isolamento com o ar frio, mantendo a temperatura da leira em níveis termofílicos ótimos, em torno de 55-65 °C. A perda de calor carreada pela perda do vapor d'água pode levar a queda na temperatura e conteúdo de água da leira e conseqüente debilidade das condições para o desenvolvimento dos microorganismos termofílicos.

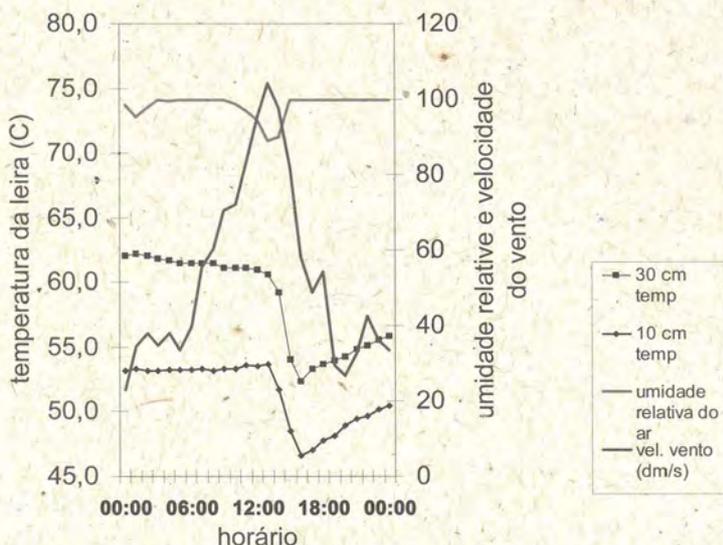


Figura 4.4 – Influência de condições ambientais na variação, em 24 horas, da temperatura interna de uma leira de compostagem de aparas de grama e restos de alimentos. Dados coletados em Davis, C.A., EUA, 2002.

4.3 Balanço hídrico

Leiras de compostagem em pátios ao ar livre possuem como componente do sistema as águas da chuva. Esta precipitação quando elevada pode intensificar a produção de chorume, mas este efeito dependerá de como se encontra a estrutura da matriz da leira de compostagem e também se esta leira está “viva”, isto é, se a leira, através da alta atividade biológica, está realmente produzindo calor suficiente e conseqüentemente mantendo um forte fluxo ascendente de vapor.

O monitoramento da saída de chorume (percolado) de uma leira estática de compostagem – método UFSC – formada por restos de alimentos, serragem, grama e palha (MILLER, 2002) demons-

trou que embora a entrada de água na leira apresente amplas oscilações a saída através do chorume é relativamente constante com uma fraca influência da quantidade de precipitação e aporte de resíduos orgânicos realizou. A leira foi preparada sobre uma lona impermeabilizante, em piso inclinado, com sistema de coleta de líquidos em bombonas. Os dados do monitoramento da saída de chorume e da entrada de água da chuva (precipitação), durante 16 semanas, permitiram o cálculo do balanço hídrico, que demonstrou que menos de 5% do volume de água que entrou no sistema saiu realmente em forma de percolado. O forte fluxo ascendente de vapor, estimado em cerca de 8,0 cm/s, decorrente do processo termofílico, faz com que grande quanti-

dade de água saia da leira por evapotranspiração (100% U.R a 50-70°C). Esta foi consideravelmente superior a evapotranspiração referencial de 4,0 mm/dia. O Quadro 4 apresenta detalhes deste cálculo.

Vale a observação - que o termo *evapotranspiração* está sendo usado de maneira não ortodóxica. Alguns autores podem preferir o termo *evaporação*. No entanto, entendemos que o termo empregado representa melhor a ecologia de um a leira de compostagem já que temos aí um processo com participação fundamental de uma gama ampla e diversificada de microrganismos em atividade metabólica termofílica, que, por sua vez, influencia o fenômeno da *evapotranspiração*.

O balanço hídrico da leira de compostagem tem duas vias de entrada: a precipitação pluviométrica, a água trazida pelos resíduos (umidade) e mais a água resultante das reações de biodegradação. Durante 16 semanas de coleta de dados em uma leira de 30 m² de base e 1,0 metro de altura, observou-se a maior entrada de água via precipitação na nona semana com 3.318 litros e a menor foi na décima quinta semana de observação, com apenas 102 litros. Pela via resíduo orgânico (80% de umidade em média), a entrada de água foi mais constante com pico de 1.600 litros e menor volume com 1.042 litros. Considerando que a leira em estudo possuía 30 m³ com uma densidade de 0,6 ton./m³, e que metade desse peso é água, uma leira

estática retém 9.000 litros aproximadamente, um acúmulo médio por semana de 562,5 litros (Figura 4.5).

A variação na quantidade de percolado coletado foi menos expressiva que as variações nas quantidades de entrada via água da chuva e água contida nos resíduos. Embora se tenha observado a influência dessas vias de aporte de água. A parcial constância na saída de percolado pode ser explicada pelo forte efeito de retenção que a leira estática exerce sobre a água, ou seja, a leira possui capacidade de reter água na razão de 500 l /m³ de leira, consequência das propriedades da apra de madeira (ou outro material absorvente). A maior parte dessa água sai por evapotranspiração e o excesso percolado pela leira. A Tabela 4.1 mostra a capacidade de absorção de água de alguns materiais vegetais.

Deve-se considerar também que no processo de leiras estáticas os resíduos orgânicos (resto de alimentos e aparas de madeira) vão sendo acrescentados em intervalos de 2-3 dias ou mais e que com isso o volume da leira aumenta gradativamente. Isto ocasiona um expressivo aumento da capacidade de retenção de água. Para este caso não foi mensurada a água formada do processo de decomposição. Dados teóricos apontam para uma produção estimada de 0,72 g de água para cada grama de matéria orgânica decomposta, enquanto, algumas medições colocam essa produção de água metabólica entre 0,5 e 0,6 g/g (MILLER, 1993).

Quadro 4 – Exemplo de cálculo do balanço hídrico de uma leira de compostagem. Cidade de Florianópolis/SC. Coleta de dados entre 01-12-2001 e 29-3-2002.

Evapotranspiração real de uma leira estática.

$$ET_{real} = (Q_{chuva} + Q_{resíduos} + Q_{metabólica}) - (Q_{chorume} + R_{leira})$$

Q_{chuva} = total de precipitação (litros)

$Q_{resíduos}$ = conteúdo de água nos resíduos (litros)

$Q_{chorume}$ = chorume coletado (litros)

$Q_{metabólica}$ = água formada pelo metabolismo microbiano**

R_{leira} = retenção de água na leira (litros)

$$ET_{real} = (16.992 + 10.016) - (1.291 - 9.000)$$

$$ET_{real} = 16.717 \text{ litros}$$

$$ET_{real} = 16.717 \text{ litros} / 16 \text{ semanas} = 1.044,8 \text{ litros/semana}$$

$$ET_{real} = 1.044,8 / 7 \text{ dias} = 149,2 \text{ litros/dia}$$

$$ET_{real} = 4,97 \text{ milímetros/dia}$$

$$ET_{real} = 4,97 \text{ mm/dia}$$

$$ET_{referencial} = 4 \text{ mm/dia}^*$$

*valor médio de evapotranspiração (ET) referencial considerando uma série histórica de 84 anos para os meses estudados em Florianópolis.

**Não considerado neste exemplo.

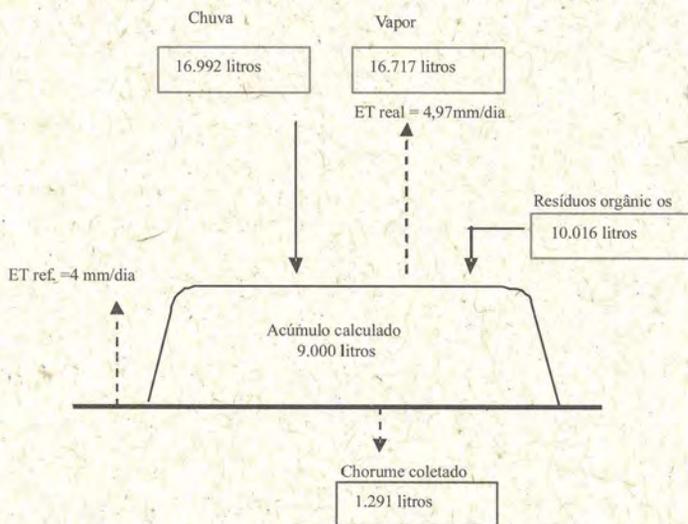


Figura 4.5 - Balanço hídrico de uma leira de compostagem com 36,0 m³ (1,2 m altura x 3,0 m largura x 10 m comprimento). Valores referentes a coleta de dados por 16 semanas nos meses de verão em Florianópolis/ SC, 2002.

Tabela 4.1 – Capacidade de absorção dos materiais de cama mais comuns.

Material	kg de água por kg de cama
Composto (30-50% de umidade)	1,5 a 2,5
Madeira como carvalho – serragem, maravalha, etc	1,5
Folhas	1,0 a 2,0
Casca de amendoim	2,0 a 2,5
Madeira como Pinus - serragem	2,5 a 3,0
Madeira como Pinus – aparas	1,7 a 2,6
Palha ou feno (picada)	3,0 a 4,5
Palha ou feno (inteiro)	2,1 a 3,8

Fonte: Bynk, 1992.

4.4 Suprimento de oxigênio

A compostagem termofílica é um processo aeróbio, ou seja, depende fundamentalmente do oxigênio e da difusão deste pela matriz do composto. Processos de compostagem requerem uma concentração mínima entre 5% e 10% de O_2 dentro dos espaços porosos da leira (RYNK, 1992), com base em evidências de que os microrganismos termofílicos são ativos em concentrações acima de 5% de concentração de O_2 (SCHULZE, 1962; KANE; MULLINS, 1973 apud RANDLE; FLEGG, 1978).

O fluxo de ar e outros gases na leira de compostagem ocorre por convecção e por difusão, sendo função:

- ⇒ do diferencial de temperatura com o ambiente;
- ⇒ do fluxo de ar na superfície da leira;
- ⇒ do conteúdo de água nos poros (umidade); e
- ⇒ da porosidade da mistura dos resíduos.

Em leiras de compostagem podem-se identificar padrões de diferença na concentração de O_2 tanto ao longo do processo quanto comparando partes da leiras. As diferenças de concentração de O_2 ocorrem tanto entre as distâncias longitudinais quanto as transversais na leira de compostagem. A queda de O_2 aparece mais intensa no início da compostagem e devido ao forte consumo pela intensa atividade biológica. Inicialmente as áreas mais internas nas leiras ficam anaeróbias, mas tornam-se aeróbias ao longo da fase termofílica, acompanhando a elevação da temperatura.

Essas mudanças na concentração são resultados da interação de três fatores:

- ⇒ O_2 sendo utilizado pelos microrganismos;
- ⇒ O_2 sendo repostado pela movimentação da massa de ar (convecção); e
- ⇒ troca de gases (difusão).

Desta forma, "se a concentração de O_2 se reduz, isso indica que o O_2 está sendo utilizado mais rapidamente do que pode

ser repostado pela convecção ou difusão; o oposto, quando o O_2 aumenta, então a taxa de reposição está excedendo a de utilização. Se o O_2 se mantém constante a uma dada concentração, então há um equilíbrio entre a taxa de utilização e a taxa de reposição" (RANDLE; FLEGG, 1978). Portanto, nas leiras estáticas, a concentração de O_2 depende da intensidade do consumo pelos microrganismos e da reposição via aeração passiva, que sofre influência da porosidade da leira, do excesso de conteúdo de água nos micro e macroporos e influência do calor interno sobre o fluxo de ar.

Leiras estáticas com laterais retas são construídas para promover tanto a difusão quanto à convecção de ar. As paredes retas das leiras são fundamentais para favorecer o fluxo de ar interno da leira, da mesma forma que a porosidade da mistura de compostagem. O formato retangular proporciona maior superfície de entrada de ar "frio" (temperatura ambiente) pelas paredes laterais e, também, um fluxo direcionado ascendente para saída do ar quente (temperatura interna da leira) e do vapor d'água. A saída ascendente de ar gera um gradiente de pressão no interior da leira suficiente para promover o fluxo de ar por convecção, promovendo a entrada do ar externo numa taxa satisfatória durante a compostagem.

Em estudo recente da dinâmica de O_2 , CO_2 e CH_4 se demonstrou a capacidade da aeração passiva suportar o proces-

so de compostagem de uma leira estática preparada com resíduos de comida, cama de cavalo e aparas de grama, mantendo-a predominantemente aeróbia (mais de 2/3 do volume entre 10,0% e 15,0%) em sua fase termofílica, porém, com um pequeno centro anaeróbio (< 10,0% de O_2) na base (INÁCIO et al., 2009). Esse resultado foi compatível com outros estudos apresentados que identificaram que se pode esperar que cerca de 86% e 79% do volume da leira mantenha mais de 5% e 10% de O_2 , respectivamente, ao longo da fase termofílica em leiras com revolvimento (RANDLE; FLEGG, 1978). No primeiro estudo as leiras retangulares tinham dimensões de 1,5 m de largura e 1,0 m de altura, e no segundo caso, 2,0 m de largura e 1,5 m de altura.

Algumas práticas de manejo como o revolvimento ou aeração forçada podem alterar a temperatura e a concentração de oxigênio na compostagem. O suprimento de O_2 devido ao revolvimento é, em geral, rapidamente consumido, não tendo um efeito duradouro na aeração da leira, e em alguns casos o revolvimento não altera a tendência da curva de concentração de O_2 . Este efeito é mais severo no início da compostagem quando há muito carbono orgânico disponível para a atividade biológica (RANDLE; FLEGG, 1978). No gráfico abaixo (Figura 4.6), pode-se notar exatamente estes efeitos, principalmente após o 5º revolvimento, nas primeiras horas do processo.

Diversos pesquisadores apontam ainda que o consumo máximo de oxigênio ocorre quando a temperatura da leira está em torno de 55°C, o que está relacionado com uma maior atividade microbiana nesta faixa de temperatura. A Figura 4.6 mostra que acima de 55°C a concentração de O₂ se eleva, sugerindo uma redução na atividade biológica (consumo de O₂), estabilizando em seguida. No entanto, queda e recuperação na concentração de O₂ na atmosfera da leira são devido aos efeitos combinados da temperatura, que afeta a atividade microbiana, e as mudanças na aeração. A atividade intensa de decomposição eleva a temperatura acima de 55°C o que inibe boa parte dos microrganismos termofílicos, mas que por outro lado, força a formação de correntes de convecção (fluxo de massa) que vão suprir de O₂ novamente e de forma constante, a atmosfera da leira de compostagem. As leiras com laterais retas (retangulares) são mais eficientes para a formação dessas correntes de

convecção, que contribuem para a entrada de ar, enquanto neste aspecto, o formato de leira piramidal é menos eficiente.

Desta forma, em um processo com aeração passiva o fornecimento de O₂ exige um fluxo de ar de fora pra dentro da leira e este depende de altas temperaturas geradas no interior da leira. Por isso, quando se está trabalhando com aeração natural um suposto controle de uma temperatura ótima para os microorganismos, seja 55°C, não é algo perseguido, pois as oscilações mais elevadas favorecem o fluxo de ar ao longo do processo. Em sistemas de aeração forçada é possível o controle da temperatura aplicando-se, em geral, vazões 4 vezes maiores que as normalmente necessárias para manutenção do processo aeróbio (fornecimento de O₂). Neste caso, a intensidade de aeração é usada para aumentar a perda de calor da leira reduzindo a temperatura até a um ponto desejado.

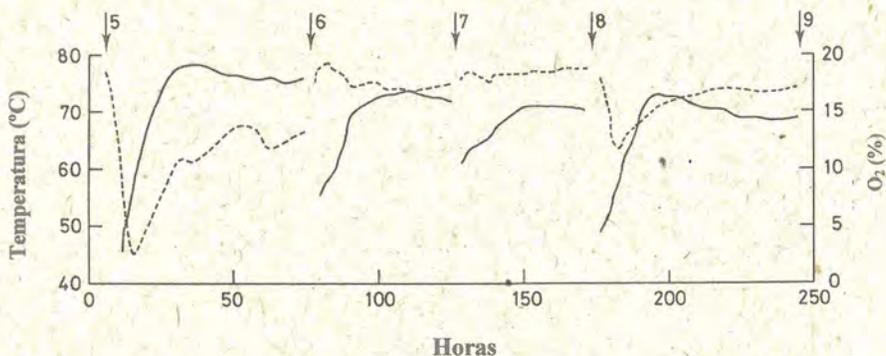


Figura 4.6 – Variação na temperatura e % de oxigênio, na região central, em leiras retangulares (2,0 m x 1,5 m) de compostagem para cultivo de cogumelos após revolvimentos (entre o 5° e o 9° revolvimento); — Temperatura (°C); - - O₂ (%) (Fonte: Randle; Flegg, 1978).

A aeração passiva de leiras ou pilhas de compostagem é influenciada pela porosidade na mistura. Esta porosidade inicial está ligada a granulometria (tamanho de partículas) dos materiais utilizados. A adequada aeração é representada pela concentração de O_2 no interior da leira, em profundidades determinadas. Certas misturas de resíduos são mais favoráveis à aeração passiva por terem maior porosidade inicial e conservarem esta porosidade durante a fase termofílica. O fator porosidade ganha importância para permitir a aeração passiva, já que tem efeito direto sobre a resistência ao fluxo de ar (Figura 4.7).

vezes denominado "densidade da mistura" na concentração de O_2 e produção de odores (representados pelas mercaptans). Um processo adequado de compostagem sempre prevê o emprego de materiais de baixa densidade, por ex. podas de jardins e aparas, em combinação com resíduos mais densos, por ex. restos de alimentos, esterco. Os dados mostram que o aumento do peso específico da mistura inicial (kg/m^3) tende a dificultar a aeração passiva (fluxo de ar) da leira de compostagem, resultando na diminuição da concentração de O_2 para atender a demanda da atividade microbológica.

A Tabela 4.2 mostra o efeito da porosidade, representada pelo peso específico da mistura inicial, em kg/m^3 , às

A comparação entre as misturas 2 e 3, de podas e restos de alimentos, na Tabela 4.2, mostra este efeito negativo cau-

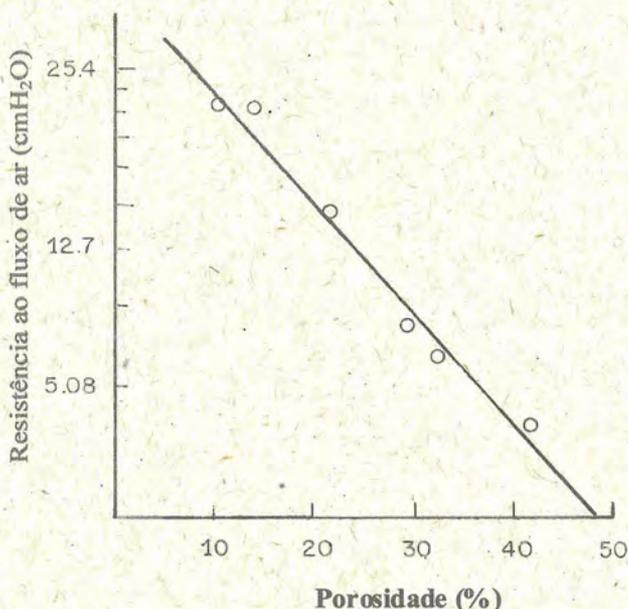


Figura 4.7 – Relação entre porosidade e fluxo de ar. Fonte: Epstein (1997); Singley et al. (1982).

sado pela trituração nesta mistura com restos de comida, que elevou a "densidade" da mistura de 297 para 891 kg/m³. Quando a "densidade" da mistura aumentou, mantendo a mesma proporção de podas e restos de alimentos (4:1), houve uma queda acentuada na concentração de O₂, que resulta na predominância da atividade anaeróbia de biodegradação. A atividade anaeróbia produz o aumento de odores (mercaptans). O aumento do peso específico da leira resulta em menores espaços para o fluxo de ar satisfatório para a atividade aeróbia da compostagem. Além deste efeito, a menor granulometria também aumenta a superfície de ação dos microrganismos o que pode elevar a atividade biológica inicial com alta demanda por O₂, desde que haja nutrientes prontamente disponíveis

(C e N), como discutido anteriormente. Não havendo condições de reposição deste O₂ consumido se formam as condições anaeróbias.

Na prática, podemos denominar esses materiais de baixo peso específico e, em geral, alta relação C/N, como as podas e aparas, de materiais "estruturantes", pela função que desempenham para manutenção da porosidade da leira e, conseqüentemente, da aeração passiva. Essas "funções" dos materiais serão discutidas mais adiante.

As principais técnicas de manejo usadas para manter o suprimento de O₂ em leiras de compostagem são a aeração forçada e o revolvimento mecânico. No entanto, os impactos dessas técnicas na qualidade do composto não são claros. Por

Tabela 4.2 - Efeito do peso específico inicial da mistura de resíduos na concentração de oxigênio e produção de mercaptans em pilhas de compostagem de podas de jardim e restos de alimentos, com e sem o pré-processo de trituração.

Pilhas	1	2	3	4
Proporção inicial da mistura <i>Podas de jardins: Restos de alimentos</i>	4:0	4:1	4:1	2:1
Pré-processamento	Nenhum	Nenhum	Triturado ^a	Triturado ^a
Peso específico, kg/m ³	178	297	891	832
Concentração de oxigênio ^b	19,9	18,8	0,3	0
Mercaptans totais (emissões) ^c	0,2	0,5	25	100

^aleira inteira passou no triturador; ^bamostra retirada a 122 cm de profundidade e 91 cm de altura; ^camostra de ar da superfície da pilha. Fonte: Epstein, 1997.

sado pela trituração nesta mistura com restos de comida, que elevou a "densidade" da mistura de 297 para 891 kg/m³. Quando a "densidade" da mistura aumentou, mantendo a mesma proporção de podas e restos de alimentos (4:1), houve uma queda acentuada na concentração de O₂, que resulta na predominância da atividade anaeróbia de biodegradação. A atividade anaeróbia produz o aumento de odores (mercaptans). O aumento do peso específico da leira resulta em menores espaços para o fluxo de ar satisfatório para a atividade aeróbia da compostagem. Além deste efeito, a menor granulometria também aumenta a superfície de ação dos microrganismos o que pode elevar a atividade biológica inicial com alta demanda por O₂, desde que haja nutrientes prontamente disponíveis

(C e N), como discutido anteriormente. Não havendo condições de reposição deste O₂ consumido se formam as condições anaeróbias.

Na prática, podemos denominar esses materiais de baixo peso específico e, em geral, alta relação C/N, como as podas e aparas, de materiais "estruturantes", pela função que desempenham para manutenção da porosidade da leira e, conseqüentemente, da aeração passiva. Essas "funções" dos materiais serão discutidas mais adiante.

As principais técnicas de manejo usadas para manter o suprimento de O₂ em leiras de compostagem são a aeração forçada e o revolvimento mecânico. No entanto, os impactos dessas técnicas na qualidade do composto não são claros. Por

Tabela 4.2 - Efeito do peso específico inicial da mistura de resíduos na concentração de oxigênio e produção de mercaptans em pilhas de compostagem de podas de jardim e restos de alimentos, com e sem o pré-processo de trituração.

