



**UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE ENGENHARIA E ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
Área de concentração: Infraestrutura e Meio Ambiente**

ISMAEL CARLOS TREVISAN

**COMPOSTAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES SOB
DIFERENTES CONDIÇÕES AMBIENTAIS E DE REVOLVIMENTO**

Passo Fundo

2011

ISMAEL CARLOS TREVISAN

COMPOSTAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES SOB DIFERENTES
CONDIÇÕES AMBIENTAIS E DE REVOLVIMENTO

Orientador: Prof. Pedro Domingos Marques Prietto, Dr.
Co-orientador: Prof. Pedro Alexandre Varella Escosteguy, PhD.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia para obtenção do grau de Mestre em Engenharia na Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo na Área de concentração Infraestrutura e Meio Ambiente.

Passo Fundo
2011

ISMAEL CARLOS TREVISAN

COMPOSTAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES SOB DIFERENTES
CONDIÇÕES AMBIENTAIS E DE REVOLVIMENTO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia para obtenção do grau de Mestre em Engenharia na Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo na Área de concentração Infraestrutura e Meio Ambiente.

Data da aprovação: Passo Fundo 13 de dezembro de 2011

Os membros componentes da Banca Examinadora abaixo aprovam a Dissertação.

Dr. Pedro Domingos Marques Prietto
Orientador

Dr. Pedro Alexandre Varella Escosteguy
Co-orientador

Dr. Alfredo Castamann
Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS

Dr. Antonio Thomé
Universidade de Passo Fundo – UPF

Dr^a. Karla Salvagni Heineck
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

Passo Fundo
2011

AGRADECIMENTOS

Ao professor Pedro Alexandre Varella Escosteguy, pela dedicação na orientação inicial e Co-orientação deste trabalho iniciado em 2003.

Ao Professor Pedro Domingos Marques Prietto que prontamente me auxiliou na conclusão deste trabalho.

Ao Professor e amigo Antonio Thomé, que me deu apoio na retomada deste trabalho.

Ao prefeito de São Domingos do Sul – RS, Sr. Oscar Guerra que em 2003 disponibilizou a estrutura da prefeitura para a realização do experimento.

A Josieli Vans de Almeida, estagiária do laboratório de química do solo e resíduos sólidos da Faculdade de Agronomia - UPF.

Ao meu caro amigo Engenheiro Cassiano Benedeti que na minha ausência conduziu a coleta dos dados no final do experimento de campo.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus familiares, papai, mamãe, a minha esposa Eliane e minha filha Nicole que sempre me apoiaram nesta caminhada, e que apesar dos tropeços sempre ficaram do meu lado.

RESUMO

A compostagem é um método controlado de tratamento dos resíduos sólidos domiciliares (RSD), geralmente, operada em pátios descobertos. No Sul do Brasil, essa condição prolonga o tempo do processo, demandando maior frequência de aeração das leiras de compostagem. O objetivo do trabalho foi avaliar a compostagem de RSD conduzida em ambiente coberto e com dois métodos de aeração. O trabalho foi realizado no município de São Domingos do Sul, RS, em 2003/2004. Os tratamentos testados foram: leira com revolvimento coberta (LREV-COB); leira não revolvida e coberta (LNREV-COB); leira com revolvimento descoberta (LREV-DESCOB); leira não revolvida descoberta (LNREV-DESCOB). Os tratamentos foram arranjados em parcelas subdivididas (LREV e LNREV) e sub-subdivididas (COB e DESCOB). Foram avaliados como respostas os valores de temperatura, umidade, pH, C, N, C:N, P, K, Ca, Mg, até os 121 dias de compostagem, os quais, juntamente com os valores de microrganismos enteropatogênicos, foram comparados com os padrões para compostos orgânicos adotados pelo Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento - MAPA. O tratamento LREV-COB proporcionou maior número dias com valores de temperatura correspondente à fase termófila (55 a 65°C) e com valores > 65°C. A umidade das leiras cobertas foi menor que das descobertas, as quais demandaram 20 litros de água, em média diária, a mais. Outras vantagens deste último tratamento foi a não geração de lixiviado e a dinâmica mais estável dos resultados de pH e da relação C:N. No tratamento LREV-COB o processo finalizou aos 121 dias, ocasião em que a compostagem não tinha sido finalizada nos demais tratamentos. Além de atender aos padrões do MAPA, o tratamento LREV-COB apresentou ausência de lixiviado e de proliferação de vetores sendo o tratamento dentro do experimento com os indicadores mais satisfatórios.

Palavras-chave: compostagem, resíduos sólidos domiciliares, tratamento de resíduos sólidos

ABSTRACT

Composting is a controlled method of treatment for municipal solid waste (MSW), usually operated in uncovered courtyards. In southern Brazil, this condition prolongs the process, requiring more frequent aeration of compost windrows. The objective of this study was to evaluate the composting of MSW conducted in a covered/uncovered environment and with two methods of aeration. The study was conducted in São Domingos do Sul, in 2003/2004. The treatments were: covered windrow with revolving, covered windrow without revolving, uncovered windrow with revolving, and uncovered windrow without revolving. The treatments were arranged in divided plots (windrow with revolving and windrow without revolving) and sub-divided plots (covered and uncovered). It was evaluated as responses the values of temperature, moisture, pH, C, N, C: N, P, K, Ca, and Mg, until the 121th day of composting, which, together with the values of enteropathogenic microorganisms, were compared to the organic compound standards adopted by the Ministry of Agriculture, Livestock and Supply - MAPA. The treatment using covered windrow with revolving provided more days with temperature values corresponding to the thermophile phase (55 to 65 °C) and with values greater than 65 °C. The moisture contents in the covered windrows were lesser than those observed for the uncovered windrows, which demanded 20 liters more of water per day, on average. Other advantage of the latter treatment was the non-generation of leachate and the more stable dynamics of the results of pH and C:N relation. In the treatment using covered windrow with revolving the process was completed in 121 days, while for the other treatments the composting had not been completed at this time. According to the MAPA standards, the treatment using covered windrow with revolving showed no leachate and spreading vectors, being the best treatment in the experiment with the most satisfactory results.