Pilhas	1	2	3	4
Proporção inicial da mistura <i>Podas de jardins: Restos de alimentos</i>	4:0	4:1	4:1	2:1
Pré-processamento	Nenhum	Nenhum	Triturado ^a	Triturado ^a
Peso específico, kg/m ³	178	297	891	832
Concentração de oxigênio ^b	19,9	18,8	0,3	0
Mercaptans totais (emissões) ^c	0,2	0,5	25	100

^aleira inteira passou no triturador; ^bamostra retirada a 122 cm de profundidade e 91 cm de altura; ^c amostra de ar da superfície da pilha. Fonte: Epstein, 1997.

exemplo, alguns estudos detectaram pouca diferença nos níveis finais de carbono, nitrogênio e fósforo comparando três tipos de compostagem, aeração forçada, aeração passiva e aeração natural. Em estudos sobre o controle de emissão de odores da compostagem, compostos organosulfurados tipicamente associados com a atividade de bactérias anaeróbias foram emitidos de processos com aeração-forçada mesmo quando a concentração de O_2 excedeu 16% (VANDERGHEYNST et al., 1998). Também foi observado crescimento nos níveis de bio-marcadores lipídicos associados a estresse e bactérias anaeróbias mesmo com o uso de aeração forçada. Estes resultados sugerem que a aeração forçada pode não suprir oxigênio para os microporos no composto e que a comunidade microbiana anaeróbica no composto pode estar tendo um papel maior no processo de decomposição (VANDERGHEYNST; LEI, 2003). O suprimento de O_2 deve ser capaz de atingir os microporos onde estão os microorganismos para manutenção da atividade aeróbia de biodecomposição.

O uso de revolvimentos na compostagem é usualmente feito para minimizar a heterogeneidade associada com gradientes de temperatura, oxigênio e umidade no sistema. VanderGheynst e Lei (2003) em referência a outros autores apontam ainda que embora o revolvimento da leira possa introduzir algum oxigênio dentro do processo, este efeito é de vida curta devido ao rápido

consumo pelos microorganismos. Alguns autores têm sugerido que o revolvimento rompe as hifas fúngicas e pode inibir a esporulação dos fungos benéficos e, baixas taxas de consumo de O_2 foram observadas em processos de compostagem com revolvimento a cada três dias comparados a processos sem revolvimento.

Procurando estudar os efeitos do manejo na dinâmica da comunidade microbiana na compostagem, VanderGheynst e Lei (2003) usaram bio-marcadores (PLFA - análise de ácidos graxos fosfolipídicos) em experimentos com biorreatores de 200 L, combinando tratamentos com níveis de aeração com e sem revolvimento da mistura (esterco de bovinos de leite com palha de arroz). Neste trabalho a comparação entre os níveis de aeração de 620 ml/mim/kg ("alta aeração") e 210 ml/min/kg ("baixa aeração"), mostrou dados que apontam para ineficiência do nível mais alto de aeração em evitar eventos anaeróbios e de estresse ambiental no processo de compostagem. Neste experimento, o aumento da aeração não melhorou a transferência de O_2 e, assim, não preveniu a atividade de microorganismos anaeróbios, apesar a alta concentração de O_2 (Fig. 4.8b). Já para os biomarcadores para eucariontes (fungos) aumentaram nos tratamentos com mais forte aeração quando a temperatura ficou abaixo de 40°C. Estes marcadores também foram maiores no processo de aeração-forçada do que com revolvimento. Segundo os

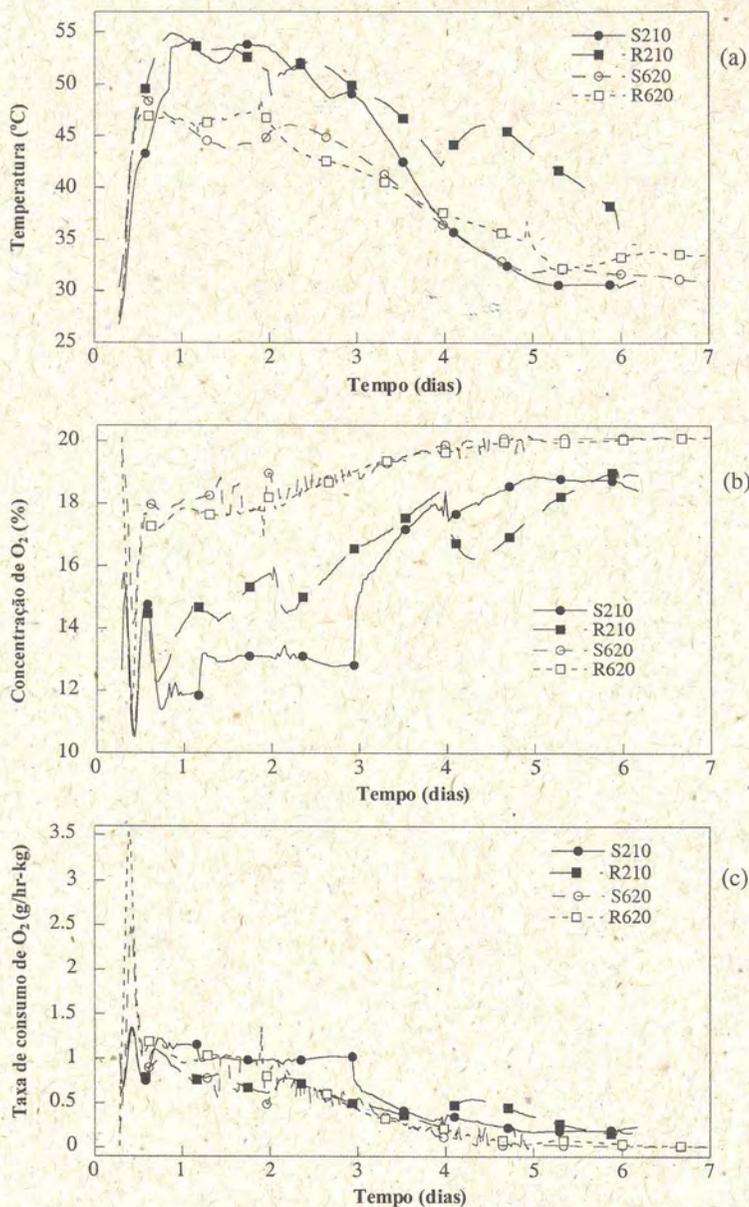


Figura 4.8 – Temperatura (a), oxigênio (b), e taxa de consumo de oxigênio (c) durante o processo de compostagem em biorreator de 200 L, e mistura de 1:2,1 de palha de arroz e esterco de bovinos de leite. Legenda: S = estático e R = Revolvido; Aeração de 210 ou 620 ml/mim/kg. Fonte: VanderGheynst e Lei, 2003.

autores do estudo, isto pode ter relação com a ruptura das hifas fúngicas ou inibição da esporulação de fungos durante a compostagem. A Figura 4.8a mostra a evolução da temperatura nos tratamentos utilizados e demonstra também que, para as condições do experimento, a aeração mais forte resultou em uma aparente maior perda de calor, já que a temperatura se manteve abaixo do esperado para o processo termofílico, não atingindo os 50°C.

Apesar das condições específicas do experimento, estes resultados são importantes para mostrar a importância de se conhecer a fundo a influência do manejo de leiras de compostagem na dinâmica microbiana e consequentemente no processo de compostagem. Técnicas amplamente difundidas, no caso a aeração-forçada e o revolvimento, podem não estar favorecendo o processo termofílico e aeróbico da compostagem como esperado e necessário. E isto tem levado à problemas com a emissão de odores, produção excessiva de percolato e proliferação de moscas, que se traduzem numa falta de segurança no controle e qualidade do processo. Gastos operacionais excessivos podem ser ocasionados por tais situações adversas no processo de compostagem.

4.5 As características dos resíduos influenciando o manejo da compostagem

Os resíduos destinados a compostagem possuem um conjunto de características que vão influenciar a atividade

microbiana direta e indiretamente e, conseqüentemente, vão determinar as estratégias da compostagem. Pode-se dizer que cada tipo de resíduo "desempenha um papel" na compostagem, do ponto de vista do manejo de uma leira. Isto é particularmente verdadeiro no Método UFSC, de leiras estáticas com aeração passiva, onde além das paredes ou bordas da leira formadas por aparas de gramas temos a mistura principal com generosa proporção de aparas de madeira ou podas, mas se aplica de maneira similar ao método de leiras estáticas com aeração forçada.

Algumas características que têm influência direta sobre a atividade microbiana, aqui entendida como o uso pelos microorganismos da energia e dos nutrientes contidos no material orgânico: relação Carbono/Nitrogênio; conteúdo de carboidratos disponíveis a biodegradação; superfície exposta às colônias de microrganismos; resistência física ou química a biodegradação e pH. As características de influência indireta seriam: porosidade da massa do resíduo (volume de vazios/volume total), efeito a estabilidade da estrutura da leira; retenção de umidade e retenção de calor (condutividade térmica). Este grupo de características tem influência sobre o fluxo de ar no interior da leira (aeração) e a perda de calor e umidade.

A compreensão de ambos os grupos de características dos resíduos remetem ao entendimento da leira de compostagem

como sendo um ecossistema microbiano. No entanto, mais atenção tem sido dada às características de composição bioquímica, ou simplesmente química, por ex. relação C/N, para se elaborar misturas de resíduos. É comum a negligência ao papel das características de influência indireta, por ex. a porosidade e o efeito à estabilidade da estrutura da leira. Um exemplo disto são as recomendações de trituração de resíduos para acelerar a compostagem que são geralmente baseadas em resultados de laboratórios e não levam em consideração problemas como a tendência ao colapso de determinados materiais, entendido como a compactação da massa orgânica úmida em decomposição, quando em leiras de compostagem. Esse colapso da estrutura da leira impede ou dificulta a aeração natural ou mesmo forçada. Ou ainda, a aversão ao uso em grande volume de material celulolítico (alta C/N), tais como aparas de madeira, serragem e palhas secas de culturas agrícolas. Estes são materiais que por sua decomposição lenta auxiliam no controle da aeração e temperatura. As consequências destas falhas são conhecidas: geração de odores desagradáveis e fortes e atração e proliferação de moscas. Operadores de pátios de compostagem mais experientes tendem a corrigir essa falha pela prática e observação.

A consideração dos grupos de características citados acima pode ser resumida

no conceito de *densidade de energia*, descrito por Miller (1993), que relaciona a disponibilidade de substrato à densidade para determinar a decomposição por unidade. Segundo este autor "a densidade de energia (substrato disponível por unidade de volume) é um conceito útil que dá alguma idéia da porosidade junto com a implicação dos requerimentos para a difusão de oxigênio e transferência de calor" (MILLER, 1993, p. 528)¹. A Figura 4.9 representa graficamente as características gerais dos resíduos orgânicos e as influências diretas e indiretas no processo de compostagem segundo o conceito apresentado acima.

Segundo Lynch (1993), apud Epstein (1997), hemicelulose, celulose e lignina são as principais fontes de carbono e energia para os microrganismos na produção de composto. No entanto, na fase inicial da compostagem os carboidratos de cadeia simples, que são prontamente disponíveis, constituem uma importante fonte de carbono e energia.

Restos de alimentos provenientes de restaurantes, refeitórios ou centrais de abastecimento são resíduos que na compostagem são fontes de carbono e energia disponíveis em forma de carboidratos de fácil biodegradação. Mas devido a esta biodegradação rápida tendem a formar massas compactas no interior das leiras que impedem o fluxo

¹ "Energy density (available substrate per unit volume) is a useful concept that gives some idea of porosity along with an implication of the requirements for O₂ diffusion and heat transfer".

de ar (fonte de oxigênio para os microrganismos aeróbios). Este é um conjunto de resíduos de considerável umidade (81%) e densidade (peso específico), ou seja, "pesados". A Tabela 4.4 mostra algumas médias de peso específico de alguns tipos de resíduos para compostagem. Importante ressaltar que resíduos de alimentos é uma denominação genérica para um grupo de restos vegetais e animais com importantes diferenças quanto à biodecomposição e, conseqüentemente, ao manejo empregado a cada tipo de resíduo.

Lodos que podem ser proveniente de estação de tratamento de esgoto ou água, ou ainda de estações de efluentes industriais, por ex. em fábricas de sorvete e bebidas ou agroindústrias, são destinados a compostagem para posterior uso agrícola, como visto no Capítulo 1. Estes biossólidos, conhecidos como lodos, possuem como característica principal a baixa porosidade, e conseqüentemente, uma maior densidade se comparados com restos de alimentos, por exemplo. Sendo assim, a compostagem destes lodos sempre necessita da mistura com materiais como a maravalha (apara de madeira ou serragem), material celulolítico de baixa densidade e que proporciona maior porosidade e estabilidade à estrutura das leiras de compostagem de lodos. Esptein (1997, p. 83) cita ainda que alguns lodos que passaram por uma digestão anaeróbica eficiente têm pouca energia (carbono) prontamente disponí-

vel para a atividade microbiana e, com frequência, isso dificulta a elevação da temperatura na compostagem sem que seja adicionada uma fonte externa de carbono disponível.

Os esterco animais têm características variáveis fundamentalmente se provém de animais monogástricos ou ruminantes. O primeiro tipo inclui os suínos, aves e equinos, enquanto o segundo tipo é representado pelos bovinos, búbalinos, caprinos, apenas para citar os grupos de maior representatividade para agropecuária. O tipo de alimentação também influi na composição do esterco. Em geral, elevado conteúdo de nutrientes, principalmente nitrogênio, está presente nos esterco de suínos e aves devido às limitações de assimilação. Esterco de bovinos já possuem grande quantidade de fibra vegetal remanescente. O esterco de aves de corte é comumente misturado a aparas de madeira (maravalha) ou serragem constituindo a cama de aviário, material rico em nitrogênio, de baixa densidade e estrutura estável, mas de baixa umidade. O esterco sólido (peneirado) de suínos é granulado e friável, com alta disponibilidade para biodecomposição. O esterco fresco de bovinos tem consistência pastosa, alta umidade, que pode trazer dificuldades para compostagem. Mas quando eliminado o excesso de umidade (esterco curtido) é um importante insumo na compostagem por sua alta disponibilidade para biodecomposição e composição de nutrientes. Diversos autores

Tabela 4.4. Peso específico de alguns resíduos.

Resíduo	Peso específico
Restos de culturas agrícolas (diversos) ^a	135 kg/m ³
Cortes de grama e similares ^a	162-475 kg/m ³
Serragem ^a	264-368 kg/m ³
Restos de alimentos ^a	940 kg/m ³
Esterco de cavalo (cama) ^b	446,9 kg/m ³
Cascas de laranjas picadas ^b	400,0 kg/m ³

Fonte: a - Rynk, 1992; b - dos autores.

apresentam tabelas com a composição provável de esterco de animais de criação. Mas esses valores são muito variáveis, e, portanto, recomenda-se que se faça análise da composição do material em cada caso. Por exemplo, camas de aviários apresentam valores de referência com variação entre 3,0 e 3,6% (base seca) na composição de N devido ao número de lotes (ver anexo) e à quantidade de maravalha usada para formar a cama no aviário. Estas variações podem ser consideráveis do ponto da produção agrícola, mas têm pouca influência na compostagem na maior parte dos casos.

Certas características dos resíduos podem determinar até a forma e a posição que o material é colocado em uma leira de compostagem, ou seja, o manejo do resíduo. Por exemplo, na compostagem de restos de restaurantes misturada a cama de biotério a leira é

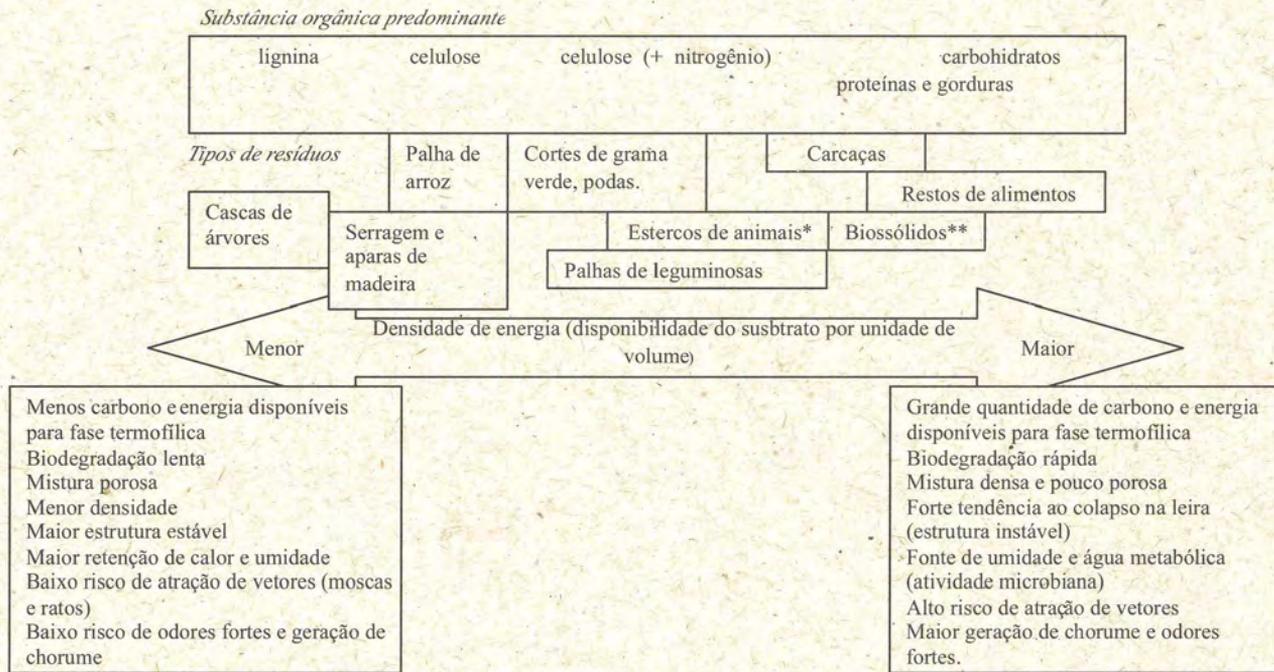
coberta por cortes de grama, folhas ou palhas. Esta camada evita a exposição do material atrativo aos vetores (moscas e ratos) e ajuda a conservar o calor na camada mais superficial da leira, o principal local de crescimento de larvas de mosca. Restos de arroz e feijão, massas e carnes² possuem características que favorecem o crescimento dessas larvas e que dificultam a ação microbiana aeróbia da compostagem. Por isso, estes materiais podem gerar focos de fermentação e larvas se mantidos aglomerados e/ou expostos, situação que pode ser desastrosa. No método de leiras estáticas a mistura do material mais problemático, com as camadas já aquecidas na leira é uma forma de manejo adequada para evitar tais problemas. Restos orgânicos de restaurantes (cozinhas) se dividem em dois grupos restos de pré-preparo e

² A palavra *carne* está em sentido amplo, significando aqui carne de animais em geral, tais como, bovinos, zebuínos, aves ou suínos.

restos do pós-consumo. O segundo grupo constitui restos mais densos e gordurosos que são mais suscetíveis a formar pontos de anaerobiose, foco de larvas de mosca e ao colapso da estrutura. A maior parte dos restos de pré-preparo é de material volumoso e sem cozimento (cru), tais como, folhas de verduras, cascas de tubérculos e raízes, e cascas de frutas, e as aparas de carnes em menor quantidade.

Materiais com excessiva quantidade de lipídios, gorduras animais e vegetais no caso de resíduos de restaurantes, que se

tornam pastosos à alta temperatura da compostagem, podem reduzir a porosidade disponível à difusão do ar, de tal forma que alguns autores recomendam considerar umidade e conteúdo lipídico juntos no cálculo da umidade dos materiais para compostagem (WILEY, 1957 apud MILLER, 1993). Na prática realmente se verifica uma dificuldade maior na condução da compostagem quando a quantidade de materiais gordurosos é grande, o que também tem forte relação com a fraca colonização inicial dos microorganismos sobre esses materiais.



* deve-se considerar os diferentes tipos de esterco, por ex., cama de aviário, esterco bovino, esterco suíno.

** a origem, o processo de estabilização, e o processo de tratamento do efluente ou esgoto influenciam nas características dos biossólidos.

Figura 4.9 – Representação das características gerais dos resíduos orgânicos e as influências diretas e indiretas no processo de compostagem.

Caio de Teves Inácio
Paul Richard Momsen Miller

5.1 Introdução

Um conjunto de aspectos ambientais é inerente ao processo de compostagem e podem causar impactos indesejáveis ao meio-ambiente e a vizinhança. A compostagem está longe de ser uma atividade de preocupante potencial poluidor. A compostagem como processo controlado é antes uma biotecnologia para se transformar resíduos orgânicos em um benefício ambiental.

Os possíveis impactos ambientais negativos da compostagem podem ser divididos em quatro grupos:

- (1) impactos causados pelas emissões de odor (substâncias orgânicas voláteis) e efluentes (percolado das leiras) ao ambiente em torno à área de compostagem;
- (2) aqueles relacionados à saúde ocupacional dos operadores;
- (3) eventual atração e proliferação de moscas nas leiras de compostagem;
- (4) e os impactos da aplicação do composto orgânico no solo.

O método de compostagem, o gerenciamento e os resíduos que serão matéria-prima na compostagem irão influir no potencial de impacto e nas preocupações ambientais na elaboração do projeto.

O gerenciamento do processo de compostagem e, também, dos resíduos que entrarão no processo determinarão os riscos ambientais e de impacto a vizinhança. Um bom manejo das leiras é o principal esforço para evitar a maior parte dos impactos indesejáveis, inclusive o odor que é o problema com maior potencial para áreas de compostagem, devido ao efeito de rejeição que pode provocar na população vizinha. Muitas áreas de compostagem são fechadas ou os projetos recusados por pressão de órgão ambiental e da sociedade em função do odor desagradável consequência de um mau manejo. O projeto de engenharia da área de compostagem também deve levar em consideração fatores ambientais e objetivar o controle e a redução de riscos ambientais. O projeto é

determinante no controle da contaminação das águas superficiais e subterrâneas e auxilia na redução da influência de odores fortes na vizinhança. A estética de um pátio de compostagem também é um fator que influencia na aceitação de um projeto pela comunidade.

Determinados impactos ambientais de um pátio de compostagem dependem dos tipos de resíduos que serão tratados e, estes, irão influenciar no adequado manejo das leiras. Resíduos como lodos de esgoto, esterco, carcaças de animais e lixo urbano não segregado vão demandar preocupações específicas no projeto e no gerenciamento do processo e escolha do método de compostagem. As características químicas e biológicas de cada resíduo influenciam a qualidade do composto e, conseqüentemente, os impactos do uso do composto, por exemplo, em relação à presença de metais pesados e poluentes orgânicos. O grau de contaminação do resíduo por patógenos que podem trazer riscos ao homem, animais ou plantas será levado em conta no manejo e monitoramento das leiras de compostagem e, também, no manuseio dos resíduos.

Como apontado anteriormente no Capítulo 3, a qualidade da engenharia da compostagem (projeto, método e gerenciamento) repousa sobre a avaliação de aspectos como, proliferação de moscas e a atratividade a outros vetores; ocorrência de odores fortes; chorume (efluente); produto final sem riscos de

contaminação do solo e água e adequado para o manuseio. O controle, eliminação ou redução de todos esses aspectos em um pátio de compostagem serão indicadores da eficiência ambiental do conjunto projeto-método-gerenciamento.

O objetivo neste capítulo é tratar dos aspectos e impactos ambientais relacionados a pátios de compostagem, que são sistemas abertos, e dar ênfase ao gerenciamento do processo de compostagem em leiras estáticas com aeração passiva. São apresentadas algumas comparações com outros métodos: revolvimento de leiras, aeração forçada; e sistemas fechados (reatores), já que o entendimento do manejo de leiras estáticas dá igualmente subsídios à condução dos desses métodos ou sistemas.