Keywords: composting, urban solid waste, solid waste treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de Leiras revolvidas mecanicamente.....	23
Figura 2 - Estrutura de madeira utilizada em leiras estáticas.....	25
Figura 3 - Material disposto sobre a estrutura de madeira em leiras estáticas.....	25
Figura 4 - Sistema de leira estática com aeração forçada ou mecânica.....	26
Figura 5 - Bio-reator de alimentação vertical.....	27
Figura 6 - Mapa do Rio Grande do Sul, destacando a localização do Município de São Domingos do Sul.....	41
Figura 7 - Imagem do Google earth do local do experimento.....	42
Figura 8 - Acesso, cerca e pátio de compostagem, onde foi realizado o experimento. São domingos do Sul, RS, 2003.....	43
Figura 9 - Moega utilizada para recepção dos resíduos sólidos domiciliares no experimento. São domingos do Sul, RS, 2003.....	43
Figura 10 - Esteira utilizada para a seleção manual dos resíduos sólidos domiciliares no experimento. São domingos do Sul, RS, 2003.....	44
Figura 11 - Material triado na esteira da unidade de triagem de São Domingos do Sul e que foi para a compostagem, contendo quantidade expressiva de materiais sólidos não putrescíveis.....	44
Figura 12 - Peneira rotativa com acionamento elétrico para a separação do composto. São domingos do Sul, RS, 2003.....	45
Figura 13 - Lagoa de tratamento do lixiviado, com revestimento em PEAD. São domingos do Sul, RS, 2003.....	46
Figura 14 - Característica da cobertura do pátio de compostagem. São domingos do Sul, RS, 2003.....	47
Figura 15 - Revolvimento da leira de compostagem. São domingos do Sul, RS, 2003.....	47
Figura 16 - Leira de compostagem montada sobre a manta impermeável. São domingos do Sul, RS, 2003.....	48

Figura 17 - Montagem de leira de compostagem descoberta - LREV-DESCOB. São domingos do Sul, RS, 2003.....	49
Figura 18 - Termômetro digital com haste metálica. São domingos do Sul, RS, 2003.....	49
Figura 19 - Esquema de introdução da haste metálica. São domingos do Sul, RS, 2003.....	50
Figura 20 - Coleta das amostras para envio ao laboratório.....	51
Figura 21 - Sistema de coleta e armazenamento do lixiviado.....	52
Figura 22 - Valores da temperatura de leiras de compostagem de resíduos sólidos domiciliares tratados com revolvimento (REV) e sem revolvimento (LNREV) em ambiente coberto (COB) e descoberto (DESCOB), ao longo dos dias de compostagem. São domingos do Sul, RS, 2003.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Percentual do número de dias em que os valores de temperatura das leiras de compostagem revolvidas (LREV), e não revolvidas (LNREV), em ambiente coberto (COB), e ambiente descoberto (DESCOB), permaneceram em diferentes faixas.....	54
Tabela 2 - Umidade das leiras de compostagem revolvidas (LREV), e não revolvidas (LNREV), em ambiente coberto (COB), e ambiente descoberto (DESCOB), levantada semanalmente.....	56
Tabela 3 - Volume de água adicionada nas leiras de compostagem revolvidas (LREV), e não revolvidas (LNREV), em ambiente coberto (COB), ao longo dos dias de compostagem.....	57
Tabela 4 - Valor de pH em solução de CaCl ₂ mol.L ⁻¹ das leiras de compostagem revolvidas (LREV), e não revolvidas (LNREV), em ambiente coberto (COB), e ambiente descoberto (DESCOB), levantada semanalmente.....	58
Tabela 5 - Carbono orgânico de leiras de compostagem revolvidas (LREV) e não revolvidas (LNREV), em ambiente coberto (COB), e ambiente descoberto (DESCOB), determinado a cada duas semanas.....	58
Tabela 6 - Nitrogênio total das leiras de compostagem revolvidas (LREV), e não revolvidas (LNREV), em ambiente coberto (COB), e ambiente descoberto (DESCOB), levantado a cada duas semanas.....	59
Tabela 7 - Relação Carbono/Nitrogênio das leiras de compostagem revolvidas (LREV), e não revolvidas (LNREV), em ambiente coberto (COB), e ambiente descoberto (DESCOB), levantado a cada duas semanas.....	60
Tabela 8 - Análise físico-química do lixiviado das leiras de compostagem revolvidas (LREV), e não revolvidas (LNREV), e ambiente descoberto (DESCOB).....	60
Tabela 9 - Análise dos patogênicos do lixiviado das leiras de compostagem revolvidas (LREV), e não revolvidas (LNREV), e ambiente descoberto (DESCOB).....	61
Tabela 10 - Análise dos patogênicos no material sólido das leiras de compostagem revolvidas (LREV), e não revolvidas (LNREV), em ambiente coberto (COB), e ambiente descoberto (DESCOB).....	61

Tabela 11 - eor de carbono orgânico (C), de nitrogênio total (N), da relação carbono:nitrogênio (C:N) e valores de pH em solução de CaCl₂ mol/L-1 e de umidade (Ug), macro e micronutrientes de compostos orgânicos obtidos em diferentes tratamentos de compostagem de resíduos sólidos domiciliares.....