Apesar de um impacto ambiental ser resultado da interação entre as condições de um determinado local e as características do empreendimento, seus aspectos ambientais, os critérios para escolha do local para instalação da compostagem serão abordados no capítulo seguinte que trata do Projeto do Pátio de Compostagem.

5.2 A observação das leiras de compostagem

O bom gerenciamento do processo (manejo das leiras) é essencial para a prevenção dos maiores problemas de um pátio de compostagem – odor e moscas. Sendo assim, temos como principal ferramenta de controle a medição e o acom-

panhamento da temperatura das leiras. A temperatura é o indicativo do bom andamento do processo biológico da compostagem termofílica. Se as leiras apresentam temperaturas iguais ou acima de 55°C, isso indica que o processo termofílico de biodecomposição da matéria orgânica está a pleno vapor – literalmente, já que é possível observar nos dias mais frios a condensação do vapor saindo das leiras. A temperatura neste nível (>50°C) evita o crescimento de larvas de moscas, que frequentemente estão presentes nos resíduos, ou a atratividade e, conseqüente, ovoposição. A temperatura é indicativa do processo aeróbio e, portanto, com menor formação de substâncias orgânicas voláteis, origem odores fortes e indesejáveis que se desprendem principalmente no momento dos revolvimentos das leiras. Com os métodos de leiras estáticas (aeração natural ou forçada) essa situação é minimizada.

Para a medição da temperatura das leiras são usados termômetros de haste longa e com medição na faixa de 0° até 100°C, digitais ou analógicos. Os dados podem ser registrados em planilhas para que o acompanhamento do processo seja documentado. O registro permite formar um perfil de temperatura das leiras. Isso é especialmente importante se houver exigência de órgãos ambientais quanto a níveis de temperatura e períodos mínimos para redução de patógenos. Isso pode ser uma necessidade no caso de resíduos sabidamente contaminados por patógenos relevantes.

O operador deve observar o interior da leira abrindo pequenos “buracos de observação” – que serão depois fechados – para avaliar melhor a estrutura interna, o grau de decomposição, a temperatura, a presença de larvas de moscas, presença de pontos anaeróbios, e a umidade. Aprende-se muito sobre o comportamento dos diferentes materiais misturados no interior da leira observando as leiras desta maneira. É corrente na literatura técnica a verificação desses parâmetros – umidade, aeração, temperatura – sempre por uso de instrumentos. Mas é possível fazer essas verificações de modo “qualitativo”, mas igualmente eficaz, ou até mais eficaz, com a observação sensorial. “*Duas ferramentas são essenciais: seu nariz e um termômetro*”. Não precisamos nos sentir incapazes de realizar observações sobre o processo de compostagem diante da falta de instrumentos – até mesmo do termômetro. Podemos e devemos exercitar a observação interna da leira de compostagem através do que temos: visão, olfato, tato, instrumentos improvisados como barras de ferro e madeira e etc. Um operador experimentado não necessariamente vai precisar de sensores modernos. Portanto, o treinamento de operadores de pátios de compostagem baseado no conhecimento da ecologia da compostagem e na observação das leiras (do processo) sem qualquer tipo de instrumento que não seja suas capacidades sensoriais tem demonstrado ser extremamente satisfatório. Sensores serão importantes

para criar registros precisos e, portanto, documentar o processo de tal maneira que outra pessoa, ou representante de órgão ambiental, por exemplo, possa avaliá-lo pelos registros de monitoramento.

Sugere-se que a medição da temperatura das leiras seja feita diariamente e com registro em planilha eletrônica que possibilite a construção do gráfico de temperatura ao longo do tempo. Este tipo de registro permite o acompanhamento do processo com maior precisão pelo operador. A medição em profundidades diferentes e em vários pontos do comprimento da leira também é recomendada. Em leiras estáticas, pode-se empregar a medição a duas profundidades do topo, 20 e 40 cm, e, ao longo da leira, a cada 4 a 6 m, dependendo do comprimento total. Uma leira de 20 m de comprimento poderá ter de 3 a 5 pontos de medição da temperatura. Considerando as duas profundidades de leitura teremos de 6 a 10 medidas para formar uma média da temperatura da leira – é sempre mais indicado analisar as médias. É possível identificar a ocorrência de heterogeneidades no processo, que, quando exageradas, podem significar problemas no processo aeróbio ou da mistura de resíduos. O monitoramento da temperatura é o primeiro passo para o operador conhecer o processo de compostagem que tem nas mãos, ou seja, que é resultado do método empregado, da mistura dos resíduos e da influência do clima (precipitação e umidade relativa do ar).

5.3 Controle de moscas

A proliferação de larvas de mosca nos resíduos, e nas próprias leiras, é um fator que deve ser monitorado em uma unidade de compostagem. A manutenção de temperaturas termofílicas ($>50^{\circ}\text{C}$) nas leiras normalmente garantem a prevenção à proliferação de larvas de mosca (principalmente *Musca domestica*). Ovos e larvas de mosca doméstica não sobrevivem acima de 46°C . Na prática pode haver falta de uniformidade na temperatura da leira que favorece a sobrevivência das larvas e, conseqüentemente, o aparecimento de moscas adultas de forma crítica, comum em ambientes com grandes quantidades de restos de comida e dejetos de animais. Porém, nas leiras estáticas, Método UFSC, observa-se que as larvas de mosca tendem a subir e se concentrar na superfície da leira, no resíduo fresco, isso, logo abaixo da camada (capa) de palha. Então, é nesta (sub) superfície que a temperatura deve atingir o mais rápido temperaturas próximas a 50°C . O monitoramento da temperatura de leiras estáticas de restos de comida e cama de cavalo, em diferentes profundidades em relação à parede externa, mostram que neste método se alcança temperaturas acima de 50°C mesmo próximo as bordas (INÁCIO et al., 2009a). A palha usada na cobertura das leiras reduz a possibilidade de ovoposição externa e também auxilia na manutenção de temperatura adequadas na (sub) superfície da leira em função da baixa capacidade de trocar calor condutivo, favorecendo o seu acúmulo.

Por esse motivo estes resíduos, que exercem grande atratividade às moscas, quando chegam ao pátio de compostagem devem estar acondicionados em bombonas ou qualquer outro tipo de *container* fechado. Invariavelmente o resíduo antes da compostagem já possui certa quantidade de ovos de moscas em função da exposição na fonte geradora que resulta em oportunidades de ovoposição. No caso de restos de comida em restaurantes, refeitórios e similares há a possibilidade de minimização dessa exposição através do uso acondicionamento adequado. Não obstante, a ação preventiva mais eficaz é a rápida compostagem do material, isto é, reduzir o tempo de exposição do resíduo entre a geração do resíduo e a entrada deste nas leiras de compostagem.

As primeiras horas do processo de compostagem são as mais propícias ao crescimento das larvas de mosca já que no início a temperatura da leira ainda é baixa (temperatura ambiente). O material ainda está em estado "cru", úmido e formando um ambiente favorável a eclosão dos ovos de mosca e crescimento das larvas. O crescimento das larvas é rápido (ciclo de 3 a 4 dias à 35°C) e pode ocorrer antes da plena colonização microbiana da compostagem e a consequente elevação da temperatura. As larvas se agrupam na massa do resíduo para se alimentar. A ação das larvas impede a colonização dos microrganismos termofílicos e interrompe definitivamente o processo de compostagem termofílica. Esta situação

gera odores prejudiciais. Ações devem ser tomadas para dar reinício ao processo de compostagem e supressão das larvas. O crescimento de larvas de moscas nas fases adiantadas da compostagem (termofílica e maturação) é raro. Nestes casos, as ocorrências são pontuais nas leiras e não afetam o processo mas apenas a área afetada, sendo de fácil supressão.

Para efetuar o controle e prevenir infestações de moscas é importante conhecer o ciclo de vida deste inseto, que dura de 7 a 10 dias (Figura 5.1) :

⇒ Ovo – demoram para eclodir de 36 horas até uma semana, dependendo das condições do ambiente. A ovoposição dura uma semana e a fêmea pode colocar de 250 a 400 ovos nesse período divididos em 4 ou 5 posturas. Não sobrevive acima de 42°C.

⇒ Larvas – esta fase pode durar de 5 a 7 dias. Esta fase sofre forte influência da temperatura e umidade ambiente. Alimentam-se de substâncias solubilizadas e bactérias. Preferem temperaturas entre 30 e 37°C e não sobrevivem acima de 46°C.

⇒ Pupa – as larvas migram para o solo e se enterram para formar a pupa. São necessários apenas 2 a 3 dias nesta fase para formação do adulto.

⇒ Fase adulta - a mosca adulta vive de 1 a 2 meses.

As condições existentes nos resíduos orgânicos, principalmente restos de comida são extremamente favoráveis ao

crescimento das larvas de mosca podendo até mesmo acelerar sobremaneira o ciclo larval.

É importante que a camada superior da leira seja de um material não atrativo às moscas como a serragem ou a palha. Esses materiais isolantes auxiliam na manutenção de uma camada superior suficientemente aquecida que evita o desenvolvimento das larvas. As larvas tendem a adotar um movimento ascendente dentro da leira em função da alta temperatura na parte interna da leira buscando pontos mais frios e com alimento. A ausência dessas condições favoráveis

interrompe o crescimento da larva que morrerá devido à exposição a alta temperatura do meio e ao vapor aquecido que sai pela parte superior da leira.

Desta forma, é importante não colocar novas camadas de resíduos num prazo de pelo menos 24 horas a 36 horas. Essa nova camada fria e crua servirá de refúgio às larvas que encontram ambiente adequado para se desenvolverem a cada novo dia. Leiras que não tenham aquecido neste prazo também devem ser descartadas como receptoras de novas camadas de resíduos gordurosos como as sobras de comida.

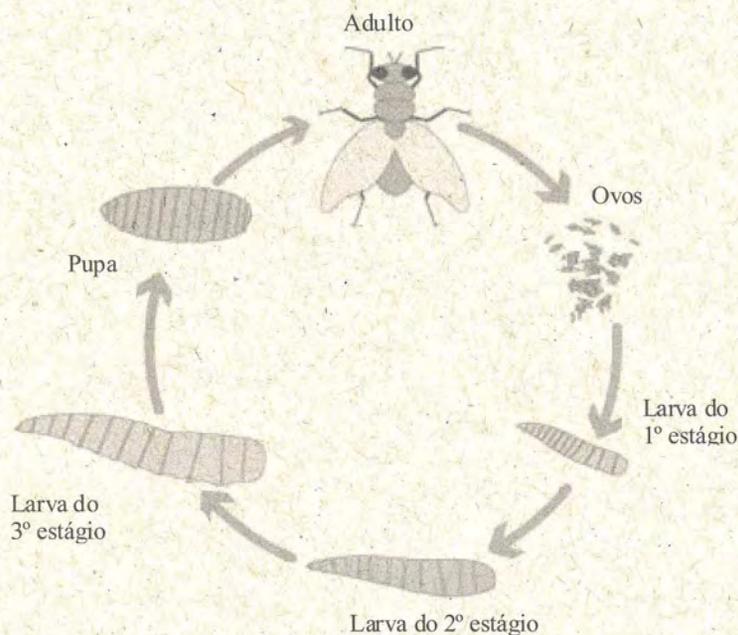


Figura 5.1 – Ciclo de vida da mosca doméstica. Fonte: Novartis (2009).

Em caso de alta infestação de larvas o que sempre será visível na parte superior das leiras sob a camada de palha, adota-se o seguinte procedimento:

⇒ interrompe-se por pelo menos 5 dias a colocação de novas camadas de resíduos.

⇒ abre-se a leira retirando a palha de cobertura. Abre-se uma "cova" dentro da leira em sentido longitudinal até atingir as camadas aquecidas do interior da leira. Mistura-se a camada superior para dentro da leira. Procura-se também trazer para cima as partes aquecidas e com de-composição mais avançada para formar a nova camada superior.

O importante nesses casos é procurar entender o porquê desta falta de controle. As causas mais comuns são:

⇒ falta da camada de serragem ou palha;

⇒ esfriamento da leira por falta de oxigenação que está relacionada à maneira que a leira é confeccionada e ao colapso da massa de resíduos;

⇒ esfriamento por chuvas excessivas ou por perda excessiva de umidade em função de ventos secos;

O monitoramento do crescimento das larvas de mosca deve ser diário em todas as leiras. Elas aparecerão sempre sob a camada de palha que cobre a leira na superfície da camada superior de serragem. É possível monitorar o grau de sobrevivência das moscas procurando as pupas que estão enterradas no solo imediatamente ao redor da leira.

5.4 Geração de Chorume (Percolado)

O percolado das leiras, chamado comumente de chorume, é um líquido de cor marrom-escuro e odor característico que contém partículas decantáveis de matéria-orgânica biodegradável e matéria-orgânica dissolvida, e sais dissolvidos. A composição do percolado das leiras pode variar conforme a composição dos resíduos. Por exemplo, o percolado coletado de leiras estáticas de compostagem de restos de alimentos e cama de animais do biotério e cortes de grama apresentou os seguintes valores médios para: DBO_{máxima} 2300 O₂mg/l; DQO_{máxima} 2500 O₂mg/l; 970 mg/l N_{total}. E valores equivalentes de P e K de 190 mg/l em P₂O₅; 2400 mg/l em K₂O, com um conteúdo de água 98,8% e pH: 8,0 (médio).

O percolado tem, portanto seu potencial poluidor manifestado principalmente pela alta DBO (carga orgânica) e DQO, sendo que a relação DBO/DQO indica alta biodegradabilidade. DBO e DQO indicam o consumo de oxigênio do efluente durante a degradação (biológica e/ou química) representando um risco se despejado em águas superficiais, como rios, lagos, reservatórios e tanques de criação de peixes, pela redução brusca de oxigênio disponível (Quadro 5). No entanto, este efeito está diretamente ligado à carga orgânica, isto é, a quantidade relativa à vazão ou volume que é despejada e não somente ao valor de DBO do percolado. O lençol freático cor-

re menor risco de contato com o percolado desde que se evitem áreas com afloramento de água e com lençol freático próximo a superfície, principalmente se associado a solos arenosos. O percolado é prontamente biodegradável e ao infiltrar no solo sofre a ação dos microorganismos e a ação das partículas do solo, perdendo sua carga poluidora. O percolado pode ser utilizado na fertirrigação diretamente ao solo, mas para aplicação foliar deve ser diluído a 2% com água. Em todos os casos, no entanto, devemos considerar outros potenciais de contaminação como agentes patogênicos e metais pesados que devem ser analisados nas amostras de percolado, especialmente na compostagem de lodos de esgoto, materiais orgânicos originados de processos industriais, e lixo urbano não seletivo.

A presença elevada de amônio e nitrato no percolado constitui uma possibilidade de poluição. Embora o nitrato possa ameaçar as águas do lençol freático, normalmente leiras em fase termofílica possuem baixa concentração de nitratos e maiores concentrações de amônio, que também é tóxico para peixes e seu excesso causa eutrofização dos corpos d'águas. Fora do ambiente termofílico da leira, o íon amônio poderá sofrer nitrificação formando nitrato. As relativas baixas concentrações resultam da alta relação carbono nitrogênio e das altas temperaturas durante a compostagem – as quais inibem os microorganismos formadores de nitrato.

Leiras em maturação e armazenadas tem maior potencial como fonte de nitrato. Os resíduos estocados também são fontes potenciais de chorume. A matéria orgânica e a amônia (esta tóxica aos peixes) podem criar problemas nas águas superficiais devido ao consumo de oxigênio – DBO e DQO.

As formas dissolvidas de fósforo, o potássio e nitrogênio presentes no percolado podem levar à eutrofização do corpo hídrico dependendo do volume relativo despejado, principalmente, se atingir pequenos reservatórios ou córregos. A alta atividade biológica, aeróbia e termofílica, mantida nas leiras favorecem uma baixa produção de percolado. Em processos com revolvimentos esta produção de líquido tende a ser maior do que em leiras estáticas – aeração forçada ou natural. O poder de absorção de água de alguns materiais usados na compostagem, notadamente a serragem, também contribui para redução do volume de líquido que sai das leiras. Há ainda a absorção pela camada de solo abaixo das leiras onde a argila absorve os sais e humatos de potássio que predominam no percolado, e se torna parte do produto final. Na coleta efetuada em uma leira de compostagem de grama, restos de comida e cama de biotério, o chorume representou apenas 4,8% do total de água que entrou no sistema pela precipitação ou conteúdo de água dos resíduos orgânicos o equivalente a 80 litros por semana, enquanto a entrada no período foi de 1.688 litros por semana (Figura 5.2). O balanço hídrico em

uma leira de compostagem foi descrito no Capítulo 4. A Figura 5.2 mostra que a precipitação pluviométrica influenciou menos do que se esperava a percolação de líquido da leira estática.

Apesar da grande variação na quantidade de chuvas as quantidades de chorume coletadas diariamente quase não se alteraram, seguindo um comportamento quase homogêneo sem acompanhar as curvas de crescimento de entrada de água na leira. A quantidade e o tipo de resíduos destinados ao pátio de compostagem, isto é, a capacidade de tratamento diário de resíduo, vão influenciar na produção de percolado e determinar a necessidade de coleta e tratamento deste efluente para evitar impactos ambientais. Sistemas para tratamen-

to local de esgoto doméstico podem ser projetados para tratar os efluentes de unidades de compostagem, evitando o despejo na rede de coleta municipal, ou, ainda, pode-se fazer a recirculação controlada e sistemática do percolado para as leiras de compostagem na fase termofílica (ver Capítulo 6).

5.5 Emissão de odores

A compostagem mal conduzida leva a geração de odores desagradáveis relacionados à decomposição da matéria orgânica em condições de anaerobiose. Na compostagem os principais gases relacionados ao mau cheiro são compostos organo-sulfurados como H_2S , CH_3SH (MeSH- metil mercaptan), $(CH_3)_2S$ (DMS - dimetil sulfeto), DMDS (dimetil

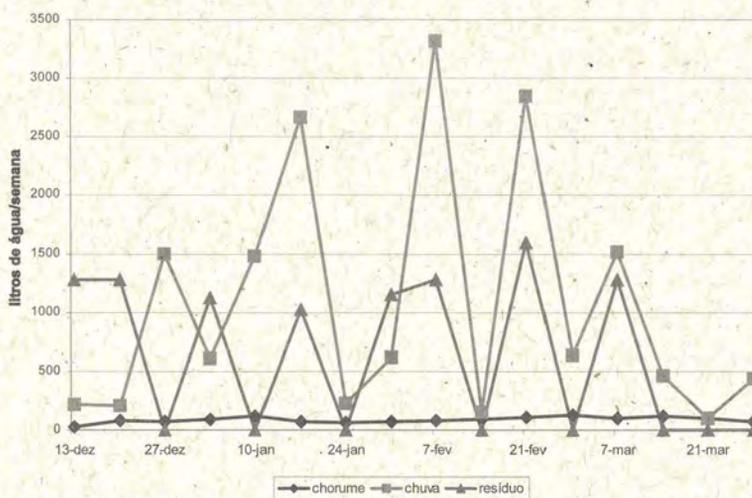


Figura 5.2 - entradas de água via chuva e unidade dos resíduos e a saída de percolado (chorume) em uma leira de compostagem de 36 m^3 ($3 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 1,2 \text{ m}$), formada por restos de comida, cama animal com serragem e cortes de grama - métodos de leiras estáticas com aeração passiva. Campus UFSC. Florianópolis, 2002.

Quadro 5 – Demanda Bioquímica de Oxigênio e Demanda Química de Oxigênio

A carga poluente de resíduos e efluentes com carga orgânica pode ser parcialmente medida pelas DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) e DQO (Demanda Química de Oxigênio). A $DBO_{5,20}$ é definida como a quantidade de O_2 ($mg.l^{-1}$) consumida por microorganismos na degradação da matéria orgânica, a $20^\circ C$, num período de 5 dias. A DQO é a quantidade de O_2 necessária para oxidar quimicamente a matéria orgânica, através do dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) em meio ácido a $160^\circ C$. A relação DQO/DBO pode ser usada para estimar o grau de biodegradação relativo que é maior quando a relação tende a 1,0. Conforme se afasta desse valor a relação pode indicar que o resíduo ou efluente tem apenas uma pequena parte prontamente biodegradável.

Relação DQO/DBO de alguns tipos de resíduo (CARDOSO, 1992).

Resíduo	DQO	$DBO_{5,20}$	DQO/ $DBO_{5,20}$
	$mg.l^{-1}$		
Esgoto doméstico bruto	500	300	1,67
Esgoto doméstico tratado	50	10	5,00
Vinhaça	60.000	30.000	2,00
Resíduo de curtume	13.000	1.270	10,24
Resíduo bruto de indústria de celulose e papel	620	226	2,74
Resíduos tratado de indústria de celulose e papel	250	30	8,33
Percolado de leiras de compostagem (restos de alimentos e cortes de grama)	2500	2300	0,92

dissulfeto), COS (carbonila sulfeto) (VANDERGHEYNST et al., 1998). A geração de odores varia com o tipo de resíduo e estágio da compostagem, bem como, é função do gerenciamento e do método utilizado. Os compostos sulfurados são frequentes na decompo-

sição de restos de comida ou qualquer outro resíduo rico em aminoácidos. Limoneno (odor cítrico) e pineno são compostos aromáticos (ciclo terpenos) também emitidos quando aparas de madeira são usadas como agente estruturante na compostagem de

biossólidos (HENTZ et al., 1992; Van DURME et al., 1992 apud EPSTEIN, 1997). Alguns trabalhos sugerem que a detecção de CO (monóxido de carbono) pode ser um bom antecedente detectável da formação de odores de processos de compostagem (VANDERGHEYNST et al., 1998).

Este tem sido um dos principais problemas observados em pátios de compostagem e que tem influenciado a não implantação deste sistema de transformação dos resíduos orgânicos ou a desativação de pátios. Existem exemplos de unidades de triagem de resíduos onde são utilizados aspersores químicos na tentativa de neutralizar os fortes odores, que é uma solução dispendiosa. A persistência de fortes odores pode levar nesses casos ao fechamento de uma unidade pelo órgão ambiental estadual.

Pátios de compostagem que utilizam o método de Leiras Estáticas com Aeração Passiva (ver Capítulo 3) têm demonstrado capacidade de evitar problemas com emissão constante de odores fortes apesar da ausência de aparatos tecnológicos. O método baseado na aeração passiva tem proporcionado um fluxo de oxigênio adequado evitando a formação de odores e sua emissão pela leira. Eventos com odores fortes têm ocorrido com baixa frequência e apenas durante o revolvimento ao final do processo para maturação do composto quando se expõe a parte interna e inferi-

or da leira. Em alguns casos, devido a descuidos na formação da leira, geralmente por falta de material volumoso (aparas de madeira), essa parte inferior da leira apresenta ambiente anaeróbico e consequentemente emissão de forte odor quando revolvida. No entanto, esses odores não persistem no ambiente e tão pouco na massa do composto revolvida e em maturação.

Para projetos que usam a tecnologia de reatores e aeração forçada em pátios abertos, emissão de odores pode ser solucionada pelo controle da intensidade de aeração (aeração forçada) e limpeza do ar por biofiltros. Problemas com odores são mais difíceis de resolver em sistemas baseados no revolvimento das leiras de compostagem. Nesses casos, alguns manuais indicam o revolvimento mais frequente no início do processo de compostagem para prevenir o desenvolvimento de zonas anaeróbicas. A aspersão muito fina de água durante o revolvimento das leiras ajuda a reduzir o problema com odores porque as moléculas tendem a se dissolver dentro das gotículas de água e são levadas ao solo (POULSEN, 2003). A manutenção da adequada aeração e umidade e, consequentemente, a manutenção da fase termofílica da compostagem é a melhor forma de evitar a formação de odores que é "mínima durante as altas temperaturas geradas no processo de compostagem" (WILBER; MURRAY, 1990 apud EPSTEIN, 1997).