62

Tabela 12 - Balanço de massa das leiras de compostagem revolvidas (LREV), e não revolvidas (LNREV), em ambiente coberto (COB).....

63

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 Conceito de resíduos sólidos.....	17
2.2 Classificação de resíduos sólidos.....	18
2.3 Conceito de compostagem.....	21
2.4 Fases da compostagem.....	21
2.5 Métodos de compostagem.....	23
2.5.1 Leiras revolvidas.....	23
2.5.2 Leiras estáticas	24
2.5.3 Compostagem com uso de reatores	26
2.5.4 Compostagem em ambiente coberto	27
2.6 Fatores que influenciam a compostagem.....	28
2.6.1 Aeração.....	28
2.6.2 Temperatura.....	30
2.6.3 Umidade.....	31
2.6.4 Relação carbono:nitrogênio.....	32
2.6.5 Granulometria.....	33
2.6.6 Potencial hidrogeniônico.....	34
2.7 Impactos ambientais e a saúde.....	35
2.7.1 Odor.....	35
2.7.2 Insetos e vetores.....	35
2.7.3 Lixiviado.....	36
2.7.4 Microorganismos enteropatogênicos.....	37
2.8 Composto de lixo.....	38
2.8.1 Conceito.....	38
2.8.2 Classificação.....	38
2.8.3 Tolerância.....	38

2.8.4 Propriedades físico-química do composto.....	39
2.8.5 Qualidade biológica do composto.....	39
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
3.1 Local do experimento.....	41
3.2 Sistema de tratamento.....	45
3.3 Descrição do experimento.....	46
3.3.1 Montagem das leiras.....	47
3.3.2 Controle da temperatura.....	49
3.3.3 Controle da umidade.....	50
3.3.4 Coleta e análise do lixiviado.....	51
3.3.5 Carbono orgânico, nitrogênio e relação carbono:nitrogênio.....	51
3.3.6 Análise do composto.....	52
3.3.7 Balanço de massa.....	52
3.3.8 Outras análises.....	52
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
4.1 Temperatura.....	54
4.2 Umidade.....	55
4.3 Potencial hidrogeniônico.....	57
4.4 Teor de carbono orgânico, de nitrogênio e relação carbono:nitrogênio....	58
4.5 Atributos físico-químicos do lixiviado.....	60
4.6 Enteropatogênicos do lixiviado e das leiras de compostagem.....	61
4.7 Qualidade do composto comparado com a IN n° 25/2009.....	62
4.8 Balanço de massa.....	63
5 CONCLUSÕES.....	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65

1 INTRODUÇÃO

Existe um consenso entre as pessoas e entidades envolvidas direta ou indiretamente na questão dos resíduos sólidos domiciliares (RSD) no Brasil, que é chegado o momento de se implantar em maior escala sistemas de tratamento adequados, pois a disposição destes resíduos diretamente em lixões, ou até mesmo em células bem dimensionadas, é em última análise um desperdício econômico, onde grande parte deste material pode ser reaproveitado de alguma forma.

Atendendo aos anseios de boa parte da sociedade civil, o governo brasileiro em 2010 instituiu a "Política Nacional dos Resíduos Sólidos", com a aprovação da lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Tal política estabelece as diretrizes a serem adotadas quanto à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos (BRASIL, 2010). Esta política é considerada um avanço na busca de um desenvolvimento sustentável e estabelece um marco regulatório para a gestão de resíduos sólidos, pois trata de assuntos como destinação final ambientalmente adequada, gerenciamento integrado e alternativas de aproveitamento econômico dos resíduos, como também geração de trabalho e renda.

Quando se fala em resíduos sólidos, os domiciliares contribuem significativamente pelo volume depositado de forma incorreta e não sustentável. A compostagem com certeza é uma forma eficiente de tratamento dos RSD, porém, é um processo que exige alguns cuidados básicos, como o controle de umidade e temperatura, e que se mal conduzido pode comprometer a operação.

Tradicionalmente, a compostagem dos RSD tem sido realizada em pátio a "céu aberto". Essa forma de compostagem apresenta certos inconvenientes, como a alta produção de lixiviado, maior incidência de moscas e demais vetores, variação constante da umidade em função da pluviosidade e variação da temperatura (BIDONE; POVINELLI, 1999).

Por outro lado, a compostagem dos RSD pode ser realizada em pátio coberto, sem apresentar estes inconvenientes. Entretanto, atualmente são desconhecidos os parâmetros de aeração, umidade, geração e qualidade do lixiviado, controle de temperatura e odor nestas condições de compostagem.

O que se propõe neste trabalho, no tema compostagem em ambiente coberto, é, em última análise, minimizar a produção de lixo e buscar uma eficiência no processo, com o controle da umidade e dos outros fatores.

Nos últimos tempos, tem-se verificado um aumento significativo da produção de resíduos sólidos domiciliares, devido a um padrão de vida exageradamente consumista, fruto, quem sabe, do dito avanço tecnológico. Isso, lamentavelmente, se afasta de um modelo de desenvolvimento sustentável. Como consequência desse fenômeno, o tratamento e destinação final dos resíduos sólidos tornaram-se um processo de grande importância nas políticas sociais e ambientais dos países mais desenvolvidos.

No Brasil, cerca de 1% dos resíduos sólidos coletados recebem algum tipo de tratamento, sendo que cerca de 75% destes ainda estão sendo dispostos na forma de lixões (REICHERT, 1999).

O aumento significativo da produção de resíduos sólidos domiciliares, aliado à disposição inadequada dos mesmos, vem causando uma série de problemas ao meio ambiente como, por exemplo, a contaminação das águas superficiais e subterrâneas. Outro fator importante é a escassez de áreas adequadas para a disposição final destes resíduos.