5.6 Eliminação de organismos patogênicos (saúde humana)

Os resíduos orgânicos são meio propício ao crescimento de microrganismos indesejáveis que podem trazer riscos à saúde humana dependendo do nível de contato e contaminação. Um exemplo são os lodos orgânicos gerados por estações de tratamento de esgoto. Do ponto de vista agrícola, os resíduos vegetais e os dejetos animais são fontes de patógenos para lavouras (fitopatógenos) e para animais. A compostagem aparece como uma forma de tratamento desses resíduos que propicia o uso benéfico de em forma de um produto final, o composto orgânico. Através da compostagem pode-se ter a eliminação ou redução a níveis seguros desses variados patógenos no composto final. Esse efeito se deve a dois fatores: (1) as temperaturas atingidas na compostagem termofílica, acima de 55°C por longos períodos (dias); e, (2) o antagonismo microbiano via antibióticos.

Alguns organismos indesejáveis causadores de doenças ou tóxicos ao homem ou a animais, e fitopatógenos podem crescer e se reproduzir na matéria orgânica, estabilizada ou não. Isto quer dizer que os resíduos que serão destinados à compostagem podem ter a presença de uma gama de agentes causadores de doenças ou intoxicações. Podem ser bactérias (*Salmonella*, por ex.), vírus entéricos, protozoários ou helmintos (vermes intestinais). Geralmente conta-

minam e sobrevivem nos resíduos manipulados, como restos de comida, ou em contato com fezes de animais domésticos, no caso de restos de jardins, ou ainda, o lixo urbano que reuni diferentes fontes de resíduos que podem trazer patógenos. Os lodos de esgoto oriundos das Estações de Tratamento carregam forte carga de patógenos, e são, portanto, alvo de regulamentação por órgãos ambientais. Este tipo de resíduo necessariamente deve passar por processos de desinfecção para ser possível o uso agrícola, ainda assim, restrito e controlado.

Normalmente o processo de compostagem termofílica inativa ou elimina esses organismos indesejáveis por exposição às altas temperaturas por longos períodos. A inativação ou morte de cada organismo depende de uma combinação de temperatura e tempo de exposição, como mostra Tabela 5.1. A Figura 5.3 mostra o efeito da temperatura na inativação de *Streptococcus* oriundo de fezes. Existe a preocupação que toda a massa da compostagem atinja as temperaturas e tempos necessários requeridos para garantir que o composto pronto esteja livre ou praticamente livre desses agentes indesejáveis, já que partes não expostas de material, onde microrganismos sobrevivam, podem servir de fonte para o crescimento desses microrganismos no composto pronto. Além do efeito da temperatura, a intensa competição microbiológica e as interações ecológicas, como o antagonismo via antibióti-

Tabela 5.1 – Temperatura e tempo requeridos para destruição de alguns patógenos e parasitas comuns.

Organismos	Requisitos de inativação
<i>Salmonella typhosa</i>	Morte em 30 min a 55-60°C e em 20 min a 60°C
<i>Salmonella</i> sp.	Morte em 1 h a 55°C e em 15-20 min a 60°C
<i>Shigella</i> sp.	Morte em 1 h a 55°C
<i>Escherichia coli</i>	Maioria morre em 1 h a 55°C e em 15-20 min a 60°C
<i>Entamoeba histolytica</i> cysts	Morte em alguns min. a 45°C e em alguns segundos a 55°C
<i>Taenia saginata</i>	Morte em alguns min. a 55°C
<i>Trichinella spiralis</i> larvae	Morte em alguns min. a 55°C e morte instantânea a 60°C
<i>Brucella abortus</i> ou. Br. Suis	Morte em 3 min. a 62-63°C e em 1 h a 55°C
<i>Micrococcus pyogenes</i>	Morte em 10 min. a 50 °C
<i>Streptococcus pyogenes</i>	Morte em 10 min. a 54 °C
<i>Myobacterium tuberculosis</i>	Morte em 15-20 min. a 66°C ou depois de picos de temperatura de 67°C
<i>Corynebacterium diphtheriae</i>	Morte em 45 min. a 55°C
<i>Necator americanus</i>	Morte em 50 min. a 45°C
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Morte em 1 h a 50° C

Fonte: Tchoubanoglous et al., 1993 apud Poulsen, 2003.

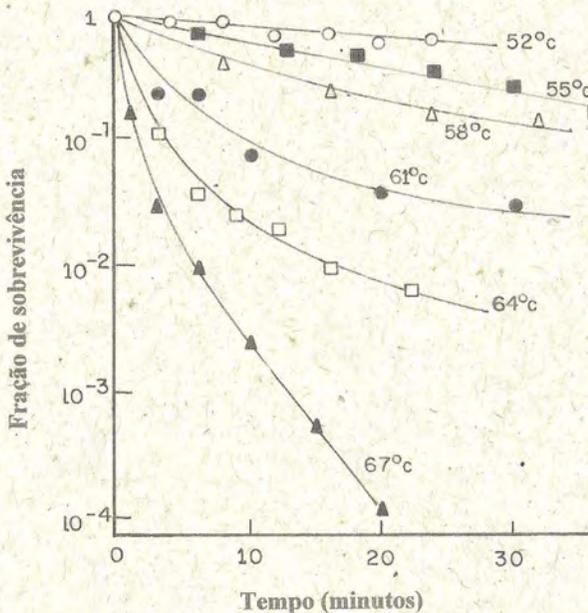


Figura 5.3 – Inativação térmica de *Streptococcus fecal* em compostagem de biossólidos.

Fonte: Ward e Brandon, 1977 apud Epstein, 1997.

cos-microbainas, no processo de compostagem também limitam a sobrevivência desses microrganismos patogênicos (WILEY, 1962 apud EPSTEIN, 1997).

Nos EUA, o manejo de material orgânico é regulado em nível estadual, exceto para biossólidos (lodos) e esterco animal. Os requerimentos diferenciam o método de compostagem e os resíduos usados. Para sistemas fechados (reatores) e leiras estáticas aeradas devem ser mantida a temperatura de pelo menos 55°C (131°F e 170°F) durante 3 dias. Para método de leiras revolvidas, a compostagem deve ser mantida a pelo menos 55°C (131°F e 170°F) por 15 dias, e durante este tempo, as leiras devem ser revolvidas pelo menos cinco vezes. É importante ressaltar que essas diretrizes são exigidas apenas se algum tipo de esterco for misturado (o mesmo vale para lodos de esgoto). Quando as leiras são feitas apenas com restos de comida e restos vegetais estes requerimentos não são aplicados. Essas diretrizes constam das normas do Programa Nacional de Agricultura Orgânica do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA / NOP) que são alinhadas com normas da Agência de Proteção Ambiental (USEPA) para processos de compostagem (EPA 40 CFR 503, 1993 – compostagem de lodos de esgoto; NOP regulations p.7 - 8). As regulamentações costumam conter níveis de exigências e restrições, e a preocupação maior é sempre com o lodo de esgoto (biossólidos) e resíduos sólidos urbanos não segregados. Poulsen (2003, p.75) cita que na Dina-

marca a temperatura no composto deve ser no mínimo 70°C por no mínimo uma hora para o composto poder ser usado sem restrições – nível mais exigente. Segundo explicando que, “isso significa que o composto produzido em leiras deve ser higienizado em um reator especial ao final do processo porque não é possível ter certeza que todo o composto tenha sido exposto as temperaturas requeridas. Isto adiciona custos significativos com consumo de energia e custo ao processo de compostagem. Devido as taxas de inativação dependerem do processo de compostagem, métodos alternativos para avaliação da inativação níveis baseados nas concentrações iniciais e finais de organismos indicadores são usualmente adotadas na Europa.”

No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA se baseou nas normas da USEPA para elaborar as resoluções nº375 e nº380 de 2006, que definem: “*critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados*”. Esta resolução indica no Anexo I os (1) processos de redução significativa de patógenos e os (2) processos de redução adicional de patógenos. A compostagem é um dos processos indicados e aparece como a seguir: (1-d) compostagem (...), desde que a biomassa atinja uma temperatura mínima de 40°C, durante pelo menos cinco dias, com ocorrência de um pico de 55°C, ao longo de quatro horas sucessivas durante este período; e (2-a)

compostagem confinada ou em leiras aeradas (3 dias a 55°C no mínimo) ou com revolvimento das leiras (15 dias a 55°C no mínimo, com revolvimento mecânico da leira durante pelo menos 5 dias ao longo dos 15 do processo). Estas resoluções são aplicáveis para compostagem de lodo de esgoto mas podem ser um referencial para obtenção de um composto sanitariamente seguro, independentemente do resíduo usado. Os processos indicados são "necessários para obtenção de lodos de esgoto ou produto derivado", respectivamente, tipos B ou A, como estipulado pela resolução, como a seguir (Tabela 5.4):

A resolução 358 prevê ainda (Art 11):

§ 1º Decorridos 5 anos a partir da data de publicação desta Resolução, somente será permitida a aplicação de lodo de esgoto ou produto derivado classe A, exceto sejam propostos novos critérios ou limites baseados em estudos de avaliação de risco e dados epidemiológicos nacionais, que demonstrem a segurança do uso do lodo de esgoto Classe B.

E prevê que (Art. 7º) a caracterização do lodo de esgoto ou produto derivado a ser aplicado deve incluir os seguintes aspectos:

§ 5º Para a caracterização do lodo de esgoto ou produto derivado quanto à presença de agentes patogênicos e indicadores bacteriológicos, deverão ser determinadas(...), e as concentrações de:

- I - coliformes termotolerantes;
- II - ovos viáveis de helmintos;
- III - Salmonella; e
- IV - vírus entéricos.

Podem ocorrer uma recontaminação de patógenos durante a estocagem ou manuseio do composto, o produto final. Estudos sobre a presença de *Salmonella* no composto apontam para este fato, mas ao mesmo tempo não consideram esta recolonização motivo de maiores preocupações, já que não atinge contagens elevadas e o produto será aplicado ao solo. Algumas práticas simples evitam que esta contaminação ocorra como

Tabela 5.4 – Classes de lodo de esgoto ou produto derivado – agentes patogênicos.

Tipo de lodo de esgoto ou produto derivado	Concentração de patógenos
A	Coliformes Termotolerantes <10 ³ NMP / g de ST Ovos viáveis de helmintos < 0,25 ovo / g de ST <i>Salmonella</i> ausência em 10 g de ST Vírus < 0,25 UFP ou UFF / g de ST
B	Coliformes Termotolerantes <10 ⁶ NMP / g de ST Ovos viáveis de helmintos < 10 ovos / g de ST

ST: Sólidos Totais; NMP: Número Mais Provável; UFF: Unidade Formadora de Foco;
UFP: Unidade Formadora de Placa.

a não utilização das mesmas ferramentas e máquinas para a manipulação de resíduos *in natura* e do composto acabado (EPSTEIN, 1997, p. 229-234).

Os riscos para quem trabalha diretamente na compostagem estão ligados a ingestão acidental via uso de cigarros ou comida durante os trabalhos. O potencial de contaminação é maior no momento de descarga e manipulação dos resíduos que chegam ao pátio de compostagem. Equipamentos individuais de proteção simples como luvas e máscaras para pó são, em geral, suficientes. Práticas higiênicas devem ser adotadas, como a lavagem das mãos, não comer e fumar no pátio de compostagem. Práticas preventivas de controle de poeira são recomendadas. Estudos apontam para um risco baixo para os trabalhadores, mas este risco será maior quando tivermos lodo de esgoto (EPSTEIN, 1997, p. 213-237).

5.7 Efeitos sobre metais pesados

O termo *metal pesado* refere-se a elementos químicos, metais e semi-metais, que podem em determinada condição ou circunstância oferecer riscos à saúde e ao meio ambiente. Estes elementos ocorrem em pequenas quantidades na crosta terrestre, por isso a nomenclatura mais atual designá-los de *elementos traço*. Alguns desses elementos traço desempenham papéis importantes na fisiologia de vegetais e animais, incluindo o ser humano. Nesta condição são chamados de *micronutrientes*, ou simples-

mente nutrientes, mas que em concentrações e disponibilidade altas podem causar doenças e mau funcionamento fisiológico. Processos industriais, tais como mineração e metalurgia, disponibilizam esses elementos em concentrações elevadas para o ambiente podendo ocasionar contaminações de solo. O uso de agrotóxicos e adubos industrializados também são fontes de metais pesados para o ambiente.

A compostagem é reconhecidamente uma maneira de se reduzir a disponibilidade de metais pesados presentes nos resíduos orgânicos, especialmente lodos de esgoto e outros tipos de lodos industriais, que serão utilizados na agricultura. A compostagem não elimina esses elementos, tão pouco os perde de maneira significativa para o ambiente, mas diminui a possibilidade desses metais pesados ficarem disponíveis no solo para extração pelas plantas ou para lixiviação para águas subterrâneas. Este efeito é devido a forte capacidade das substâncias húmicas (ácidos húmicos e fúlvicos), presentes no composto, formarem quelatos ou, simplesmente, adsorverem esses metais deixando-os indisponíveis (BAIRD, 2002). Epstein (1997, p. 152) cita em seus trabalhos com leiras de compostagem que "menos de 2% do total de metais foi lixiviado, sendo o níquel o mais móvel e o chumbo o menos móvel". É importante ressaltar que a disponibilidade desses metais é fortemente influenciada pelo pH do meio, no caso o solo quando o composto é aplicado na

agricultura. Meios ácidos aumentam a disponibilidade da grande maioria desses metais pesados, mesmo na presença de matéria orgânica. Além disso, a legislação ambiental para uso de biossólidos e fertilizantes orgânicos considera o conteúdo total de cada elemento metal pesado, como veremos adiante.

A presença de metais pesados no composto vai depender da contaminação existente na fonte geradora dos resíduos que entrarão na compostagem. Alguns metais pesados que podem ser encontrados no composto são especialmente importantes porque podem acumular-se em plantas e partes de plantas de uso alimentício como; cobre (Cu), zinco (Zn), cromo (Cr), mercúrio (Hg), cádmio (Cd), chumbo (Pb), níquel (Ni), e arsênio (As). Alguns deles são tóxicos e carcinogênicos como mostra a Tabela 5.5.

Isto quer dizer que os metais presentes no material usado para fazer a compostagem irão também ser encontrados no composto pronto. Atualmente não existe uma maneira prática de se

remover esses metais pesados do material orgânico uma vez que tenham sido misturados. A única solução para prevenir a contaminação por metais é, portanto localizar a fonte de contaminação e tomar ações para prevenir a contaminação na fonte (POULSEN, 2003).

As principais fontes de metais pesados são: fração não orgânica do lixo urbano, poluição atmosférica (carros e indústrias), despejos industriais, agrotóxicos e alguns fertilizantes fosfatados. Estercos de animais monogástricos (suínos e aves) atualmente exibem quantidades elevadas de Cu e Zn pelo fato das rações fornecidas a esses animais conterem até 250 mg/kg de Cu como CuSO_4 e até 80 mg/kg de Zn como ZnSO_4 . "O lodo de esgoto estritamente urbano possui normalmente uma quantidade baixa de metais pesados, mas quando despejos industriais e a água da chuva entram no sistema de captação do esgoto urbano, este pode ter sua concentração de metais aumentada significativamente" (BERTON, p. 259). A disponibilidade dos metais pesados no solo está relacio-

Tabela 5.5- Alguns metais e semimetais de importância ambiental (toxicidade aguda para mamíferos).

Símbolo químico	Metal/semi-metal e ligações	Toxicidade ¹
As	Arsênio	t, c, p
Pb	Chumbo	pt
Cd	Cádmio	pt/t, c, p
Cu	Cobre	pt, p
Ni	Níquel	c, p
Hg	Mercúrio	mt
Zn	Zinco	p

1) mt = muito tóxico; t = tóxico; pt = pouco tóxico; c = carcinogênico; p = geram resíduos perigosos em plantas úteis.

Fonte: Schianetz (1999).

nada ao pH do solo. O pH básico favorece a disponibilidade dos metais, As, Mo e Se, mas em pH ácido um grupo maior de metais pesados torna-se mais solúveis, Cd, Cu, Hg, Ni, Pb e Zn. Alguns desses metais são micronutrientes vegetais, comumente presentes nos solos (Cu, Ni e Zn) e que desempenham funções nas rotas metabólicas das plantas.

Trabalhos de avaliação também demonstram que a compostagem de resíduos urbanos (lixo) não segregados na fonte em grandes cidades tendem a produzir um composto com maior concentração de metais pesados que processos semelhantes em pequenas cidades (JORDÃO et al., 2006). A segregação na fonte da fração orgânica dos resíduos urbanos é uma estratégia usual e eficaz. Restos de comida de restaurantes e refeitórios podem ser separados ainda na fonte, e seguirem para compostagem sem sofrer mistura com o resíduo urbano contaminado.

Apesar de haver a contaminação por metais pesados no composto de resíduos urbanos e lodo de esgoto, o conteúdo desses metais raramente ultrapassa os limites das normas ambientais. Azevedo et al. (1999) analisaram o conteúdo de sete metais pesados do composto de resíduos urbanos processado na "usina de compostagem" de Irajá/RJ¹ e confrontaram os resultados com normas de diversos países. Neste trabalho o composto analisado estava em conformidade com a regulamentação da EPA, França e Co-

munidade Econômica Européia, mas ultrapassou os limites de Cr, Ni, Pb, Zn e Cu para a norma da Alemanha. Os valores de metais pesados em lodo de esgoto encontrados seguiram o mesmo resultado comparativo de conformidade, mas apresentaram concentrações significativamente mais elevadas dos metais pesados analisados.

Estudos mais recentes sobre os efeitos do uso de composto de lixo urbano produzido no Brasil sobre acumulação de metais pesados no solo e plantas cultivadas apontam para níveis dentro dos limites permitidos, sugerindo que os metais pesados provavelmente não serão o principal limitante nas estimativas de aplicação em solos agrícolas. Este mesmo estudo mostra que os elementos mais relevantes foram Cu e Pb pela acumulação na camada superficial do solo (0-5 cm); e, Fe e Cu, em couve-flor, e Pb e Cu, em rabanete, por terem suas concentrações foliares auteradas significativamente devido a aplicação do composto urbano (PEREZ et al., 2007). No entanto, a compostagem de resíduos urbanos oriundos de separação na fonte geradora reduz imensamente, ou elimina, tais riscos. A Tabela 5.6 compara os resultados das análises de alguns compostos de lixo urbano produzidos em cidades brasileiras com normas de vários países.

Estas normas nos EUA e Europa, e também no Brasil, seguem dois focos: (1) limitar o conteúdo do elemento no pro-

¹ Desativada.

duto final, ex. mg de metal pesado / Kg de composto; (2) limitar a quantidade de elemento aplicada ao solo por ano, ex. Kg de metal/ ha.ano. Além disso, incluem o monitoramento da concentração do elemento no solo em função do tipo de solo e pH e, também, limitam a aplicação do composto ou biossólido a certas culturas agrícolas como, pastagens, florestamento, ornamentais, restringindo ou não permitindo a aplicação em hortaliças, frutíferas e grãos.

Estudos brasileiros, no Estado do Paraná, para regulamentação do uso de biossólidos apontam para um limite máximo de 50 ton./ha (massa seca*) em dez anos e exige monitoramento constante do acúmulo destes elementos no solo. No caso de biossólidos, um outro fator de preocupação ambiental tem sido o excesso de nitrogênio. Existe a "tendência de controlar o volume de lodo a ser aplicado em função da capacidade de assimilação de nutrientes, principalmente ao elemento nitrogênio" (ANDREOLI; PEGORIN, p. 291). Pesquisas têm indicado que a preocupação ambiental na aplicação de lodos de esgoto deve repousar no conteúdo e taxa de mineralização do nitrogênio, devido aos riscos potenciais maiores na contaminação do lençol freático por nitrato e eutrofização de rios e lagos. Dados de pesquisas reunidos por Matiazzo e Andrade (2000, p.

206), "sugerem ser o nitrogênio o fator mais limitante na definição de taxas e frequências de aplicação de biossólidos em áreas agrícolas e florestais do que metais pesados". Neste ponto a compostagem de lodos de esgoto cumpre um papel importante estabilizando este material reduzindo a liberação de nitratos e amônio via aplicação no solo e com isso o risco de contaminação da água.

Abaixo o quadro de limites máximos de concentração de metais pesados editados na resolução CONAMA nº375/2006 para lodos de esgoto ou produtos derivados (biossólidos). Bem como a carga máxima de aplicação no solo (Tabelas 5.7 e 5.8). Esta resolução também traz restrições quanto as culturas agrícolas. Já o Ministério da Agricultura normatiza o limite máximo de contaminantes admitidos em fertilizantes orgânicos pela Instrução Normativa 27 (2006), sendo esta regulamentação mais restrita (Tabela 5.9).

A regulamentação dos níveis toleráveis de metais pesados vem sendo constantemente atualizada no Brasil, e as restrições podem variar em diferentes estados. Há diferenças significativas também entre a legislação de países e blocos econômicos. Portanto, cabe aqui, ao leitor, buscar constante atualização das informações sobre este assunto.

Tabela 5,6 – Alguns elementos químicos em composto de lixo urbano produzidos em cidades do Brasil comparados com limites internacionais regulamentados para uso agrícola de bio sólidos.

Origem ^a	Fe(x10 ⁻³)	Mn	Cu	mg kg ⁻¹ matéria seca				
				Cd	Co	Cr	Ni	Pb
Brasil ^b	23,3 (13,7)	304 (132)	229 (226)	2,8 (1,7)	10,8 (4,9)	89,9 (45,1)	32 (27)	238,9 (166,4)
Brasil	11-23	-	61-233	0,1-0,5	-	76-104	20-31	44-342
Brasil	103-572	-	72-2991	0,3-12,8	-	60-278	19-78	57-1272
Brasil	88-252	-	64-1970	0,7-4,5	-	33-133	17-38	44-274
USA	-	-	1500	39	-	1200	420	300
C.E.	-	-	1000-1750	20-40	-	-	300-400	750-1200
França	-	-	1000	15	-	1000	200	800
Alemanha	-	-	800	10	-	900	200	900
Holanda	-	-	75	1,25	-	75	30	100

^a Quatro fontes de dados para o Brasil. ^b Média e desvio padrão entre parênteses.

Fonte: adaptado de Perez et al., 2007.

Tabela 5.7 – Lodos de esgoto ou produto derivado – concentração máxima permitida de substâncias inorgânicas em bio sólidos conforme Resolução CONAMA nº375/2006.

Substâncias inorgânicas	Concentração máxima permitida no lodo de esgoto ou produto derivado (mg/kg, base seca)
Arsênio	41
Bário	1300
Cádmio	39
Chumbo	300
Cobre	1500
Cromo	1000
Mercúrio	17
Molibdênio	50
Níquel	420
Selênio	100
Zinco	2800

Tabela 5.8 – Cargas acumuladas teóricas permitidas de substâncias inorgânicas pela aplicação de lodo de esgoto ou produto derivado em solos agrícolas conforme a Resolução CONAMA nº375/2006.

Substâncias inorgânicas	Carga acumulada teórica permitida de substâncias inorgânicas pela aplicação de lodo de esgoto ou produto derivado (kg/ha)
Arsênio	30
Bário	265
Cádmio	4
Chumbo	41
Cobre	137
Cromo	154
Mercúrio	1,2
Molibdênio	13
Níquel	74
Selênio	13
Zinco	445

Tabela 5.9 – Limites máximos de contaminantes admitidos em fertilizantes orgânicos, conforme a Instrução Normativa nº 27 /2006, do Ministério da Agricultura (Brasil).

Substâncias inorgânicas	Valor máximo admitido (mg/kg base seca)
Arsênio	20
Cádmio	3
Chumbo	150
Cromo	200
Mercúrio	1,0
Níquel	74
Selênio	13
Coliformes termotolerantes (NMPg de MS) ¹	1.000
Ovos viáveis de helmintos (nº em 4g ST) ²	1,0
<i>Salmonella sp.</i>	Ausência em 10g de matéria seca

¹ número mais provável por grama de matéria seca.

² número por quatro gramas de sólidos totais.

Tabela 5.10 – Redução da massa inicial de contaminantes orgânicos presentes no composto de resíduos urbanos. Dinamarca.

Substância	Redução na massa inicial presente
<i>LAS</i>	100%
<i>PAH</i>	29%
<i>NPE</i>	98%
<i>DEHP</i>	83%

Fonte: Ramboll, 1998 apud Poulsen, 2003 .

5.8 Degradação de poluentes orgânicos

Algumas substâncias orgânicas consideradas poluentes podem ser degradadas total ou parcialmente durante a compostagem. Essas substâncias podem ser oriundas de resíduos de agrotóxicos, constituintes de combustíveis e lubrificantes, solventes e detergentes, por exemplo, e podem estar presentes nos resíduos orgânicos que serão recebidos para compostagem. A degradação dessas substâncias vai depender da eficiência do processo de compostagem, principalmente, na capacidade do método empregado quanto à manutenção de condições aeróbias e de temperatura, o que está diretamente ligado à atividade microbiana. A composição e estrutura química da substância são dois fatores importantes no grau de recalcitrância (não biodegradação) e algumas moléculas podem não ser transformadas no processo da compostagem ou mesmo impedir o crescimento microbiano (por ex. Ftalatos oriundos de materiais de PVC).

A biodegradação, a volatilização e a fotólise são considerados os processos que levam a redução das quantidades dessas substâncias orgânicas na massa do composto que pode variar de 30% ou menos, para substâncias mais recalcitrantes a degradação tais como os Hidrocarbonetos Poliaromáticos, ou até

100% de degradação, no caso de Alquil Sulfonato Linear (EPSTEIN, 1997; POULSEN, 2003).

Resíduos recebidos em sistemas de compostagem podem estar contaminados com uma variedade de substâncias orgânicas que são usadas igualmente em residências e processos industriais, o que é verificado com frequência (POULSEN, 2003). Alguns dos mais comuns poluentes orgânicos são: (1) Hidrocarbonetos Poliaromáticos (*PAH*) que são constituintes de combustíveis, lubrificantes e produtos de combustão. (2) Hidrocarbonetos Alifáticos Clorados (*CAH*) encontrados em solventes. (3) Alquil Sulfonato Linear (*LAS*) que são usados em detergentes. (4) Nonyl Ethoxylate (*NPE*) que são usados como *emulgators* e desinfetantes. (5) *Ftalatos*, incluindo Di(2-Etil Hexano) (*DEHP*) que é usado extensivamente como um agente espessante em materiais plásticos (PVC, por exemplo). Algumas dessas substâncias são comprovadamente carcinogênicas. Quase todos esses químicos podem ser degradados aerobicamente, a única exceção são alguns *CAHs*. Os *CAHs*², no entanto, são altamente voláteis e quantidades significativas serão perdidas para a atmosfera durante a compostagem.

A taxa de degradação microbiana das demais substâncias orgânicas irá depen-

² São hidrocarbonetos clorados as PCB's e alguns grupos de pesticidas – ambos pouco voláteis.

der da temperatura e tipo de processo de compostagem usado. Muitos pesquisadores têm investigado a degradação desses poluentes durante a compostagem. A Tabela 5.9 apresenta dados de degradação desses poluentes durante o processo de compostagem na Dinamarca que trata lodo de esgoto, palha e resíduos de jardim - dados são referentes a degradação durante 33 semanas.

A degradação de DEHP é um pouco mais lenta, mas ainda significativa, no entanto, os PAH's são mais difíceis de remover. Em geral a degradação dessas substâncias irá continuar após o término do processo de compostagem, mas normalmente a taxas mais lentas. É esperado que substâncias orgânicas presentes no composto aplicado em solos agrícolas devem desaparecer com o tempo em função do processo de degradação microbiológica.

5.9 Segurança e Saúde ocupacional

O principal problema em relação a saúde ocupacional no trabalho com a compostagem é a presença de microrganismos e poeira no ar. Alguns fungos têm mostrado ter efeitos adversos ao sistema respiratório. Emissões de microrganismos e VOC's³ tem sido detectadas em várias unidades de compostagem mas eles não são em geral um sério problema na grande maioria dos casos (POULSEN, 2003). Preocupações com

segurança estarão relacionadas ao uso de equipamentos e a ergonomia. Primariamente deve-se usar proteção para os olhos e ouvidos. Preocupações com a saúde humana em relação à compostagem dependem tanto do indivíduo como dos resíduos a serem compostados. Normalmente medidas sanitárias comuns são suficientes (lavar as mãos antes de comer, não tocar os olhos, etc.). Lodos de esgoto podem conter causadores de doenças aumentando o risco de contágio na fase de manipulação do material inicial. Os equipamentos de proteção individual básicos indicados são uso de luvas, botas de cano alto, máscara contra pó e poeira, óculos de proteção, macacão de mangas compridas (proteção solar) ou curtas e bonés tipo "árabe" (proteção solar). É sempre recomendável consultar um técnico de segurança para avaliar as situações específicas.

Alguns indivíduos podem ser sensíveis a alguns organismos a grande quantidade de fungos presentes na compostagem podem causar reações alérgicas em indivíduos sensíveis, mesmo assim a maioria das pessoas não tem problemas. Precauções simples como máscara para poeira e meia-máscara respiradores com filtro trocável podem ajudar limitando a exposição (EPSTEIN, 1997). Uma específica preocupação que tem sido documentada em unidades de compostagem é causada pelo fungo *Aspergillus fumigatus*. Este

³ Compostos Orgânicos Voláteis (VOC, na abreviação em inglês).

fungo está naturalmente presente na matéria orgânica em decomposição e irá colonizar qualquer material manuseado na unidade de compostagem. Esporos do fungo podem causar problemas para alguns trabalhadores, particularmente se as poeiras são inaladas. *Aspergillus* é também um organismo oportunista. Portanto, ele pode infectar indivíduos com problemas de saúde pré-existente. Fraco sistema imunológico ou tomando medicação que afeta. Este ponto deve ser considerado na contratação de pessoal e na escolha da área.

Projeto do pátio de compostagem

6

Capítulo

Caio de Teves Inácio
Paul Richard Momsen Miller

6.1 Introdução

O projeto do pátio de compostagem será determinado por aspectos referentes à escolha da local e aspectos de prevenção e controle ambiental. Características do local escolhido (ou determinado) são: área disponível, relevo, drenagem, solo, variação do lençol freático, proximidade de corpos d'água e áreas alagadas, acessos e vizinhança. O controle da poluição existe em relação à coleta e tratamento do chorume (percolado da leira), drenagem superficial (precipitação). O cultivo de cercas vivas é recomendado na minimização do efeito negativo da propagação eventual de odores fortes e barulho de máquinas na vizinhança do pátio. Observa-se que o método escolhido influencia no planejamento e na escolha da área e vice versa em função da movimentação de máquinas para o revolvimento de leiras ou não; espaço total necessário, o uso de aeradores, forma e tipo de acondicionamento dos resíduos, características dos resíduos e etc. Recursos como energia elétrica e água serão mais ou menos importantes dependendo do método empreendido.

A Figura 6.1 mostra um diagrama de operações em pátios de compostagem projetados para receber resíduos de comida acondicionados em bombonas e material volumoso (serragem, podas e palhas). Este é um exemplo de representação das operações de um pátio de compostagem baseado em leiras estáticas, mas que pode variar conforme o método empregado, os resíduos recebidos e a escala de produção.

6.2 Escolha do local

A localização do pátio de compostagem está relacionada (1) proximidade com as fontes de resíduos (2) requerimentos legais (ambientais e plano diretor) (3) acessibilidade e área disponível.

A implantação de um pátio de compostagem surge da necessidade de se tratar e dar uma destinação adequada aos resíduos orgânicos. Sendo assim, a proximidade da área de compostagem com as fontes geradoras de resíduos será sempre levada em conta e influenciará a viabilidade econômica do projeto.

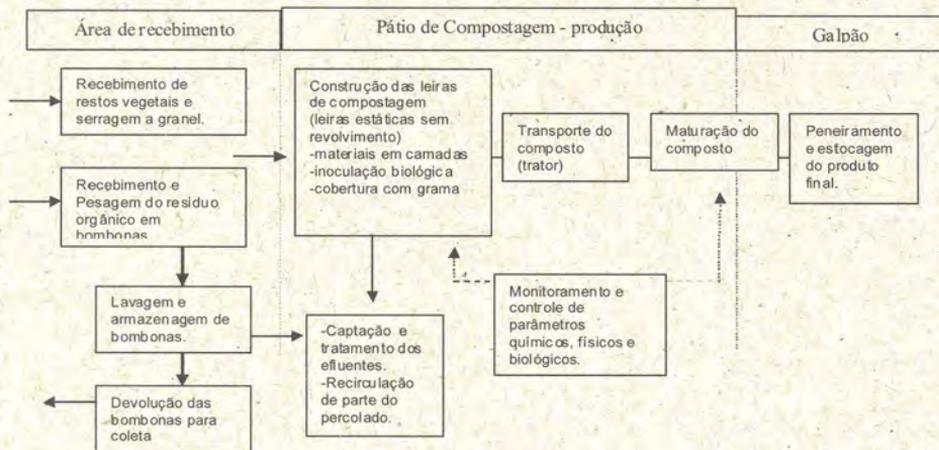


Figura 6.1 – Diagrama de operações em um pátio de compostagem de resíduos orgânicos oriundos de coleta seletiva (separação na fonte) e emprego do método de leiras estáticas.

O transporte de resíduos orgânicos a longas distâncias apresenta sempre um custo elevado, até pelas características do material, geralmente com grande conteúdo de água (umidade). Naturalmente, os custos e as distâncias ideais ficam relativizados para cada caso e finalidade do projeto. Do ponto de vista de impacto de vizinhança a escolha do local deve levar em conta a influência do fluxo de caminhões. É desejável que a localização da área de compostagem favoreça também o uso e/ou comercialização do produto final. Neste caso, o composto orgânico é um produto com valor agregado e seu transporte terá custo comparativamente menor, mas ainda assim relevante.

Os requerimentos legais dizem respeito principalmente à proteção aos recursos hídricos como: lençol freático, águas superficiais e áreas permanentemente alagadas. O órgão ambiental irá considerar distâncias mínimas e/ou medidas

específicas para efetiva proteção desses elementos na paisagem. Como não existem distâncias mínimas padrões, deve-se procurar as informações em cada órgão estadual ou municipal. No entanto, deve-se observar que o código florestal já prevê a preservação de mata ciliar e estabelece as Áreas de Preservação Permanente proibindo a qualquer tipo de edificação na faixa compreendida. Pode-se estabelecer como distância recomendável mínima 30 ou 50 m de águas superficiais e alagadiços como forma preventiva. Porém, temos o exemplo do Estado do Paraná cujo órgão ambiental exige o mínimo de 200 m. De fato, a determinação de distâncias é arbitrária e não garante real proteção aos corpos d'água, mas são diretrizes adotadas para se lidar com áreas consideradas sensíveis. Os projetos de drenagem e "ordenamento" da águas superficiais (precipitação pluviométrica) e coleta de chorume são mais efetivos para o controle ambiental.

A distância adequada de áreas sensíveis ambientalmente ou urbanizadas pode depender também do tipo de resíduo que entrará na compostagem, quando será considerado o potencial de contaminação atração de vetores e/ou de emissão de odores desagradáveis em qualquer etapa do processo. Novamente, o método escolhido e a eficiência no gerenciamento do processo de compostagem serão determinantes para minimizar esses problemas potenciais e dar viabilidade à localização do projeto. A área necessária para as operações e armazenamento dependerá do método empreendido. Alguns métodos necessitam de maior e, outros, de menor área disponível. Por outro lado, uns são mais dependentes de recursos como energia elétrica e fornecimento de água.

Pátios de compostagem podem ser implantados em áreas rurais, industriais ou urbanas. A primeira adequação a ser investigada é o enquadramento ao Plano Diretor no caso de áreas urbanas e industriais. O licenciamento ambiental depende dessa adequação documentada. No caso de propriedades agrícolas, a compostagem dos resíduos gerados na propriedade, como restos de cultura e esterco, em geral não necessita licenciamento ambiental. Mas se a área de compostagem se propuser a receber resíduos oriundos de fora da propriedade para a compostagem, como resíduos orgânicos urbanos, dependendo da quantidade recebida, o órgão ambiental deverá ser consultado.

6.3 Solo e drenagem do terreno

As características da área escolhida relativas ao solo e a drenagem devem permitir a operação de veículos carregados, tratores, e adequada drenagem. Muito importante observar a variação do nível do lençol freático durante o período de chuvas para evitar áreas com solos de difícil drenagem, com tendência a formar poças e lama, e débeis para sustentação de veículos e máquinas. Neste sentido o relevo deve favorecer o ordenamento das águas superficiais, sendo preferencialmente com pequeno declive. Uma boa drenagem é essencial para o pátio de compostagem, por isso a camada superior do solo deve ter drenagem de moderada a boa (Tabela 6.1). A drenagem insuficiente desta camada favorece a formação de atoleiros, a saturação das leiras de compostagem e a geração de chorume/efluente. Situações críticas podem impedir o trânsito de veículos e máquinas levando a interrupção das operações. A recolocação (aterro) de cascalho ou areia ou argila deve ser incluída nas operações previstas. Os pátios devem ter inclinação de 2-4% para evitar o acúmulo de água e formação de poças. Canais de drenagem superficial (no solo) auxiliam na prevenção deste problema. O desnível é fundamental na coleta da água da chuva. Pode-usar materiais como folhas secas e serragem como material absorvente – que depois vai ser compostado. Os desníveis devem ser cuidadosos para evitar erosão hídrica – provocada pelo escorrimento da água da

chuva. Leiras devem ser paralelas ao desnível para evitar contenção de água. O acesso para os veículos de carga deve ser firme – escória, lajotas, semi-pavimentado.

A pavimentação do solo da área de compostagem deve ser evitada. A impermeabilidade do pavimento favorece a saturação de umidade da parte inferior das leiras, aumentando a percolação de chorume, e prejudicando a aeração da leira. “Solos com drenagem boa ou moderada são satisfatórios. Um aterro de 10 cm de cascalho ou areia compactada funciona bem quando as condições naturais não são satisfatórias” (RYNK, 1992).

Uma leira de compostagem e a camada superficial do solo estão em interação constante. Os pátios de compostagem têm em seu solo uma fonte de microorganismos para o processo. O solo interage com a camada mais inferior

da leira de compostagem inoculando o material com microrganismos. Esta contribuição não deve ser ignorada. São comuns relatos de leiras com processo retardado após a colocação de aterros inertes. A pavimentação resolve o problema da lama e pode ser necessária em solos bem drenados (arenosos) com lençol freático alto (1,20 a 1,50 m), mas aumenta a quantidade de chorume a ser recolhido e tratado. Alguns manuais se equivocam colocando como norma a “impermeabilização” de áreas de compostagem. Esta necessidade não é real já que o chorume biodegradável perde seu potencial poluidor (medidos pela DBO e DQO) quando percola pela camada superficial do solo. A impermeabilização como forma de controle de poluição só se justifica se o material de origem é comprovadamente fonte de metais pesados ou outros poluentes que possam contaminar o solo.

Tabela 6.1- Ordem de grandeza da variação de K_f (coeficiente de permeabilidade) em função da granulometria.

Tipo	K_f
Saibro	$10^{-1} - 10^{-2}$ m/s
Areia	$10^{-3} - 10^{-5}$ m/s
Areia fina (siltosa, argilosa)	$10^{-6} - 10^{-9}$ m/s
Argila	$< 10^{-9}$ m/s
Esses valores de coeficiente K_f são classificados conforme segue:	
Fortemente permeáveis	$> 10^{-4}$ m/s
Permeáveis	$10^{-4} - 10^{-6}$ m/s
Fracamente permeáveis	$10^{-6} - 10^{-9}$ m/s
Muito pouco permeáveis	$> 10^{-9}$ m/s
Na prática uma argila com K_f da ordem de 10^{-10} m/s é considerada “impermeável”. Para efeito de comparação, o concreto sem fissuras tem coeficiente K_f da ordem de 10^{-14} m/s.	

Fonte: Schianetz, 1999.

6.4 Tratamento de efluentes

O projeto de um pátio de compostagem deve prever a coleta e o tratamento do chorume que é o percolado das leiras para evitar (1) danos ambientais as águas superficiais próximas e (2) o acúmulo de líquido na área de compostagem.

Três estratégias que devem ser perseguidas pelos projetistas e gerentes de pátio de compostagem:

- a. adotar práticas e medidas para reduzir a produção de chorume;
- b. adotar soluções para que o chorume coletado seja prioritariamente recirculado nas leiras;
- c. preparar o chorume excedente, rico em nutrientes, para que possa ser disposto em solo agrícola (na forma de irrigação direta no solo, por ex.).

Formas de drenagem e ordenamento do escoamento superficial da chuva de áreas adjacentes são importantes para evitar a mistura e conseqüente aumento na quantidade de efluente a ser coletado e tratado influenciando o dimensionamento do sistema de tratamento. Desta forma, duas soluções podem ser escolhidas: (1) projetar dois sistemas independentes de coleta, um para o percolado das leiras e outro para a água da chuva, onde teremos dois efluentes distintos; ou (2) um sistema de

coleta único onde chorume e águas da chuva se misturam, formando um único efluente. O primeiro exige soluções específicas que serão mostradas adiante e o segundo é mais simples mas resulta num volume maior de efluente a ser tratado. Caberá ao projetista adequar à solução, da drenagem superficial e da coleta do chorume, ao terreno e as práticas de compostagem que serão empregadas. O Quadro 7 resume algumas medidas gerais para o controle ambiental de pátios de compostagem.

O tratamento do efluente pode ser feito adaptando-se sistemas de tratamento local de esgoto doméstico, isto é, sistemas de baixa vazão, projetados para tratar efluentes com alto conteúdo de matéria orgânica e com certa quantidade de partículas sólidas. Cada projetista escolherá o sistema e a tecnologia que for conveniente e adequado ao seu empreendimento. A solução escolhida deverá sempre permitir o monitoramento no ponto de lançamento do efluente tratado e o cumprimento dos parâmetros exigidos pelas normas ambientais. O projeto de tratamento do efluente de uma unidade de compostagem deve contar com dois dados primários: (1) análise da DBO do efluente em mgO_2/l , e (2) o cálculo da vazão diária máxima do efluente em l/dia . Este dois dados permitem o cálculo da carga orgânica, em kg/dia , do efluente. A carga orgânica representa o efetivo potencial de impacto do efluente (gerado na unidade) em termos de demanda de oxigênio no corpo receptor. O projetista

Quadro 6 - Medidas gerais de controle ambiental recomendadas.

1. Mantenha as leiras abaixo da umidade máxima recomendada (65%) para minimizar o chorume. Misture materiais para elevar a relação C/N e evitar a perda de nitrogênio.

Comentários nossos: o importante nas leiras estáticas é que as temperaturas se mantenham altas – ou seja, que o processo tenha saúde. Essas funcionam como um “motor” que ativa o fluxo de ar e calor, oxigenando a leira e expulsando o vapor d’água em excesso. o uso de serragem ou materiais similares ajuda a controlar a quantidade de água livre, pois esses materiais tem forte poder de absorção e não comprometem a estrutura da leira.

2. Não permita que o escoamento superficial da área de compostagem e de armazenamento entre em contato direto com as águas superficiais. Muito do potencial poluidor (que ameaça lagos, rios, alagados) pode ser efetivamente tratado pelo solo. Áreas de infiltração (pastagens e gramados) e simples bacias de armazenagem para uso posterior na irrigação de lavouras.

3. Desvie a água superficial da chuva das áreas de compostagem e armazenagem

4. Observe as distâncias recomendadas para água superficial e lençol freático.

5. Armazene os resíduos e o produto final longe de águas superficiais e caminhos de drenagem. Resíduos úmidos a granel devem ser armazenados cobertos e sobre superfícies impermeáveis com coleta do chorume.

Comentários nossos: Para resíduos de comida coletados de restaurantes, por exemplo, uma opção recomendada é o acondicionamento em bombonas, como visto anteriormente nos casos de aplicação da reciclagem orgânica em campus universitários e municípios.

Fonte: adaptado de Rynk, 1992.

deve consultar as regulamentações para tratamento e lançamento de efluentes do seu Estado junto ao órgão ambiental.

Não há necessidade de realizar a compostagem em áreas cobertas. Isso pode ser feito, mas eleva o custo de implantação de pátios com maior capacida-

de e pode resultar na necessidade de irrigação das leiras – que não receberão mais água da chuva. Áreas com cobertura, para proteção da chuva, são mais interessantes para armazenar o composto pronto, que será peneirado e/ou embalado. No entanto, citamos anteriormente exemplos de compostagem de lodo de

esgoto em áreas cobertas que preveem o encharcamento do material que tem alta umidade e estrutura de baixa porosidade.

Para projetar o sistema de drenagem e remoção de percolado se faz necessário o uso de dados referenciais de vazão de percolado para o método de compostagem empregado, isto é, dados obtidos em estudos experimentais ou obtidos a partir de unidades e compostagem em funcionamento. As características dos resíduos utilizados também influenciam a geração de percolado, por ex., leiras com alta proporção de restos de comida e pouco material volumoso (palhas ou serragem) geram mais chorume. Para o método de leiras estáticas com aeração natural (método UFSC) estudos resultaram em dados referenciais para geração de percolado, mostrados no Tabela 6.2. A leira monitorada, com 36 m³ (20 m² de base), forneceu 1.391 litros de percolado num período de 16 semanas.

A coleta do percolado da leira pode ser feita em conjunto com a água da chuva, o que significa somar a vazão de percolado prevista a estimativa de precipitação para

a região. Normalmente usam-se valores de precipitação máxima em 24 horas com tempo de retorno de 5 anos para cálculo do sistema de coleta do efluente, mas sugere-se consulta às normas específicas do órgão ambiental. Uma solução em uso é a coleta apenas o percolado das leiras através de uma "bacia individual". Desta forma, reduzem-se a vazão e o volume de efluente a ser tratado e, conseqüentemente, as dimensões do sistema de captação e tratamento.

A capacidade instalada do sistema de tratamento deve prever o volume de efluente da lavagem dos contentores de acondicionamento e transporte dos resíduos orgânicos, que podem ser bombonas, contêiner e outros tipos. Se a área disponível permitir, deve-se fazer uma previsão para ampliação da capacidade de tratamento.

Uma das melhores opções para gerenciamento do percolado da leira de compostagem pode ser a recirculação durante a fase termofílica. A coleta e aplicação do percolado nas leiras pode beneficiar o processo de biodegradação e, também, auxiliar na manutenção da umidade

Tabela 6.2 – Vazão do percolado das leiras estáticas com aeração natural. Compostagem de restos de comida, cama de biotério, folhas secas e cortes de grama. Campus UFSC. Florianópolis 2002.