Um dos principais componentes dos resíduos é a matéria orgânica, sendo que um dos processos mais indicados no tratamento deste material é a compostagem. A compostagem consiste em um processo biológico que possibilita estabilizar a matéria orgânica com maior rapidez e em melhores condições. Na natureza, a estabilização ou humificação ocorre em prazo indeterminado, ficando a mercê das condições ambientais em que ela se encontra.

Como boa parte dos resíduos sólidos domiciliares é constituída de matéria orgânica putrescível, geralmente com uma percentagem acima dos 60% (PEREIRA NETO, 1996), a compostagem se torna interessante como forma de tratamento, pois além de reduzir o volume final de rejeito, o material produzido pode ser utilizado como substituto de produtos químicos utilizados na adubação e na recuperação de solos. Porém, esta forma de tratamento, embora perfeitamente aplicável, é muito pouco utilizada, principalmente em cidades pequenas, onde existe certa deficiência em equipamentos e mão de obra especializada no assunto. Uma vez bem gerenciada, a compostagem poderá significar um incremento em tecnologia e uma forma ambientalmente sustentável de tratar os resíduos sólidos domiciliares.

Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo geral avaliar a compostagem em ambiente coberto para o tratamento de resíduos sólidos domiciliares gerados em município de pequeno porte.

Diante deste objetivo geral, foram buscados os seguintes objetivos específicos durante o desenvolvimento da pesquisa:

- Caracterizar os resíduos sólidos domiciliares que serão submetidos ao processo de compostagem quanto a sua composição química e físico-química, incluindo parâmetros como pH, matéria orgânica, condutividade, micro e macro nutrientes, metais e organismos patogênicos;
- Caracterizar o composto obtido quanto à composição química e físico-química, incluindo parâmetros como pH, matéria orgânica, condutividade, micro e macro nutrientes, metais e organismos patogênicos;
- Avaliar os fatores que influenciam na compostagem, como a umidade, a temperatura e as condições naturais de aeração, bem como a produção e carga poluidora do lixiviado, comparando leiras em pátio de compostagem coberto com leiras em ambiente descoberto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Conceito de resíduos sólidos

O crescimento gradativo da população aliado ao processo acelerado de urbanização tem evidenciado um dos problemas mais característicos da humanidade, ou seja, o da produção de resíduos sólidos.

No Brasil, atribuiu-se ao lixo, segundo a NBR 10.004 (ABNT, 2004) – Resíduos Sólidos – Classificação, a denominação de Resíduo Sólido. *Residum*, do latim, significa o que sobra de determinadas substâncias, e *Sólido* é incorporado para diferenciá-lo de líquidos e gases. De acordo com a referida norma, resíduos sólidos são todos aqueles resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam da atividade de origem: industrial, doméstico, hospitalar, comercial, entre outros.

No entanto, para Bidone (2001), a noção de resíduo não existe na natureza. Esta afirmação é fundamentada pelos grandes ciclos naturais em que, comumente, o papel do decompositor é transformar ou incorporar completamente as matérias descartadas pelos outros componentes do sistema, sem alterar o equilíbrio natural. Bidone (2001), afirma ainda que a noção de resíduo como elemento negativo, causador de degradação da qualidade ambiental, é de origem antrópica e, em geral, aparece quando a capacidade de absorção natural pelo meio no qual está inserido é ultrapassada.

Segundo Philippi Jr (1999), qualquer mistura de materiais ou restos destes, oriundos dos mais diversos tipos de atividades humanas, que serão descartados por não apresentarem utilidade à sociedade, é considerado como resíduo sólido.

O impacto ambiental causado por resíduos deve-se à interação destes com o meio, paralelamente ao esgotamento de sua capacidade de depuração. Entende-se por interação o fluxo de substâncias sem controle, no meio em que estas estão inseridas. Essa base sobre a origem antrópica do conceito de resíduo permite defini-lo sob diferentes pontos de vista, notadamente, etimológico, econômico, jurídico, sociológico e ambiental. Em função destas conceituações, a noção de resíduo deve ser considerada relativa tanto no tempo quanto no espaço: um valor de uso ou utilidade nulo para um detentor pode corresponder a um valor de uso positivo para outro (BIDONE, 2001).

2.2 Classificação de resíduos sólidos

Os resíduos sólidos, conforme Philippi Jr. (1999), são classificados de acordo com sua natureza física – seco ou molhado, sua composição química – orgânico ou inorgânico e, os riscos potenciais que oferecem ao meio ambiente e à saúde pública – perigoso, não inerte e inerte. No que diz respeito a sua origem, os resíduos sólidos são classificados em: domiciliares, comerciais, públicos, serviços de saúde, industriais, agrícolas, etc.

Para Bidone (1999), alguns critérios permitem a classificação dos resíduos sólidos, os quais são função da origem destes e de sua possível degradabilidade. Estes critérios não resolvem o problema por completo, mas são úteis para uma primeira incursão no caminho da classificação, e posterior gerenciamento dos mesmos. Assim, de acordo com sua origem, os resíduos sólidos podem ser classificados em:

- **Urbanos:** enquadram-se os residenciais, comerciais, de varrição, de feiras livres, de capinação e poda;
- **Industriais:** inclui-se um grande percentual de lodos provenientes do processo de tratamento de efluentes líquidos industriais, muitas vezes tóxicos e perigosos;
- **Serviços de saúde:** abrangem os resíduos sólidos de hospitais, de clínicas médicas e veterinárias, de centros de saúde, de consultórios odontológicos e de farmácias;
- **Radioativos:** inserem-se os resíduos de origem atômica, cujo controle ou gerenciamento está de acordo com a Legislação Brasileira, sob a tutela do Conselho Nacional de Energia Nuclear (CNEN);
- **Agrícolas:** agrupam-se aqueles resíduos resultantes dos processos de produção de defensivos agrícolas e suas embalagens;

Bidone (1999) afirma, ainda, que de acordo com seu grau de degradabilidade, os resíduos sólidos podem ser classificados em:

- **Facilmente degradáveis:** é o caso da matéria orgânica presente nos resíduos sólidos de origem urbana;
- **Moderadamente degradáveis:** papéis, papelão e material celulósico;
- **Difícilmente degradáveis:** pedaços de pano, retalhos, aparas e serragens de couro, borracha e madeira;

- **Não degradáveis:** incluem-se aqui os vidros, metais, plásticos, pedras, terra, entre outros.

De acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004), um resíduo é considerado perigoso quando suas propriedades físicas, químicas e infectocontagiosas representam: risco a saúde pública, caracterizado pelo aumento de mortalidade ou incidência de doenças; risco ao meio ambiente, quando manuseados de forma inadequada; entre outros. Em acréscimo, a NBR 10.004 estabelece que a classificação dos resíduos deve desenvolver-se com base em cinco critérios de periculosidade: a) inflamabilidade; b) corrosividade; c) reatividade; d) toxicidade; e) patogenicidade (excluídos os resíduos sólidos domiciliares e aqueles gerados em estações de tratamento de esgotos sanitários). Ocorrendo a impossibilidade do enquadramento dos resíduos em pelo menos um dos critérios citados, a NBR 10.004 estabelece a necessidade de que amostras dos mesmos sejam submetidas a ensaios tecnológicos, avaliando-se as concentrações (em extratos líquidos) de elementos que conferem periculosidade, de acordo com as listas organizadas pela norma referida (BIDONE, 1999).

Do mesmo modo, a caracterização do resíduo, forma pela qual se pode tomar conhecimento da sua composição física, varia de acordo com diversos aspectos. Philippi Jr. (1999) recomenda a análise da composição dos resíduos por meio de amostras coletadas conforme a NBR 10.004.

A partir de critérios e ensaios definidos pela norma citada, os resíduos sólidos são classificados e podem ser enquadrados em uma das classes a seguir: a) resíduos classe I: perigosos; b) resíduos classe IIa: não perigosos, não inertes; c) resíduos classe IIb: não perigosos, inertes.

- **Resíduos classe I – perigosos:** são considerados classe I aqueles resíduos cujas amostras, submetidas ao teste de lixiviação, apresentarem nos extratos lixiviados concentrações superiores às previstas pela norma citada;
- **Resíduos classe IIa – não perigosos, não inertes:** não se enquadram em nenhuma outra classe e podem apresentar propriedades como combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água. Estão incluídos papéis, papelão, matéria vegetal, etc.
- **Resíduos classe IIb – não perigosos, inertes:** são aqueles que, submetidos ao teste de solubilização, não tiveram nenhum dos seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água.

A geração, coleta e disposição final dos resíduos sólidos representam um problema de grande magnitude para o governo e para toda a sociedade, mundialmente. Na verdade, a viabilidade econômica da reciclagem vem sendo objeto de controvérsia. A mais freqüente das posições consiste em afirmar que a reciclagem não é economicamente viável. Por outro lado, embora com menor freqüência, são apresentados argumentos a favor da reciclagem, invocando-se, sobretudo, razões ligadas à qualidade ambiental (CALDERONI, 1999).

Conforme Bidone (1999), a geração de resíduos depende de fatores culturais, nível e hábito de consumo, rendas e padrões de vida das populações, entre outros. A economia de um país interfere diretamente na geração de resíduos. Por exemplo, em períodos de recessão econômica, a quantidade de resíduos coletados diminui devido ao aumento da reutilização e decréscimo na geração. A solução para o problema passa necessariamente pela definição de um programa de gerenciamento integrado de resíduos sólidos, com ênfase para a redução de geração na fonte, reutilização e reciclagem, com efetivo aproveitamento.

O tratamento e a destinação final dos resíduos sólidos são determinados por alguns fatores como: as características desses resíduos – se domiciliares, industriais ou de serviço de saúde, por exemplo; a capacidade de investimento do município; o nível técnico e o comprometimento político da administração pública; e a disponibilidade de espaço para disposição final desses resíduos. Estas são algumas das principais condicionantes a serem observadas, quando da tomada de decisão quanto à forma final de tratamento e disposição. O aprimoramento das técnicas utilizadas para o tratamento e disposição final dos resíduos sólidos, que vem culminando em procedimentos mais criteriosos e planejados, como a reciclagem, os aterros sanitários, as instalações de compostagem e os incineradores, decorreu, também, da evolução do conhecimento sobre os ecossistemas e os impactos ambientais causados pela ação do homem, resultando na adoção de medidas mais restritivas no tocante ao uso dos recursos naturais. Dessa forma, a crescente quantidade de resíduos gerados vem estimulando a criação de inúmeros programas visando sua minimização (PHILIPPI JR., 1999).

2.3 Conceito de compostagem

Conforme Kiehl (2002), a compostagem foi desenvolvida com a finalidade de se obter mais rapidamente e em melhores condições a estabilização da matéria orgânica. No processo de compostagem os restos são amontoados, irrigados, preferencialmente revolvidos e se decompõem em menor tempo, produzindo um melhor adubo orgânico.