Descrição	Vazão (por m ² de leira)	Equivalente para uma leira de 36m ² (dimensões em metros 10x3x1,2)
Percolado	0,41 litros/dia	8,2 litros/leira
Valor para cálculo (sugerido)	0,5 litros/dia	10 litros /leira

adequada em períodos secos ou para umidecer materiais como palhas e serragens, por exemplo. Este líquido possui nutrientes e uma alta carga orgânica biodegradável que será consumida pelos microrganismos termofílicos. A aplicação controlada do percolado em leiras termofílicas (preferencialmente $> 60^{\circ}\text{C}$) resultará também na evaporação da água e em uma certa redução da temperatura no momento da aplicação. A operacionalização de um sistema de recirculação de percolado de leiras de compostagem deverá ser estudado caso a caso, pois a quantidade e frequência de aplicação dependerá da capacidade de retenção de água da leira, que poderá variar conforme os tipos de resíduos, porosidade da mistura, temperatura, e exposição à chuva (clima). Deve-se ter cuidado, ou mesmo evitar, a aspersão do percolado armazenado o que pode gerar odores. O sistema de recirculação deve ser projetado para infiltrar o percolado nas leiras, de preferência logo abaixo da cobertura de palha.

Devido ao conteúdo de N, P e K, que são macronutrientes para plantas, o percolado tem potencial para ser aplicado ao solo agrícola como fertilizante líquido. Neste caso, deve-se sempre considerar a necessidade análises complementares para caracterização do percolado quanto ao conteúdo desses nutrientes e de possíveis contaminantes biológicos ou metais pesados. Esta prática depende, também, de recomendações técnicas agrônômicas para cada tipo de solo e cultivo pretendido.

6.5 Controle tecnológico

A seguir detalhamos uma sugestão de um plano de controle tecnológico simplificado. Este item compõe as exigências previstas na Instrução Técnica do órgão ambiental do Rio de Janeiro (IEMA) para apresentação de projetos unidades de compostagem para licenciamento. Em cada caso, o órgão ambiental local deve ser consultado.

⇒ Plano de monitoramento da qualidade do composto:

- Análise visual diária.
- Teste de maturação: 8 vasos de 200 ml de composto (amostra composta) com mudas de alface em observação por 7 dias. Este teste será realizado por lote formado (mais de uma leira).
- Análise dos componentes: análise em laboratório (terceiros) da relação C/N, umidade, nitrogênio, fósforo e potássio. Frequência: semestral.
- Registro: planilha de controle de qualidade.

⇒ Plano de monitoramento da qualidade das coleções hídricas superficiais:

- Análise laboratorial dos parâmetros de DBO e sólidos sedimentáveis.
- Periodicidade:
 - a) Uma vez ao final dos primeiros 30

dias de operação inicial.

b) A cada 6 meses.

⇒ Plano de monitoramento da qualidade dos efluentes líquidos gerados na unidade

- Amostragem do efluente pré e pós tratamento.

- Análise laboratorial (terceiros) dos parâmetros de DBO, nitrogênio total, fósforo total e coliformes fecais.

- Periodicidade:

a) Uma vez ao final dos primeiros 30 (trinta) dias de operação inicial.

b) A cada 6 (seis) meses (em função da sazonalidade característica da região).

- Análise diária local: pH, temperatura, cor e materiais flutuantes.

⇒ Controle da qualidade do corpo d'água receptor:

- Análise laboratorial (terceiros) dos parâmetros de DBO, nitrogênio total, fósforo total, coliformes fecais e pH.

- Periodicidade:

a) Uma vez antes do início das operações.

b) Uma vez após os 30 dias de operação inicial.

c) A cada 12 meses.

O projeto deve prever o plantio e formação de barreira arbórea no perímetro do pátio de compostagem para amenizar o descolamento de poeira suspensa, a propagação de ruídos e eventuais odores oriundos dos resíduos. Também deve ser avaliada a prevenção de incômodos à vizinhança causados pela operação de máquinas e transporte de material (Tabela 6.3).

Frequência e intensidade dos impactos dependerão do método de compostagem escolhida, do uso e tipo de maquinário, do tipo de resíduos e o acondicionamento destes, e da qualidade do gerenciamento do processo. A emissão de odores fortes e desagradáveis em função do mau gerenciamento do processo de compostagem é sempre o fator de maior preocupação e impacto à vizinhança.

Tabela 6.3 - Fontes dos possíveis impactos à vizinhança em uma unidade de compostagem. Exemplo para uma unidade que utiliza o método de leiras estáticas com aeração natural e capacidade para dez toneladas diárias de resíduos orgânicos.

Atividades previstas	Fator			
		Ruído	Odor	Poeira
Recebimento dos resíduos - caminhão de coleta	F	Diária	Eventual	Diária
	I	Moderada	Fraca	Moderado
Compostagem (montagem manual das leiras)	F	Ausente	Ausente	Diária
	I	-	-	Fraca
Revolvimento mecânico para maturação e transporte do composto	F	Eventual	Eventual	Eventual
	I	Moderada	Fraca	Fraca
Recirculação do percolado - bomba 2vc	F	Diária	Ausente	Ausente
	I	Fraca	-	-
Beneficiamento do composto (peneiramento)	F	Ausente	Ausente	Eventual
	I	-	-	Fraca

F = frequência; I = intensidade.

Benefícios do composto orgânico para uso agrícola

7 Capítulo

Caio de Teves Inácio
Paul Richard Momsen Miller

7.1 Introdução

A compostagem tem como produto final um material que pode ser benéficamente aplicado ao solo. O composto orgânico tem como componentes matéria orgânica parcialmente estabilizada, substâncias húmicas e elementos minerais - nutrientes para as plantas; uma combinação capaz de condicionar favoravelmente a fertilidade do solo para o plantio. O composto é um material praticamente homogêneo, de onde quase não se pode distinguir os materiais de origem, de cor marrom-escura a preta, com cheiro suave típico, plástico a pressão dos dedos quando úmido e bastante friável.

Os benefícios mais relatados do uso do composto no solo são:

⇒ ser fonte de matéria-orgânica e nutrientes (nitrogênio, fósforo, potássio, e micro-nutrientes);

⇒ elevar a capacidade de troca de cátions (CTC) do solo, reduzindo as perdas por lixiviação; promove a formação de agregados mais estáveis no solo, portanto, melhora a aeração e drenagem dos solos;

⇒ aumentar a estabilidade do pH do solo;

⇒ melhorar a aproveitamento de fertilizantes minerais; e

⇒ incremento da biodiversidade da microbiota do solo e supressão de fitopatógenos.

As doses usuais de aplicação do composto em solos agrícolas, principalmente na horticultura e fruticultura giram em torno de 5 a 40 toneladas por hectare, dependendo da recomendação agrônômica. O composto orgânico é um ótimo componente de substratos para produção de mudas de hortaliças, frutíferas, flores e espécies arbóreas. O uso do composto pode substituir, quando aplicado em tais doses elevadas, e por longos períodos, como ocorre nos sistemas de agricultura orgânica certificada, ou ser concomitante ao uso de fertilizantes químicos, neste caso podendo aumentar a eficiência na aplicação dos nutrientes solúveis presentes neste último (PEIXO

TO, 2005). Com bem nos lembra Peixoto (2005), a duração dos efeitos benéficos do composto orgânico no solo vai depender de fatores relacionados a influência do clima as condições de solo, principalmente a temperatura do solo que aumenta a taxa de mineralização da matéria orgânica. Alia-se a isso intensidade de precipitação, textura do solo, quantidade aplicada de composto, e da cultura agrícola.

7.2 Estabilidade e maturidade do composto

A estabilidade do composto é o primeiro parâmetro de qualidade importante para o uso no solo, e esta estabilidade é principalmente relacionada à relação C/N. Os termos "estabilidade" e "maturidade" são comumente usados como sinônimos, mas representam propriedades diferentes do composto. Estabilidade se refere ao estágio de decomposição da matéria orgânica e é função da atividade biológica. Maturidade se refere a uma condição organo-química a qual indica a presença ou ausência de ácidos orgânicos fitotóxicos. Mas o termo "estabilidade" ainda pode aparecer para indicar redução de patógenos ou redução de emissões de odores e de sólidos voláteis (EPSTEIN, 1997, p.109).

Relação C/N acima de 20:1 pode indicar que o composto não está estabilizado, ou seja, ainda vai sofrer forte ação de microrganismos decompositores quando colocado no solo. Isto significa que os microrganismos do solo irão aproveitar o carbono

disponível no composto imaturo para obter energia e com isso imobilizar para seu metabolismo o nitrogênio e fósforo, principalmente, concorrendo com a absorção pelas raízes das plantas. Este fenômeno é denominado imobilização microbiana de nutrientes e pode resultar em carência nutricional das plantas, principalmente em relação ao nitrogênio (N). Apesar do material não ter mais uma composição que favoreça a ação de microrganismos termófilos, muitas vezes permanecem no produto final celulose, hemicelulose e lignina remanescentes, que serão degradadas pela microbiota no solo. Há casos em que o simples peneiramento do composto retira a fração desses materiais mais resistentes a decomposição, e, em geral, de granulometria maior, adequando a relação C/N do produto final peneirado. Por exemplo, serragem e cascas de árvore, restos de algumas culturas agrícolas que são importantes na montagem das leiras como componentes "estruturantes", mas podem ter uma decomposição apenas parcial durante o processo de compostagem.

Outros parâmetros podem ser analisados para verificar o grau de estabilidade do composto como pH, nitrogênio solúvel, Corg/Norg e índice de C/N inicial e final. Em campo análises visuais e testes de revolvimento para verificar a capacidade de auto-aquecimento das leiras são em geral suficientes para o gerenciamento das leiras, mas dependem da experiência do operador. Testes de germinação também são uma ferramenta indicada para avaliar a maturidade do composto orgânico.

7.3 Fonte de nutrientes

No composto a maior parte dos nutrientes, especialmente nitrogênio (N), fósforo (P) e enxofre (S), está conservada na forma orgânica (matéria orgânica) e na biomassa microbiana; uma pequena parte dos nutrientes já se encontram em estado mineral. Então, a liberação dos nutrientes e consequente disponibilização para as plantas depende do processo de decomposição biológica no solo desta matéria orgânica (mineralização). O potássio (K) não forma tais complexos orgânicos e estará mais prontamente disponível no solo. A elevada capacidade de troca de cátions (CTC) do composto orgânico, conferida pelas substâncias húmicas principalmente, permite também que os nutrientes fiquem em formas trocáveis e sejam melhor aproveitados pelas raízes das plantas evitando perdas por lixiviação. Este efeito é especialmente importante para o potássio (K^+), cálcio (Ca^{++}) e magnésio (Mg^{++}) e nitrogênio na forma de íon amônio NH_4^+ .

A disponibilidade de nitrogênio no primeiro ano pode variar de 15 a 50% após a incorporação ao solo (GASKELL et al., 2000; KIEHL, 1985; LOPES, 1998). No entanto, esta liberação mais gradual dos nutrientes reduzindo perdas no solo, por lixiviação ou volatilização como ocorre com o nitrogênio quando aplicado na forma de uréia. A aplicação de compostos orgânicos deve ser feita todo ano para aumentar a quantidade total de nitrogênio orgânico no solo e o potencial de mineralização para sustentação da produtividade do plantio.

A concentração de nutrientes pode variar conforme os materiais usados, inclusive o método utilizado. Kiehl (1985) sugeriu valores de nutrientes e relação C/N para avaliação dos fertilizantes orgânicos (Tabela 7.1). A Tabela 7.2 apresenta a composição química média de um composto curado com 120 dias com boas características para uso como adubo. Cada tonelada deste composto aplicada a um hectare de solo equivaleria a 71,6 kg de NPK ($N + P_2O_5 + K_2O$), 34,9 kg de Ca, 3,3 de Mg, 9,6 kg de S (TEIXEIRA et al., 2004). A Tabela 7.3 apresenta dados de um composto com menor concentração de nutrientes. Nestes casos, a quantidade de material vegetal ou serragem utilizados podem ter influenciado na concentração final dos nutrientes.

Em termos de relação C/N, quando falamos de produtos da compostagem de resíduos, valores abaixo de 12/1 para compostos orgânicos são difíceis de serem alcançados na prática, já que geralmente um processo de compostagem de resíduos adequado necessita de materiais de mais alta C/N (p.ex. aparas de madeira e palhas) que refletem na composição do produto final. Valores acima de 18 até 22 ou 25 podem não ser limitantes para o uso do composto na prática. Por exemplo, o composto pode ser aplicado na superfície do solo quando ainda persistir materiais com muito carbono no produto final, tais como as aparas de madeira, estas geralmente ab-

sorvem substâncias húmicas formadas durante a compostagem adquirindo cor escura e quando na superfície do solo perdem a cor e também os nutrientes entram no solo. Se esse material for incorporado o solo absorverá os ácidos húmicos das aparas, e esse carbono entra em novo ciclo de decomposição, de fato imobilizando nutrientes, mas por um período previsível. Por outro lado, a relação C/N mais alta favorece uma maior atividade microbiana no solo e traz benefícios para estrutura do solo e formação da matéria orgânica do solo, o que se reflete na melhoria dos indicadores de qualidade do solo (Tabela 7.4) e manutenção da fertilidade ao longo do tempo (GASKELL et al., 2000; MITCHELL, 2000).

Mesmo a compostagem de resíduos vegetais, sem a adição de esterco, tem potencial para gerar adubos orgânicos e substratos de boa qualidade. A produção de mudas de hortaliças, alface, beterraba e tomate, pode ser feita com a substituição do substrato comercial por composto orgânico de Crotalaria juncea e Capim Napier, como demonstrado no trabalho de Leal et al. (2007). A Tabela 7.5 traz os valores de nutrientes dos diferentes tratamentos, sendo o 66C33N (66% Crotalaria e 33% Napier) correspondente ao melhor tratamento para produção de mudas das hortaliças. Comparando as características do composto de aparas de grama, dados da Tabela 7.6, e os valores alcançados pela compostagem de Crotalaria com Napier para produção de

mudas de hortaliças, vemos que a simples compostagem de aparas de grama também gera um substrato orgânico em potencial.

Por enquanto falamos apenas de macronutrientes e nutrientes secundários, mas o composto orgânico é fonte também de micronutrientes. Os micronutrientes¹ são essenciais às plantas, embora, em geral, a quantidade necessária seja menor para o metabolismo vegetal quando comparado com os chamados macronutrientes. Tais elementos atuam no metabolismo vegetal, especialmente na ativação de determinadas enzimas (LOPES, 1998). Alguns são vitais para processos biológicos como o Molibdênio para a fixação biológica de nitrogênio (FBN) pela associação Rizóbio-Leguminosas. A falta de qualquer micronutriente no solo pode limitar o crescimento vegetal. A quantidade de micronutrientes no solo varia conforme os minerais de origem, processos de formação do solo e adição de matéria orgânica. Esta última numa clara função de ciclagem de nutrientes para o solo. Solos arenosos tendem a baixos teores de certos micronutrientes o que torna mais relevante a aplicação de adubos orgânicos a estes tipos de solos. No entanto, deve-se considerar que os teores de micronutrientes em resíduos orgânicos vai ser sempre muito variável, e isso vai se refletir no composto preparado, não sendo possível esperar valores médios de referência. Análises laboratoriais são nesse caso imprescindíveis.

Tabela 7.1 - Escala de valores sugerida para fertilizantes orgânicos.

Nutriente	Níveis		
	baixo	médio	alto
Fósforo (P2O5)	< 0,5%	Entre 0,5 e 1,5%	> 1,5%
Potássio (K2O)	<0,5%	Entre 0,5 e 1,5%	> 1,5%
Cálcio	<1,5%	Entre 1,5e 3,0%	> 3,0%
Grau de estabilização	indesejável	bom	ótimo
Relação C/N	>18/1	12 -18/1	8 - 12/1

Fonte: Kiehl, 1985.

Tabela 7.2 - Características do composto orgânico pronto (120 dias) produzido em um pátio de compostagem em Belém/PA. Composição química média. 2004.

Composto orgânico estabilizado de resíduos orgânicos, capim e caroço de açaí.	N	P2O5	K2O	Ca %	Mg	Fe	S
	B	Cu	Mn mg/kg	Zn	M.O	C/N	pH
	3,55	2,3	1,18	3,49	0,33	0,62	0,9
	213	149	737	267	69,25%	11	6,42

Fonte: Teixeira et al. (2004).

Tabela 7.3 - Características do composto orgânico produzido em um pátio de compostagem em Garopaba/SC. Composição química de uma amostra com umidade de 38,67%. 2003.

Composto orgânico de restos orgânicos de restaurantes, restos de peixe, capim verde e palhas.	N	P2O5	K2O	Ca %	Mg	Fe	S
	B	Cu	Mn mg/kg	Zn	M.O	C/N	pH
	0,5	0,91	0,47	1,88	0,20	0,55	-
	-	30	219	111	40,32%	27,43	-

Tabela 7.4 – Indicadores de qualidade do solo.

Propriedades físicas	Propriedades químicas	Propriedades biológicas
densidade	pH	carbono na biomassa microbiana
profundidade de enraizamento	condutividade elétrica	N na biomassa microbiana
taxa de infiltração de água	capacidade de troca de cátions	minhocas
capacidade de retenção de água	matéria orgânica	enzimas
estabilidade de agregado	N mineralizável	supressividade de doenças
	K trocável	
	Ca trocável	

Fonte: Mitchell, 2000.

Tabela 7.5 – Valores de pH, CE e teores de N, Ca, Mg, P e K obtidos dos materiais utilizados como substratos. Seropédica, Embrapa Agrobiologia, 2004.

	pH	CE (dS m ⁻¹)	N	Ca	Mg (g kg ⁻¹)	P	K
100C	7,1	2,8	40,0	9,9	5,9	9,5	4,5
66C33N	7,5	2,0	36,9	7,7	4,1	8,5	3,6
33C66N	8,1	1,9	30,6	7,5	4,0	10,3	3,6
100N	8,4	1,6	9,6	4,2	2,3	9,5	2,3
33C66N+E	8,2	2,0	29,1	3,7	1,6	2,6	3,3
33C66N+A	8,1	1,9	29,6	8,1	5,2	12,5	6,1
100N+A	8,7	1,3	10,2	4,2	1,5	6,2	1,7
Controle	6,5	1,8	5,6	18,1	17,6	2,2	4,1

Controle: substrato comercial. C = crotalária; N = Napier; os números antes das letras representam a proporção em peso de cada tipo de resíduo vegetal. Fonte: Peixoto et al., 2007.

Tabela 7.6 – Valores médios de variáveis químicas e teores de elementos totais após 82 dias de compostagem de aparas de grama. Média entre tratamentos com e sem adição de N e P. Rio de Janeiro. 2004. Fonte: Benites et al., 2004.

n	pH	C.E. mS cm ⁻¹	AH - gC kg ⁻¹	AF	MO	N	P	K	S	Ca	Mg	
						g kg ⁻¹						
média	24	8,3	2,64	53,4	39,2	665	22,3	10,5	16,5	4,5	24,7	3,0
desvio	24	0,1	0,19	9,0	10,7	40	2,2	7,5	2,3	0,8	14,1	0,2
CV%	1	8	17	27	6	10	71	15	17	57	7	
						mg kg ⁻¹						
	P sol	Mn	Fe	B	Zn	Cu	Co	Cr	Cd	Pb	Na	
média	24	14,7	404	3.802	32	161	15	0,7	15	1,8	2,0	1,7
desvio	24	2,5	67	646	11	31	1	0,7	9	0,9	3,3	0,7
CV%	17	17	17	36	19	9	99	58	48	163	40	

AH: ácidos húmicos; AF: ácidos fúlvicos; MO: matéria orgânica; C.E: condutividade elétrica.

7.4 Substâncias húmicas

Além dos nutrientes fundamentais para o crescimento vegetal, as substâncias húmicas são um relevante constituinte do composto orgânico que merecem uma atenção a parte. A Tabela 7.6 mostra uma média de 53,4 g/kg de ácidos húmicos (AH) e 39,2 g/kg de ácidos fúlvicos (AF) no produto final da compostagem de grama. O húmus (do latim, *humus, Terra*) que na verdade é um conjunto de substâncias, é responsável por parte de benefícios importantes da aplicação do composto em solos cultivados. A compostagem não produz húmus, que seria apenas resultado da decomposição prologanda da matéria orgânica no solo, mas está repleta de substâncias húmicas.

“As várias concepções sobre a estrutura das substâncias húmicas podem ser reunidas em três vertentes principais. A mais aceita pelos pesquisadores (...) é a visão de que as substâncias húmicas são macromoléculas de um polieletrólito que tem sua conformação variável de acordo com as condições da solução do solo (e.g. força iônica, pH). Essa concepção trata as substâncias húmicas como um colóide orgânico” (CANELLAS; SANTOS, 2005).

A interação fisiológica com as plantas dos ácidos húmicos, ácidos fúlvicos e huminas, que formam o conjunto das substâncias húmicas, tem recebido grande atenção de pesquisadores (Quadro 9).

7.5 Supressão de fitopatógenos

O efeito supressivo do composto orgânico sobre doenças no solo é um segundo efeito positivo na biologia solo-planta em sistemas agrícolas que vem sendo reportado por diversos autores. A supressão está relacionada principalmente a interação patógeno e populações de microorganismos saprófitas. As comunidades microbianas contribuem para supressão de fitopatógenos através de quatro tipos de interações ecológicas: competição, antibiose, parasitismo/predação e pela indução sistêmica da resistência do hospedeiro (HOITINK; BOEHM, 1999 apud COTXARRERA et al., 2002). Segundo Baker e Cook (1974) apud Altieri (1993), a maior competição por nutrientes e a maior liberação de metabólitos tóxicos em decorrência da intensificação da atividade microbiana resultaria em gastos energéticos maiores dos propágulos durante a dormência como um mecanismo de proteção, sendo o resultado final o aumento da frequência de exaustão e morte dos propágulos.

A compostagem pode ser considerada um meio de multiplicação de agentes de controle biológico de fitopatógenos no solo, por ex. espécies de *Trichoderma* reconhecidas como poderosas no controle biológico devido a alta capacidade de competição e indução de resistência sistêmica. Composto preparado de lodo de esgoto, restos de origem vegetal e animal e restos de podas mostrou “alta

habilidade de supressão de *Fusarium* (*Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* race 1)" em tomate devido a maior atividade microbiana do substrato e o efeito de espécies antagonistas como *Trichoderma asperellum* e *Trichoderma hamatum* presentes no composto orgânico (COTXARRERA et al., 2002). Além de espécies de *Fusarium*, a literatura cita o efeito supressivo do composto orgânico sobre doenças de plantas causadas por *Pythium* sp.; *Phytophthora* sp.; e *Rhizoctonia* sp. Experimentos conduzidos por Leandro et al. (2007), em sistemas de produção de morango, mostraram que o composto orgânico pode ser usado como substrato para estabelecer e promover a sobrevivência de *Trichoderma* no solo cultivado, "ilustrando como a manipulação do solo pode afetar a dinâmica da população de *Trichoderma* spp. indígena nas raízes e no solo". O mais importante é que a matéria-prima para essa "biotecnologia" são os resíduos agrícolas ou a fração orgânica de resíduos urbanos em geral de baixo valor e com limitações para uso direto em solos agrícolas. Suarez-Estrella et al. (2007) sugerem que a uma "ótima aeração durante o processo de compostagem" favorece o isolamento de agentes de controle biológico do composto, principalmente, estirpes de *Aspergillus* spp. que foram relacionadas à alta capacidade antagonista sobre Fusariose em plantas de melão.