Considera-se, ainda, a compostagem como sendo um processo controlado de decomposição microbiana de oxidação e oxigenação de uma massa heterogênea de matéria orgânica no estado sólido e úmido, passando pelas seguintes fases: uma inicial e rápida de fitotoxicidade ou de composto cru ou imaturo, seguidas da fase de semicura ou bioestabilização, para atingir finalmente a terceira fase, a cura, maturação ou mais tecnicamente, a humificação, acompanhada da mineralização de determinados componentes da matéria orgânica, quando se pode dar por encerrada a compostagem. Durante todo o processo ocorre produção de calor e desprendimento, principalmente, de gás carbônico e vapor d'água (KIEHL, 2002).

Para Bidone (2001), a compostagem é um processo biológico aeróbio e controlado, no qual ocorre a transformação de resíduos orgânicos em resíduos estabilizados, com propriedades e características completamente diferentes do material que lhe deu origem. Normalmente é realizada em pátios abertos (sem cobertura) onde o material é disposto em montes de forma cônica, conhecidos como pilhas de compostagem, ou em montes de forma prismática com seção similar a triangular, denominados leiras de compostagem.

Bidone (2001) explica, ainda, que durante o processo alguns componentes da matéria orgânica são utilizados pelos próprios microorganismos para a formação de seus tecidos, outros são volatilizados e outros, transformados biologicamente em uma substância escura, uniforme, com consistência amanteigada e aspecto de massa amorfa, rica em partículas coloidais, com propriedades físicas e químicas inteiramente diferentes da matéria-prima original. Essa substância é chamada de húmus. Esse processo de biodegradação é considerado uma alternativa de tratamento da matéria orgânica presente em resíduos sólidos.

2.4 Fases da compostagem

Basicamente o processo de compostagem pode ser dividido em três fases: 1) uma fase inicial, com duração de poucos dias, durante a qual os materiais muito degradáveis

(ex. açúcares) são utilizados pelos microorganismos para aumentar sua população, iniciando a elevação de temperatura; 2) uma fase termófila, com duração de várias semanas, durante a qual a celulose é o principal material degradado, por intensa atividade microbiana; 3) uma fase de estabilização ou maturação, quando restam apenas materiais muito resistentes ao ataque microbiano e organismos mesofílicos recolonizam o composto (PARCHEN, 1988).

Para Parchen (1988), há dois grandes tipos de compostagem de lixo urbano: o método natural e o método de digestão acelerada. O método natural é aquele em que o lixo sofre uma prévia catação ou peneiramento e é colocado para compostar em leiras (pilhas). O método de digestão acelerada é aquele em que os resíduos sofrem triagem manual ou mecânica para a separação dos não orgânicos, sendo que a fração orgânica é tratada em digestores de diversos tipos, que consistem basicamente em câmaras providas de revolvimento mecânico constante e aeração forçada, objetivando acelerar a fermentação. Esse tipo de tratamento muitas vezes é complementado com um período de cura em pátios de compostagem a céu aberto.

Gotaas (1956) relata que as variações nos diferentes procedimentos de compostagem usando covas ou trincheiras relacionam-se principalmente ao torneamento e o tempo de compostagem.

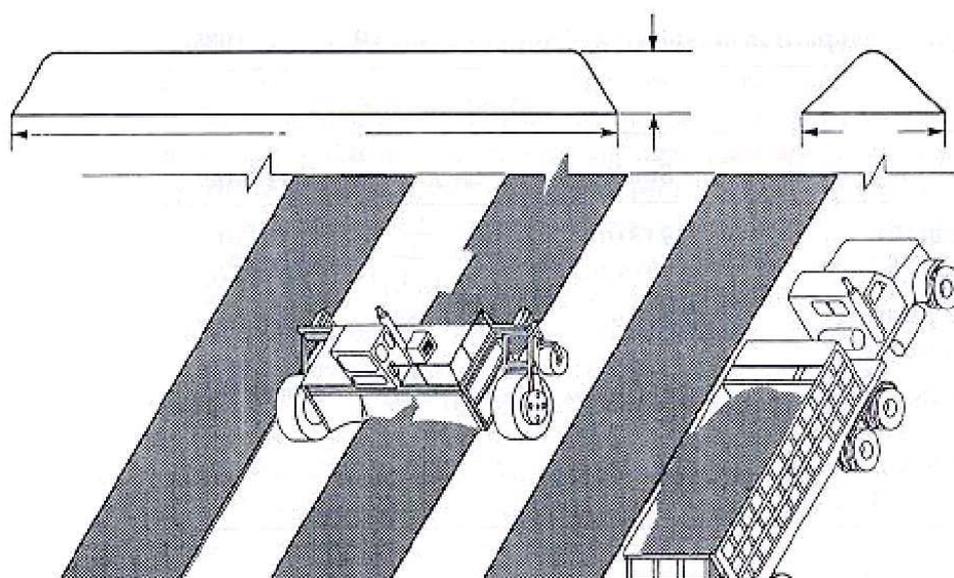
Segundo Kiehl (1985), podem-se classificar os métodos de compostagem segundo os fatores predominantes no processo de fermentação: aeração, temperatura, ambiente, tempo de compostagem, entre outros. Quanto à aeração pode-se classificar os processos em aeróbio e anaeróbio; quanto à temperatura, em criófila, mesófila e termófila; quanto ao ambiente, pode ser ambiente aberto ou fechado; quanto ao tempo de compostagem, em lentos e acelerados.

Lima (1991) enumera dezenove sistemas de compostagem diferentes, onde a classificação é feita diferenciando basicamente a forma de tratamento prévio dos resíduos e a destinação dos rejeitos. Alguns sistemas citados pelo autor são diferenciados pela utilização de restos vegetais e dejetos animais. Outros sistemas utilizam biodigestores, e ainda o autor cita a utilização de minhocas para realizar a compostagem. No entanto destes dezenove sistemas descritos, dez deles são idênticos, pois tem no seu fluxograma a recepção, triagem manual ou mecânica, trituração, peneiramento, digestão e maturação, e cura em pátio de compostagem, com pequenos diferenciais neste ou naquele procedimento.

2.5 Métodos de compostagem

2.5.1 Leiras revolvidas

O sistema de leiras revolvidas, ilustrado na Figura 1, é quando os resíduos são dispostos em leiras sendo que a aeração é fornecida pelo revolvimento dos materiais e pela convecção do ar na massa dos materiais. O material que esta na parte interna da leira no momento da movimentação entra em contato com a atmosfera rica em oxigênio e faz com que este ar supra as necessidades do processo (FERNANDES E SILVA,1996).



Fonte: Fernandes; Silva (1996)

Figura 1 - Sistema de leiras revolvidas mecanicamente.

Segundo Kuter (1995), os objetivos do sistema de leiras revolvidas são:

- Aerar a massa de resíduo em compostagem;
- Aumentar a porosidade do meio, que sofre uma compactação natural;
- Homogeneizar a mistura;
- Expor as camadas externas às temperaturas mais elevadas do interior da leira melhorando a eficiência na desinfecção;
- Reduzir a granulometria dos resíduos;
- Diminuir o teor de umidade do composto.

O processo de compostagem mais usual, simples, e de fácil entendimento com uso de baixa tecnologia, é o que consiste em leiras com revolvimento. Este

revolvimento pode ser mecânico ou manual. Teixeira *et al.* (2004) cita que este é o processo de compostagem mais comum em se tratando de lixo orgânico urbano para produção de composto. A decomposição da matéria orgânica se dá pelo processo aeróbio e o revolvimento é a forma de introdução da aeração. O revolvimento constante é o que faz com que ocorra uma homogeneização da decomposição da matéria orgânica.

A eficiência do sistema de tratamento de resíduos orgânicos com compostagem depende de alguns fatores como a qualidade da matéria prima, temperatura, umidade e aeração. No sistema de leiras revolvidas com reviramento manual ou mecânico, a sistemática do revolvimento é o que faz com que ocorra a reposição de umidade adequada para o desenvolvimento do processo. Bidone (1999) demonstra que o tempo estimado médio para a compostagem nas leiras está entre 60 e 90 dias. A temperatura esperada nas leiras em pleno processo varia na superfície, na faixa intermediária e mais ao centro, $T < 50^{\circ}\text{C}$, $50^{\circ}\text{C} < T < 60^{\circ}\text{C}$ e $T > 60^{\circ}\text{C}$, respectivamente.

2.5.2 Leiras estáticas

As leiras estáticas geralmente têm a mesma dimensão das leiras com revolvimento. Os principais fatores que contribuem para a eficiência no processo não diferem do sistema de leiras revolvidas, ou seja, matéria prima, umidade, temperatura e aeração. Neste sistema o material não passa por nenhuma movimentação, a umidade é fornecida conforme a necessidade ou pela pluviosidade dependendo da região e do sistema pluviométrico. A aeração é fornecida de maneira forçada com pressão positiva. Bidone (1999) coloca que este tipo de compostagem necessita de alguns equipamentos para que se proceda à distribuição homogênea de O_2 , e isso pode ser executado com tubos de PVC com furos e com um compressor para insuflação do ar.

Teixeira *et al.* (2004) mostra um sistema de compostagem com leiras estáticas de forma simples e com a utilização de materiais disponíveis no local, neste caso no estado do Pará, onde a madeira ainda tem disponibilidade (Figuras 2 e 3). Neste sistema, com aeração natural, a construção do túnel de aeração possibilita que ocorra um caminho onde o O_2 passa pela massa do material a ser compostado. Para que ocorra a movimentação do ar, o resíduo sólido domiciliar é misturado numa proporção de 30% de lixo orgânico urbano, 40% de capim e 30% de caroço de açaí. As camadas são dispostas sobre a estrutura mostrada na Figura 2 de forma a permitir a aeração necessária para o processamento do composto.



Fonte: Teixeira et al. (2004)

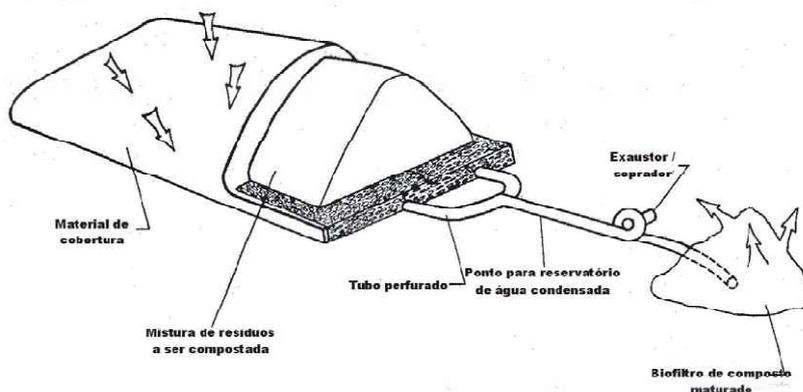
Figura 2 - Estrutura de madeira utilizada em leiras estáticas.



Fonte: Teixeira et al. (2004)

Figura 3 - Material disposto sobre a estrutura de madeira em leiras estáticas.

Na Figura 4, se evidencia a aeração do tipo forçada onde o oxigênio necessário para a oxidação da matéria orgânica é introduzido na leira através de um exaustor que força a entrada do ar no material a ser compostado sem a necessidade de revolvimentos (FERNANDES; SILVA, 1996).