Pesquisas mais recentes têm apontado para o efeito também das substâncias

húmicas na supressão de fitopatógenos e na estimulação de organismos antagonistas do solo. Efeitos inibidores sobre fungos de solo *Fusarium oxysporium* e *Sclerotinia sclerotiorum* foram relacionados a diferentes concentrações de SH em experimentos de laboratório, "especialmente SH extraídas de compostos orgânicos" (LOFFREDO et al., 2008). Estes mesmos autores relatam o efeito favorável, em diferentes gradações, para o crescimento de dois antagonistas *Trichoderma viride* e *T. harzianum*, sendo o mais significativo para o primeiro. Esses efeitos estariam relacionados não somente as concentrações de SH no meio e a espécie de fungo, mas também a origem e natureza da SH. "Em particular, a estrutura e propriedades funcionais da SH, especialmente a acidez total, presença de grupo COOH e composição elemental, parecem controlar os efeitos da SH sobre os fungos."

O composto orgânico quando aplicado no solo, em superfície ou incorporado, pode influenciar na supressão de doenças de solo e a colonização micorrizal. Em experimentos com mudas de cebola (*Allium cepa*), o composto orgânico (restos de comida, cortes de grama e cama de biotério) favoreceu a colonização micorrizal e a redução das perdas por *dumping-off* (Figura 7.1) (INÁCIO, 1996).

Sieverding (1991) cita que micorrizas aumentam a resistência das plantas a patógenos de solo, principalmente, quando a colonização micorrizal na raiz

ocorre antes do ataque do patógeno. Micorrizas são associações mutualísticas formadas entre certos fungos do solo e raízes da maioria das espécies vegetais. Esta associação aumenta o volume de solo explorado pelas raízes da planta, conseqüentemente, aumenta a absorção de nutrientes, principalmente fósforo (ARAÚJO; HUNGRIA, 1994). Em troca há a translocação de carboidratos e outros compostos pelo fungo micorrízico. De modo geral, o aumento do volume de solo explorado pela planta devido a micorrização confere maior poder de tolerância à estresse

em geral, seja, hídrico, nutricionais ou referentes ao ataque de parasitas (SIEVERDING, 1991). Portanto, considerando o caso das mudas de cebola durante a fase de canteiro, a micorrização dessas mudas, promovida pela aplicação de composto orgânico, seria uma forma de minimizar o impacto do transplante, que diminui a capacidade da muda de explorar o solo devido ao rompimento de suas radículas. A mesma estratégia pode ser aplicada a mudas de espécies vegetais perenes que façam associação micorrízica.

Quadro 7 - Bioatividade de substâncias húmicas – ação sobre o desenvolvimento e metabolismo das plantas

“As substâncias húmicas estão presentes nos solos, nas águas e nos sedimentos. Além de influenciar as características físicas, químicas e microbiológicas desses compartimentos, podem afetar diretamente o metabolismo e o crescimento das plantas. Os mecanismos dessa ação só agora começam a ser elucidados. Além de indiretamente favorecer os processos de absorção de íons mediante a formação de complexos organometálicos solúveis. As substâncias húmicas ativam rotas bioquímicas específicas tal como fazem alguns hormônios vegetais. Nossos antepassados identificaram, no húmus, uma força vital capaz de condensar as propriedades de diferentes domínios da natureza (o mineral, o cósmico, o vegetal e o animal) e orientar as forças responsáveis pelas boas colheitas. Com o avanço do conhecimento, foi possível identificar uma conversa efetiva entre as plantas e a matéria orgânica humificada. Os códigos desse diálogo começam a ser decifrados e envolvem o reconhecimento de rotas específicas de sinalização celular. O estudo da bioatividade das substâncias húmicas pode fornecer uma parte importante da base científica necessária para o desenvolvimento de novas formas de cultivo, baseadas na adaptação das plantas ao ambiente e no uso e manejo da matéria orgânica.” Fonte: Canellas e Santos (2005, p. 44, p. 244.)

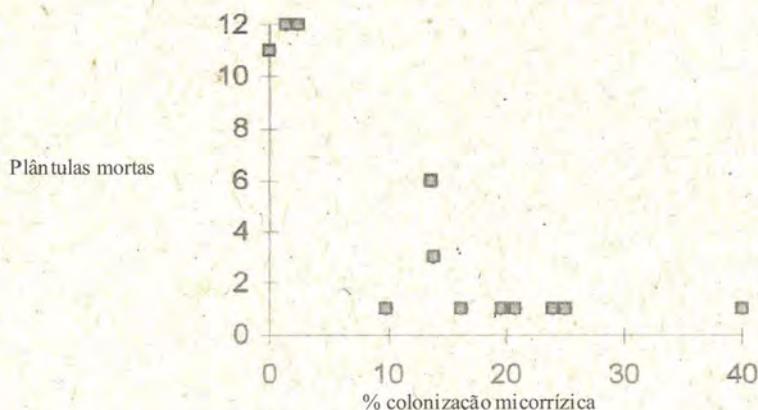


Figura 7.1 – Relação entre a colonização micorrizica e as mortes por *dumping-off* de plântulas de cebola em sementeira com diferentes fontes de nutrientes e cobertura do solo (composto orgânico, vermicomposto e serragem). Fonte: Inácio, 1996.

7.6 Considerações finais sobre o papel da compostagem e o uso do composto nos solos

Não há dúvidas para nós da importância que cerca a compostagem de resíduos como uma prática que nos permite atacar problemas ambientais, a disposição de resíduos, e ao mesmo tempo prover para nossa agricultura tropical grandes quantidades de adubos orgânicos com todas as qualidades e efeitos benéficos que já foram relatados nos textos anteriores. O aporte de matéria orgânica, seja na forma de restos vegetais e animais, seja pela compostagem, é de suma importância para os solos tropicais. A matéria orgânica tem sido considerada um indicador chave da qualidade do solo e um componente de todo ecossistema terrestres. Listar trabalhos científicos que suportem

essa afirmação não é o objetivo desta publicação, mas é farta a literatura que o leitor poderá encontrar sobre a importância da matéria orgânica para os solos tropicais, e em consequência, para a agricultura tropical.

Uma agricultura sustentável só poderá advir de uma sociedade sustentável, isto é, de uma sociedade que se enxergue como um todo interrelacionado, onde cada vez mais a busca de soluções integradas se faz necessária. A compostagem de resíduos é este exemplo. Ela pode beneficiar tanto o meio urbano como o meio rural e por isso deverá ser planejada de forma integrada e com cuidados ambientais pertinentes, para gerar resultados amplos e atingir todo o potencial de benefícios que podem ser explorados.

A fração orgânica como alvo da coleta seletiva - estudo de caso¹

Caio de Teves Inácio
Paul Richard Momsen Miller

8.1 Introdução

Este capítulo detalha a implantação de um projeto piloto de reciclagem orgânica no município de Garopaba, em Santa Catarina, em 2002/03, e os resultados alcançados. A priorização da fração orgânica como alvo da reciclagem, nos moldes deste estudo de caso, comprovou constituir uma estratégia de gerenciamento de resíduos urbanos com potencial de aplicação nos municípios brasileiros devido à baixa complexidade e a capacidade de elevar os índices de reciclagem com um baixo custo relativo e em curto prazo. Essas características proporcionam a esta estratégia, especialmente ao método de compostagem em leiras estáticas, forte capacidade de difusão tecnológica, podendo ser adotado pela administração pública ou empresas privadas. Ressalta-se que a adoção desta estratégia de gerenciamento auxiliaria a manutenção da vida útil dos aterros sanitários e, conseqüentemente, na redução dos seus custos de implantação e operação dessas obras de engenharia.

8.2 Histórico do município

O município de Garopaba não possuía alternativas para o tratamento adequado dos resíduos gerados que precisavam ser destinados a um aterro sanitário fora dos limites do município. Além dos custos inibirem a implantação, não existe área adequada em Garopaba que permita a instalação de um aterro sanitário e, neste contexto, se formou um *lixão*, onde os resíduos sólidos do município eram depositados.

O município de Garopaba tem sua economia baseada na atividade turística intensa no período de verão. Em 2002 o município possuía cerca de 13.000 habitantes e no verão atingia uma população flutuante de quase 100.000 habitantes. Parte dos resíduos é proveniente da atividade gastronômica e da atividade pesqueira, bases da economia da comunidade local.

Este volume de restos de comida coletados de modo insatisfatório criavam mau cheiro e focos de proliferação de

¹ Co-autor do capítulo: Eng. Agrônomo Gerson Konig Júnior.

vetores nas praias e ruas da cidade, um risco a saúde pública e a economia da cidade. A administração municipal havia instalado uma central de triagem para reciclar a fração seca (plástico, lata, etc.) que contava com 8 funcionários na baixa temporada e 30 funcionários no verão, alta temporada de turísticas. A ausência de uma coleta seletiva aliada ao volume da fração orgânica dos resíduos sólidos comprometia a eficiência da separação dos recicláveis na esteira de triagem.

8.3 O sistema de gestão de resíduos

A ação do plano piloto de gerenciamento de resíduos foi focalizar a coleta da fração orgânica dos resíduos sólidos como estratégia para se aumentar em curto prazo a quantidade do material reciclado, seco e orgânico. Foi implantado então o projeto piloto denominado *reciclagem orgânica*, que consistiu na priorização da coleta seletiva da fração orgânica e tratamento ba-

seado na técnica de Compostagem em Leiras Estáticas. (Fig. 8.1).

O projeto foi implantado em agosto de 2002 com a coleta seletiva orgânica nos pontos de grande geração deste tipo de resíduo como restaurantes e vilas de pesca. A coleta era realizada diariamente com bombonas plásticas de 50 litros, com tampas, que permitem o acondicionamento protegido dos resíduos (Fig. 8.2). As bombonas eram transportadas, em veículo aberto, para o pátio de compostagem que também recebia podas de árvores, serragem e restos de culturas agrícolas da área rural. O pátio de compostagem gerou 4 novos empregos relacionados a reciclagem. Toda a coleta era realizada por uma empresa terceirizada que também era responsável pela central de triagem e o pátio de compostagem. Como não havia coleta seletiva dos resíduos recicláveis secos, a coleta convencional (comercial e domicili-

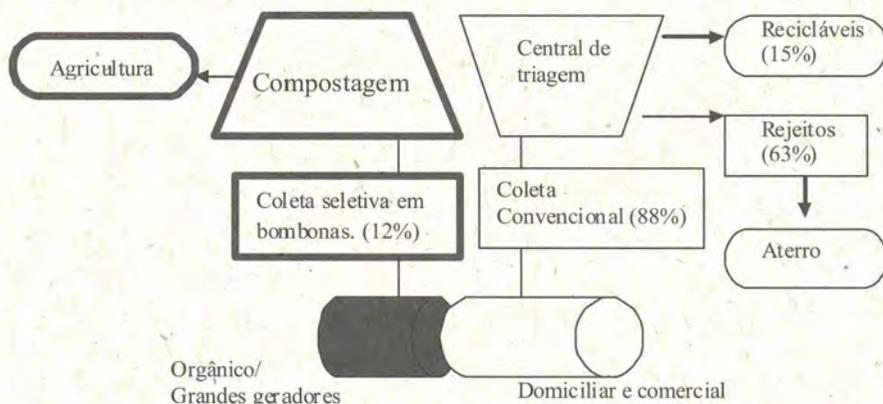


Figura 8.1- Fluxograma dos resíduos sólidos coletados e relação com o total coletado após a implantação do projeto piloto de reciclagem orgânica no município de Garopaba/SC em 2002/03. Fonte: Inácio e Konig (2004).

ar) não utilizava caminhão compactador. A prefeitura arcava com os custos extras do transporte e destinação final no aterro sanitário localizado a 80 km de distância em outro município.

8.4 Os números da reciclagem orgânica

Durante os oito primeiros meses do projeto de reciclagem orgânica, a média de reciclagem foi de 27,6% do total coletado (cerca de 117,5 ton./mês) entre material seco e material orgânico (Figuras 8.3 e 8.4). A fração orgânica coletada e reciclada representou no período 11,7% do total, cerca de 49,8 ton./mês. A coleta do resíduo orgânico possibilitou o aumento da eficiência na esteira de triagem que passou de 11% para uma média de 15,3% de resíduos reciclados, cerca de 67,7 ton./mês. O mês de janeiro de 2003 teve a maior quantidade absoluta reciclada, 137,0 ton. de recicláveis secos e 85,0 ton. de resíduos orgânicos provenientes da coleta seletiva (Figura 6). Mas a maior proporção reciclada se deu no mês anterior, dezembro de 2002, com 33,9% de reciclagem.

A operação do sistema foi terceirizada a um valor fixo de R\$11.000 por mês. Com isso, o custo da coleta e da compostagem da fração orgânica oscilou com a quantidade coletada, sendo menor durante o período de maior quantidade coletada. O município atingia picos de coleta de resíduos orgânicos de 5,0 ton./dia a custos competitivos em torno de R\$73,00/ton. Este valor estava abaixo do custo da coleta convencional, cerca de R\$ 85,00 e R\$ 90,00, e dos gastos com a destinação ao aterro, R\$79,00 (valores não corrigidos). Para o município, períodos de coleta abaixo de 2,5 ton./dia se mostraram anti-econômicos neste modelo de contrato acordado.

8.5 Problemas solucionados

A implantação do projeto de *reciclagem orgânica* proporcionou ao município economia na destinação final dos resíduos que devem ser enviados a um aterro sanitário fora do município. Com isso ficou facilitado o fechamento do lixão existente e condenado por ordem judicial. O projeto ainda beneficiou as comunidades de

Tabela 8.1 – Custo da reciclagem orgânica e do sistema convencional. Garopaba, 2003.

Descrição	Quantidade coletada (ton./dia)	Coleta + Compostagem (R\$/ton.)
Média baixa temporada	2,0	R\$ 183,33
Média anual	2,7	R\$ 133,33
Média alta temporada	5,0	R\$ 73,33
Custo coleta convencional*	9,0-13,0	R\$ 164,00

*inclui o custo da coleta, transbordo e o custo da destinação ao aterro sanitário.

pescadores que não eram atendidas em suas necessidades de coleta de resíduos pesqueiros. Com a inclusão dos ranchos de pesca na coleta seletiva, estes restos não ficaram mais expostos nas praias e em torno dos estabelecimentos. Isto acabou com o problema de mau cheiro nas praias e ainda aumentou o número de pessoas comprometidas com o programa de reciclagem.

8.6 Outros resultados alcançados

Ao material coletado e levado ao pátio são adicionados restos vegetais, principalmente de cana-de-açúcar. Estes restos na propriedade agrícola têm pouco valor, mas no pátio de compostagem, além de serem fundamentais ao processo de compostagem, terminam valorizados na forma de composto orgânico. Os agricultores passaram a usar um insumo agrícola permitido na agricultura orgânica. Portanto, a agricultura que é a segunda atividade econômica em importância no município, foi beneficiada em qualidade pelo novo projeto de gestão dos resíduos, que dará base ao surgimento de uma agricultura orgânica forte e local, com menos riscos à saúde dos produtores, menos riscos ambientais e maior valor comercial.

8.7 Conclusão do estudo de caso

A implantação do sistema de coleta seletiva e compostagem da fração orgânica do lixo (Reciclagem Orgânica) mostrou-

se eficaz no aumento dos níveis de reciclagem em curto prazo. A implantação da reciclagem orgânica em Garopaba-SC dobrou a quantidade de resíduos reciclados no município já no primeiro mês de funcionamento. Após oito meses a fração reciclada passou a representar uma média mensal de 27,6% do total gerado. Os resíduos recicláveis secos passaram de uma média de 11% para 15,9%, demonstrando o aumento da eficiência na esteira de catação, o que refletiu no aumento da renda dos catadores. O sistema de reciclagem orgânica se mostrou economicamente competitivo para o município a partir da coleta de pelo menos 2,5 ton./dia. de resíduos orgânicos. O sistema implantado apresentou custo de R\$73,33 para coleta de 5,0 ton./dia de resíduos contra R\$ 164,00 para coleta e destinação ao aterro.

Através da implantação da reciclagem orgânica o município atingiu níveis de reciclagem e economia com a destinação final dos resíduos sólidos que permitiram a desativação do lixão. O projeto permitiu uma abrangência maior do serviço de coleta e reciclagem, contando agora com as comunidades de pescadores e o comércio alimentício. Houve também a geração de novos empregos diretos. Ao evitar o envio de resíduos orgânico para o aterro sanitário o projeto ajudou a mitigar as emissões de metano, um poderoso gás do efeito estufa (ver Quadro 6).

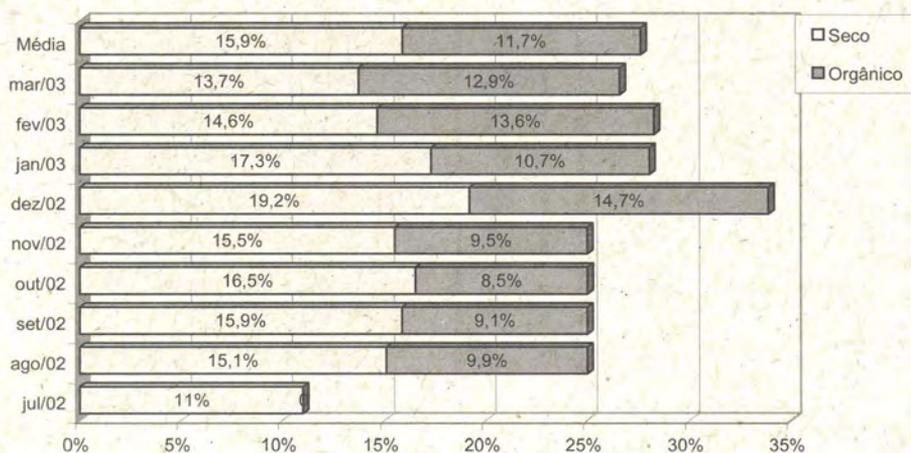


Figura 8.3 - Porcentagens mensal e média de resíduos reciclados, fração seca e fração orgânica, sobre o total coletado durante os primeiros meses do projeto de reciclagem orgânica. Agosto representa o primeiro mês do projeto. O mês de julho representa a média do índice de reciclagem antes do projeto. Garopaba-SC, 2002/03. Fonte: Inácio e Konig, 2004.

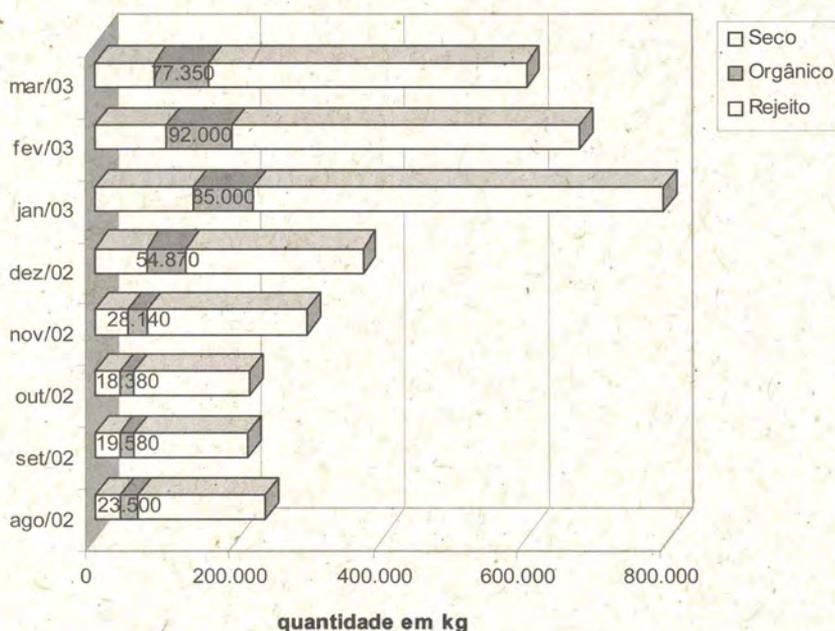


Figura 8.4 - Quantidade de resíduos sólidos coletados e reciclados, fração seca e fração orgânica (sobre a barra azul escuro), durante o projeto piloto de reciclagem orgânica em Garopaba-SC, 2002/03. Fonte: Inácio e Konig, 2004.

Quadro 8 - A Compostagem como um Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

Resíduos sólidos e produção de adubos orgânicos são assuntos aparentemente sem relação direta e reservados a universos distintos, cidade e agricultura. No entanto, o contexto atual de desenvolvimento tem apresentado desafios globais e locais que interligam tais assuntos e, conseqüentemente, as áreas de pesquisa e desenvolvimento. Produção de alimentos com maior qualidade ambiental e a gestão dos resíduos sólidos, municipais ou industriais, com redução de impactos possuem uma interface muito forte na *compostagem* e nas demais formas de tratamento biológico dos resíduos orgânicos.

O gerenciamento de resíduos orgânicos tem potencial para ser uma rota de fluxo de recursos para países em desenvolvimento via Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (BARTON; ISSAIAS; STENTIFORD, 2008). O Painel Intergovernamental para Mudanças Climáticas (IPCC, na sigla em inglês) aprovou em 2006 o primeiro Mecanismo de Desenvolvimento Limpo - MDL baseado na compostagem de resíduos em larga escala em Bangladesh. Atualmente existem 25 projetos similares de pequena escala e 3 de grande escala registrados gerando reduções certificadas de carbono (<http://cdm.unfccc.int/index.html>), a grande maioria em países da Ásia. Num efeito em rede, o uso de composto orgânico, produto final da compostagem, pode ter papel importante no aumento do carbono no solo (matéria orgânica do solo) e trazer benefícios relacionados à substituição ou eficiência no uso de fertilizantes químicos (FAVOINO ; HOGG, 2008).

Resíduos orgânicos são fonte de problemas ambientais locais e globais, como a poluição de recursos hídricos por dejetos suínos, e a emissão de metano em aterros sanitários que é a maior fonte antropogênica deste metano para atmosfera. Estudos de cenários envolvendo o gerenciamento de resíduos, rurais e urbanos, através da compostagem e outras formas de tratamento biológico sugerem a redução da contribuição dessas fontes para a emissão de GEE de 10% para 6%, até 2025, e potencial de redução de 40% na produção total de chorume nos aterros. Este mesmo estudo considerou a tendência atual de crescimento da população e do produto interno bruto em países em desenvolvimento como o Brasil, China e Índia, que resultariam em aumento global de geração de resíduos em torno de 44 a 51% até 2025. Para o Brasil, em relação a 2005, a geração urbana de resíduos de alimentos (fração orgânica dos resíduos urbanos) deve saltar de 16,31 Gkg/ano para 22,23 Gkg/ano, representando 43% em fração dos resíduos urbanos, considerando as atuais tendências de crescimento econômico (ADKHARI, BARRINGTON; MARTINEZ ; 2006). (continua)

(continuação)

Medições em escala de campo das emissões de metano a partir da compostagem de resíduos orgânicos estão na faixa de 20 – 65 kg CO₂eq/ ton. de matéria fresca, em processos bem manejados, o que coloca a compostagem como uma tecnologia de mitigação de emissões deste gás de efeito estufa quando comparada aos aterros sanitários (AMLINGER; PEYR; CURLS, 2008). A implementação de pesquisas para destinação segura, via compostagem, de materiais orgânicos inapropriados para aproveitamento *in natura*, é um dos caminhos para a solução de muitos dos nossos problemas ambientais, que passa pelo saneamento básico até a emissão de gases de efeito estufa (metano) em aterros sanitários.

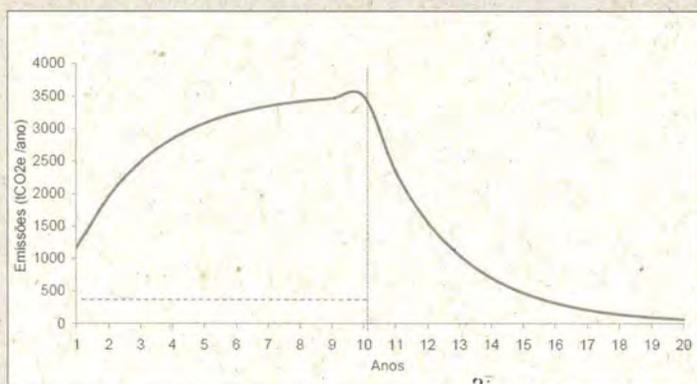


Gráfico comparativo das emissões de metano pela Compostagem (MDL) e o Aterro Sanitário (linha de base), em tCO₂e, gerados por 4190,6 toneladas de resíduos orgânicos depositados anualmente, durante 10 anos. O valor 4190,6 ton é a soma das médias anuais de resíduos destinados a cinco projetos de compostagem de pequena escala. Metodologia de cálculo: AMS.III.F,UNFCCC. Fonte: Inácio et al, 2009b.

Diferentemente da compostagem, nos aterros sanitários a matéria orgânica depositada está submetida à anaerobiose e, conseqüentemente, passa por processos anaeróbios de decomposição e fermentação, gerando vários tipos de compostos poluentes que saem com o efluente líquido que deve ser coletado e tratado antes de ser lançado no ambiente. A produção do gás metano (CH₄) é abundante, e este biogás deve ser drenado e queimado de forma controlada ou aproveitado na co-geração de energia. A metanogênese é um tipo de metabolismo microbiano complexo e estritamente anaeróbio que reduz o ácido acético (CH₃COOH) e o CO₂ a metano (CH₄) (NAZAROFF; ALVAREZ-COHEN, 2001; CARDOSO; TSAI; NEVES, 1992). O metano é 21 vezes mais potente que o dióxido de carbono (CO₂) quanto ao efeito estufa.

REFERÊNCIAS

- ADHIKARI, B. K.; BARRINGTON, S.; MARTINEZ, J. Predicted growth of world urban food waste and methane production. **Waste Management & Research**, London, v. 24, n. 5, 421-433, 2006.
- ALTIERI, M. A. **Agroecologia: as bases científicas da agricultura alternativa**. Rio de Janeiro: PTA-FASE, 1989.
- AMLINGER, F.; PEYR, S.; CURLS, C. Green house gas emissions from composting and mechanical biological treatment. **Waste Management & Research**, London, v. 26, n. 1, p. 47-60, 2008.
- ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, E. S. Gestão de biossólidos: situação e perspectivas. In: SEMINÁRIO SOBRE GERENCIAMENTO DE BIOSSÓLIDOS DO MERCOSUL, 1., Curitiba. **Anais...** Curitiba: SANEPAR, 1998. p. 1-4.
- ARAÚJO, R. S.; HUNGRIA, M. (Org.). **Microrganismos de importância agrícola**. Brasília, DF: EMBRAPA, 1994. 236 p.
- AZEVEDO, J. et al. Metais pesados no composto de lixo urbano da usina de Irajá/RJ. In: SIMPÓSIO SOBRE MEIO AMBIENTE, 7., Niterói. **Textos...** Niterói: UFF, 1999. 4 p. Disponível em: <http://www.unilivre.org.br/centro/textos/forum/MetPes_lixolrajaRJ.htm>. Acesso em: 07 mai. 2004.
- BAIRD, C. **Química ambiental**. 2 ed. Porto Alegre: Bookman., 2002.
- BANKS, H. J. (Org.). **Agricultural production without methyl bromide: four case studies**. Clayton South: CSIRO, 1995.
- BARTON, J. R.; ISSAIAS, I.; STENTIFORD, E. I. Carbon: making the right choice for waste management in developing countries. **Waste Management**, London, v. 28, n. 4, p. 690-698, 2008.
- BENITES, V et al. **Produção de adubos orgânicos a partir da compostagem dos resíduos da manutenção da área gramada do aeroporto internacional do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 2004. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n. 30).
- BESS, V. Evaluating Microbiology of compost: microbial content of compost is helping producers and growers to understand its role as a soil inoculant and plant protector. **Biocycle**, Emmaus, PA, v. 40, n. 5, p. 62-64, 1999.
- BETTIOL, W.; CAMARGO, O. **Impacto ambiental do uso do lodo de esgoto**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. 312 p.

- BITTENCOURT, S.; ANDREOLI, C. V.; MOCHIDA, G. A.; SOUZA, L. M. K. M. De. Uso agrícola de lodo de esgoto: estudo de caso da região metropolitana de Curitiba. In: SIMPÓSIO INTERAMERICANO DE BIODIVERSIDADE, 6., Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2008. CD-ROM.
- BOOS, A. T.; PANCERI, B.; PIROLA, L. **Sistema de tratamento biológico de água com zona de raízes**. Florianópolis: Epagri, 2000. 18 p. (Epagri. Boletim Didático, 36).
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Decreto nº 4954 de 14 de janeiro de 2004. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 15 jan. 2004. Aprova e regulamenta a Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução normativa nº 23, de 31 agosto de 2005. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 08 set. 2005. Aprova as definições e 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.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução nº 375 de 29 de agosto de 2006. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 30 ago. 2006. Seção 1, p. 141-146. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução nº 380 de 31 de outubro de 2006. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 07 nov. 2006. Seção 1, p. 59. Altera o anexo I da resolução nº 375 de de 29 de agosto de 2006.
- BÜTTENBENDER, S. E. **Avaliação da compostagem da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos provenientes da coleta seletiva realizada no município de Angelina/SC**. 2004. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, UFSC, Florianópolis, 2004.
- CALIFORNIA INTEGRATED WASTES MANAGEMENT BOARD (CIWMB). **Regulations**. Disponível em: <www.ciwmb.ca.gov/regulations>. Acesso em: 20 jul. 2001.

- CANELLAS, L. P.; SANTOS, G. A. **Humosfera**: tratado preliminar sobre a química das substâncias húmicas. Campos dos Goytacases, 2005. 309 p.
- CARDOSO, J. B. N. E.; TSAI, S. M.; NEVES, M. C. P. **Microbiologia do solo**. Campinas: SBCS, 1992. 360 p.
- CARIONI, G. I.; MILLER, P. R. M.; INACIO, C. T. **Compostagem termofílica e a análises de parâmetros do chorume proveniente de leiras estáticas**. 2001. 30 f. Monografia. (Graduação em Agronomia) – Centro de Ciências Agrárias, UFSC, Florianópolis.
- COOK, R. J.; BAKER, K. **The nature and practice of biological control of plant pathogens**. St. Paul: American Phytopathological Society, 1983.
- COSTA, E. G. A Destinação final dos resíduos sólidos urbanos da região metropolitana de Fortaleza. **Revista Econômica do Nordeste**, Fortaleza. v. 27, n. 2, p. 243-258, abr./jun.1996.
- COSTA, M. S. S de M. et al. Compostagem de resíduos da indústria de desfibrilação de algodão. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.2, p. 540-548, maio/ago. 2005.
- COTXARRERA, L. et al. Use of sewage sludge compost and *Trichoderma asperellum* isolates to suppress *Fusarium wilt* of tomato. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, NY, v. 34, p. 467-476. 2002.
- EPSTEIN, E., **The science of composting**. Lancaster: Technomic Publishing, 1997. 493 p.
- FAVOINO, E.; Hogg D. The potential role of compost in reducing greenhouse gases. **Waste Management & Research**, London, v. 26, p. 61-69. 2008.
- FERNADES, F. et al. **Manual prático para a compostagem de biossólidos**. Rio de Janeiro: ABES, 1999. 84 p.
- FERNANDES, F.; ANDRAUS, S.; ANDREOLI, C. V. Eficiência dos processos de desinfecção do lodo da ETE-Belém com vista a seu uso agrícola. **Sanare**, v.5, n.5, p. 46-58, 1996.
- FIALHO, L. L., et al. **Monitoramento químico e físico do processo de compostagem de diferentes resíduos orgânicos**. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2005. 6 p. (Embrapa Instrumentação Agropecuária. Circular Técnica, 29).
- GASKELL, M. et al. **Soil fertility management for organic crops**. San Pablo, CA: UC ANR Publication, 2000. Disponível em: <<http://anrcatalog.ucdavis.edu/pdf/7249.pdf>>. Acesso em: 20 mai. 2008.
- GOLUEKE, C. G.; CARD, B. J.; MCGAUHEY, P. H. A. Critical evaluation of inoculums in composting. **Applied Microbiology**, Washington, DC, v. 2, p. 54-53, 1954.

- GOLUEKE, C. G. When is Compost "Safe"? **BioCycle**, Emmaus, PA, v. 23, n. 2, 1984.
- GOTAAS, H. B. **Composting, sanitary disposal and reclamation of organic wastes**. Genebra: OMS, 1956. 206 p.
- HAUG, R. T. **The practical handbook of compost engineering**. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993.
- HIGARASHI, M .M.; KUNZ, A.; OLIVERA, P. A. V. de. Redução da carga poluente – Sistemas de tratamento. In: SEGANFREDO, M. A. **Gestão ambiental na suinocultura**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2007. p. 119-148.
- HOITINK, H . A. J.; BOEHM, M. J. Biocontrol within the context of soil microbial communities: A substrate-dependent phenomenon. **Annual Review of Phytopathology**, Palo Alto, CA, v. 37, p. 427-446. 1999.
- HSU, J. H; LO, S. L. Chemical and spectroscopic analysis of organic matter transformations during composting of pig manure. **Environmental Pollution**, Barking, v.104, p. 189-196, 1999.
- INÁCIO, C. T. **Manejo agroecológico da cebola em Santa Catarina**. 1996. 36 f. Monografia. (Graduação em Agronomia). – Centro de Ciências Agrárias, UFSC, Florianópolis.
- INÁCIO, C. T. et al. Coleta seletiva e compostagem de lixo orgânico um novo caminho para reciclagem. **Limpeza Pública**, São paulo, n. 49, p. 6-13, out. 1998.
- INÁCIO, C. T. ; KONIG JUNIOR, G. Reciclagem Orgânica: a fração orgânica como alvo da coleta seletiva. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS, **Anais...** São Paulo: ABES, 2004. 1 CD-ROM.
- INÁCIO, C. T.; PROCÓPIO, A. S.; TEIXEIRA, C.; MILLER, P. R. M. Dinâmica de O₂, CO₂ e CH₄ em leiras estáticas de compostagem durante a fase termofílica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS, 2 a 9 de outubro de 2009, Vitória. **Resumos...** Vitória: Incaper, 2009. 1 CD-ROM.
- JERIS, J. S. ET REGAN, R. W. Controlling environmental parameters for optimum composting III: pH, nutrients storage and paper content. **Compost Science**, v. 14, n. 3, p. 16-22, 1973.
- KANE, B. E.; MULLINS, J. T. Thermophilic fungi in a municipal waste compost system. **Mycologia**, New York, v. 65, p. 1087-1100, 1973.
- KIEHL, E. J. **Fertilizantes orgânicos**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1985. 492 p.

- LAMBAIS, M. R. Poluição orgânica e seu controle. In: CARDOSO, J. B. N. E.; TSAI, S. M.; NEVES, M. C. P. **Microbiologia do Solo**. Campinas: SBCS, 1992. 360 p.
- LEAL, M.A. A.; GUERRA, J. G. M.; PEIXOTO, R. T. G.; ALMEIDA, D. L. Utilização de compostos orgânicos como substratos na produção de mudas de hortaliças. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 25, p. 392-395, 2007.
- LEANDRO, L. F. S. et al. Population dynamics of *Trichoderma* in fumigated and composted-amended soil and on strawberry roots. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 35, p. 237-246, 2007.
- LEITE, W. C. de A. Resíduos sólidos urbanos: contribuição para o gerenciamento. In: TAUK-TORNIELO, S. M.; QUEIROZ, T. A. **Análise Ambiental: estratégias e ações**. Rio Claro, SP: UNESP, 1995.
- LOFFREDO, E.; BERLOCO, M.; SENESI, N. The role of humic fractions from soil and compost in controlling the growth in vitro of phytopathogenic and antagonistic soil-borne fungi. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, New York, v. 69, p. 350-357, 2008.
- LOPES, A. S. **Manual internacional de fertilidade do solo**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1998.
- LYNCH, J. M. Substrate availability in the production of composts. In: HOITINK, H. A. J.; KEENER, H. M. (Ed.). **Science and engineering of composting: design, environmental, microbiological and utilization aspects**. Worthington, OH: Renaissance Publications, 1993.
- MacGREGOR, S. T.; MILLER, F. C.; PSARIANOS, K. M.; FEINSTEIN, M. S. Composting process control based on interaction between microbial heat output and temperature. **Applied Environmental Microbiology**, Washington, v. 41, p. 1321-1330, 1981.
- MALHER, C. **Poluição: poluição aquática e resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: Aquarius, 2002. 132 p.
- MASON, I. G.; MILKE, M. W. Physical modeling of the composting environment: A review. Part 1: Reactor systems. **Waste Management**. v. 25, p. 481-500. 2005a.
- MASON, I.G.; MILKE, M. W. Physical modeling of the composting environment: A review. Part 2: Simulation performance. **Waste Management**. v. 25, p. 501-509. 2005b.
- MILLER, F. C.; FINSTEIN, M. S. Materials balance in the composting of sewage sludge as affected by process control strategy. **Journal Water Pollution Control Federation**, Alexandria, v. 57, p.122-127. 1985.

- MILLER, F. C. Composting as a process base on the control of ecologically selective Factors. In: METTING, F. B. (Ed.). **Soil microbial ecology: application in agricultural and environmental management**. New York: Marcel Dekker Inc, 1993. p.515-541.
- MILLER, P. R. M. et al. **Análise do ciclo da água em uma pilha de compostagem**. Florianópolis: UFSC, 2009. No prelo.
- MILLER, P. R. M.; LOVATO, P. E.; Dal SOGLIO, F. K.; INÁCIO, C. T.; SILVA, E. O Manejo Agroecológico como Alternativa à Desinfecção do Solo. In: REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE ALTERNATIVAS AO BROMETO DE METILA NA AGRICULTURA, 1., Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: EPAGRI, 1996. p.311-324.
- MIRANDA, C. R. de. Aspectos ambientais da suinocultura brasileira. In: SEGANFREDO, M. A. **Gestão Ambiental na Suinocultura**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2007. p. 13-36.
- MITCHEL, J. et al. **Soil management and soil quality for organic crops**. San Pablo, CA: UC ANR Publication, 2000. Disponível em: <<http://anrcatalog.ucdavis.edu/pdf/7248.pdf>>. Acesso em: 20 mai. 2008
- NAZAROFF, W. W.; ALVAREZ-COHEN, L. **Environmental engineering science**. Hoboken: Wiley, 2001
- NEVES, M. C. P.; RUMJANECK, N. G. Bioquímica e fisiologia da fixação de nitrogênio. In: CARDOSO, J. B. N. E.; TSAI, S. M.; NEVES, M. C. P. **Microbiologia do solo**. Campinas: SBSC, 1992. 360 p.
- NOVARTIS. House fly: life cycle. Disponível em: <http://www.flycontrol.novartis.com/species/housefly/en/life_cycle.shtml>. Acesso em: 17 jun. 2009.
- NUNES, M. L. A. **Avaliação de procedimentos operacionais na compostagem de dejetos suínos**. 2003. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- OLIVEIRA, F. C. Manejo de biossólidos das lagoas aeradas de Jundiá/SP. In: Palestra. SIMPÓSIO INTERAMERICANO DE BIODIVERSIDADE, 6., Rio de Janeiro. **Palestras...** Rio de Janeiro: ABES, 2006. p. 27-29.
- OLIVEIRA, P. A. V.; NUNES, M. L. A.; ARRIADA, A. A. Compostagem e utilização de cama na suinocultura. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO E NUTRIÇÃO DE AVES E TECNOLOGIA DA PRODUÇÃO DE RAÇÃO, Campinas. **Anais...** Campinas: CBNA, 2001. p. 391-406.

- PEIXOTO, R. T. dos G. Compostagem: princípios, práticas e perspectivas em sistemas orgânicos de produção. In: AQUINO, A. M.; ASSIS, R. L. de. **Agroecologia: Princípios e técnicas para uma agricultura orgânica sustentável**. Brasília, DF: EMBRAPA, 2005. p.387-422.
- PEREIRA NETEO, J. T. Composting: experiences and perspectives in Brazil. In: EUROPEAN COMMISSION INTERNATIONAL SYMPOSIUM, London. **Anais...** London: Blackie Academic & Professional, 1996. v. 2, p. 729-735.
- PEREIRA NETEO, J. T. Conceitos modernos de compostagem. **Engenharia Sanitária**, Rio de Janeiro, v.28, n.3, p. 104-109, 1989.
- PEREZ, D. V. et al. Composted municipal waste effects on chemical properties of a Brazilian Soil. **Bioresource Technology**. v. 98, p. 525-533, 2007.
- POINCELOT, R. P. **The biochemistry and methodology of composting**. New Haven: CAES, 1975.
- POULSEN, T. G. Aerobic composting. In: **SOLID Waste Management**. Aalborg: Aalborg University, 2003. p.67-69.
- RANDLE, P. E.; FLEGG, P. B. Oxygen measurements in a mushroom compost stack. **Scientia Horticulturae**, v. 8, p.315-323, 1978.
- RYNK, R. **On-farm composting handbook**. Ithaca, NY: NRAES, 1992, 186 p.
- SANTA CATARINA (Estado). **Plano diretor regional de gestão integrada de resíduos sólidos urbanos -PDRS, regiões metropolitanas de Florianópolis, vale do Itajaí, foz do rio Itajaí..** Florianópolis: CODESC, 2003. 1. CD-ROM.
- SCHIANETZ, B. **Passivos ambientais: levantamento histórico: avaliação de periculosidade: ações de recuperação**. Curitiba: SENAI, 1999.
- SCHULZE, K. L. Continuous thermophilic composting. **Applied Microbiology**, Washington, DC, v. 10, p. 108-122, 1962.
- SEGRANFREDO, M. A. Uso de dejetos suínos como fertilizante e seus riscos ambientais. In: SEGRANFREDO, M. A. **Gestão Ambiental na Suinocultura**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2007. p. 149-176.
- SIEVERDING, E. **Vesicular-arbuscular Mycorrhiza management in tropical agrosystems**. Eshborn: GTZ, 1991. 327 p.
- SILVA, C. A. Uso de Resíduos Orgânicos na Agricultura. In: SANTOS, G. (Org.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Gênese, 2008.

- STEVENSON, F. J. **Humus chemistry**. New York: John Wiley. 1982. 443 p.
- SUAREZ-ESTRELLA, F. et al. Antagonistic activity of bacteria and fungi from horticultural compost against *Fusarium oxysporum* f.sp. *melonis*. **Crop Protection**, v. 26, p. 46-53, 2007.
- TEIXEIRA, L. B.; GERMANO, V. L. C.; OLIVEIRA, R.; FURLAN JUNIOR, J. **Processo de compostagem a partir de lixo orgânico urbano em leira estática com ventilação natural**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2004. 8 p. (Embrapa Amazônia Oriental. Circular técnica, 33).
- THOMAZ-SOCCOL, V.; PAULINO, R. C.; CASTRO, E. Aspectos sanitários do uso agrícola do lodo de esgoto: helmintos e protozoários. In: RECICLAGEM agrícola de lodos: transformando problemas em soluções. Curitiba: SANEPAR, 1999. p. 156-179.
- THOMPSON, A. G.; WAGNER-RIDDLE, C.; FLEMING, R. Emissions of N₂O and CH₄ during the composting of liquid swine manure. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 91, p. 87-104, 2004.
- TSUTYA, M. T. Alternativas de disposição final de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgotos. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. (Ed.). **Impacto ambiental do uso do lodo de esgoto**. Jaguariúna, SP: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. p. 69-105.
- USEPA. **A Plain english guide to the EPA part 503 Biosolids Rule**. EPA/832/R-93/003. 1994. Disponível em: <<http://www.epa.gov/epaoswer/non-hw/compost/cytmsw.pdf>>. Acesso em: 12 ago. 2008
- USEPA. **Compost of yard trimmings and municipal solid waste**. EPA530-R-94-003. 1994. Disponível em: <<http://www.epa.gov/epaoswer/non-hw/compost/cytmsw.pdf>>. Acesso em: 12 ago. 2008
- USEPA. **United States Environmental Protection Agency [home page]**. Disponível em: <<http://www.epa.gov/epaoswer/non-hw/composting/science.htm>>. Acesso em: 10 nov. 2006.
- USEPA. **Environmental regulation and technology control of pathogens and vector attraction in sewage sludge**. Under 40 CFR. Part 503 . 625/R-92/013. 1992. Disponível em: <<http://www.epa.gov/epaoswer/non-hw/composting>>. Acesso em: 10 nov. 2006

- VANDERGHEYNST, J .S.; LEI, F. Microbial community structure dynamics during aerated and mixed composting. **Transactions of ASAE**, v. 46, n. 2, p. 577-584, 2003.
- VANDERGHEYNST, J .S.; LEI, F. The effect of microbial inoculation and pH on microbial community structure changes during composting. **Process Biochemistry**, v. 35, p. 923-929, 2000.
- VANDERGHEYNST, J .S. et al. Effects of process management on the emission of organosulfur compounds and gaseous antecedents from composting processes. **Environmental Science technology**, v. 32, n. 23, p. 3713-3718, 1998.
- WAKSMAN, S. A.; CORDON, T. C. Thermophilic decomposition of plant residues in composts by pure and mixed cultures of microorganisms. **Soil Science**, Baltimore, v. 43, n. 3, p. 217-225, 1939.
- WAKSMAN, S. A.; UMBREIT, W. W.; CORDON, T. C. Thermophilic actinomycetes and fungi in soils and composts . **Soil Science**, Baltimore, v. 47, p. 37-61, 1993.
- ZAMBONIM, F. M. **Análise econômica de dois processos de tratamento de lixo: a compostagem termofílica e a disposição final em aterros sanitários**. 1997. 30 f. Relatório de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia)- UFSC. Florianópolis.

The logo for Embrapa, featuring the word "Embrapa" in a stylized blue font with a green leaf-like shape above the letter 'a'.

Solos

Apoio



A produção de alimentos com maior qualidade ambiental e a gestão dos resíduos orgânicos para redução de impactos ambientais possuem uma forte interface nos estudos e na aplicação das técnicas de compostagem.

Este livro é resultado da experiência adquirida pelos autores no trabalho que se iniciou em 1994 com a implantação do projeto de Coleta Seletiva e Compostagem de Resíduos do campus da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. É fruto também da retomada dos esforços dos pesquisadores da **Embrapa Solos** no estudo e desenvolvimento de novos projetos de compostagem e produção de fertilizantes orgânicos em parceria com empresas, instituições públicas e organizações não-governamentais.

Os autores buscam apresentar as possibilidades da gestão de resíduos orgânicos baseada na compostagem, bem como, o embasamento científico e prático para aplicação e difusão de uma técnica de baixo custo e comprovada eficácia. Os amplos benefícios da compostagem para a gestão de resíduos orgânicos incluem a produção de adubos orgânicos, prolongamento da vida útil de aterros sanitários e redução das emissões de metano pela disposição de resíduos, entre outros impactos ambientais.

Ministério da Agricultura,
Pecuária e Abastecimento



ISBN - 978-85-85864-31-6