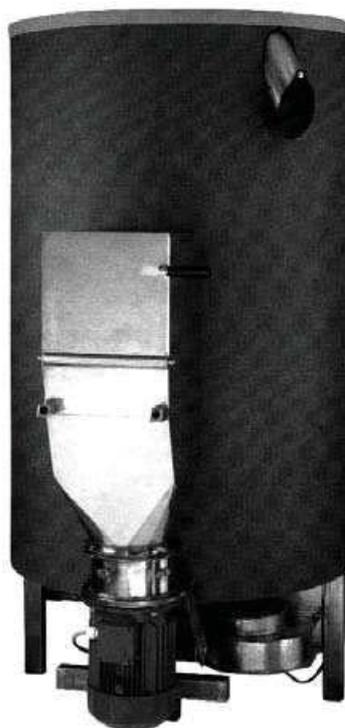
Fonte: Fernandes; Silva (1996)

Figura 4 - Sistema de leira estática com aeração forçada ou mecânica.

2.5.3 Compostagem com uso de reatores

A compostagem com o uso de reatores é um processo acelerado. Os resíduos sólidos domiciliares são materiais bem heterogêneos tanto do ponto de vista granulométrico como também quanto aos teores de carbono e nitrogênio. Os reatores têm a função de homogeneizar toda a massa a passar pela compostagem, com a uniformização da umidade, da granulometria através da moagem, e da temperatura da massa, fazendo com que o processo ocorra num tempo mais curto do que os materiais dispostos em leira (KIEHL; MARQUES; HOGGLAND, 2002).

Marques e Hogland (2002) testaram o uso de um reator conforme ilustra a Figura 5, com pequena dimensão e capacidade de 830 litros. Este reator possui um motor e triturador na parte inferior. O reator é alimentado horizontalmente e tem uma capacidade de produção aproximada de 500 kg de composto por semana. Este bioreator possui também aeração forçada que faz com que o processo se dê de forma mais eficiente. Este tipo de equipamento pode ser utilizado em condomínios, porém, para que se tenha eficiência no processo, é necessário que as pessoas envolvidas tenham treinamento e se comprometam com os aspectos técnicos da operação.



Fonte: Marques Hogland (2002).

Figura 5 - Bioreator de alimentação vertical.

Silva et al. (2008) experimentaram o uso de um reator simples, confeccionado a partir de toneis de plástico, com uso de lodo de tanque séptico e restos vegetais. Os materiais foram homogeneizados e passaram por reviramento manual periódico. Esse experimento demonstrou certa limitação em função da alta umidade do lodo, o que fez com que a fase termófila durasse pouco tempo, não eliminando por completo os ovos dos helmintos.

2.5.4 Compostagem em ambiente coberto

Conforme Kiehl (1985), são considerados abertos os processos nos quais a massa a ser decomposta é colocada em montes nos chamados pátios de compostagem, enquanto que os processos em ambiente fechado são aqueles nos quais o material a ser fermentado é encaminhado para digestores em forma de tambores rotativos, torres com pisos em andares superpostos, tanques, silos, entre outros, todos com revolvedores mecânicos para a movimentação da matéria orgânica. A compostagem em ambiente aberto ou em pátio exige maior área do que em ambiente fechado, a não ser quando os dois processos estão associados. Na compostagem em pátio aberto, o tempo de cura geralmente é maior, ocupando as pilhas maior espaço, além daquele perdido com os

corredores. Nos processos fechados, o revolvimento do composto é feito no próprio digestor, de onde vai diretamente para o galpão de armazenamento.

Gorgati e Júnior (2002) conduziram um experimento com leiras de resíduos sólidos domiciliares em ambiente coberto e a céu aberto. Esse trabalho teve como objetivo avaliar a interferência da chuva sobre o volume e características do chorume produzido durante o processo. Foram controladas as variáveis umidade e temperatura das leiras cobertas, fazendo-se o revolvimento e rega. Foram coletados o chorume tanto das leiras cobertas como das em ambiente a céu aberto. Neste trabalho, concluiu-se que o chorume produzido nas leiras em ambiente coberto não foi suficiente para suprir a necessidade de umidade para a realização do processo, desta forma não se tem a necessidade de tratamento. Embora se tenha um custo mais elevado, o sistema é ambientalmente correto.

2.6 Fatores que influenciam a compostagem

2.6.1 Aeração

A oxigenação da leira de compostagem pode ser efetuada por processos naturais (reviramentos). A aeração tem por finalidade básica suprir a demanda de oxigênio requerida pela atividade microbológica e atuar como agente de controle da temperatura (KRIEGER, 2003).

Segundo Bidone (1999), a compostagem deve ser realizada em ambiente aeróbio. Além de mais rápida e melhor conduzida, não produz mau cheiro nem proliferação de moscas. Essa aeração pode ocorrer por revolvimento manual ou por meios mecânicos, com insuflamento de ar.

No entanto, Kiehl (2002) assegura que a decomposição dos resíduos compostados pode ser realizada pelos dois processos, aeróbio ou anaeróbio. O aeróbio é realizado na presença de oxigênio livre e por organismos aeróbios, sendo caracterizado pela alta temperatura desenvolvida no composto, pela ausência de maus odores, pelo menor tempo de degradação da matéria orgânica e pelas reações de oxidação e oxigenação que se dão no processo, conduzindo o substrato a ter no final um pH maior que 7,0. O processo anaeróbio é realizado principalmente por bactérias que decompõem a matéria orgânica por fermentação, na ausência de oxigênio, sendo caracterizada pela baixa temperatura desenvolvida (a menos que calor externo seja aplicado), pela produção de maus odores, pelas reações de redução química que ocorrem na massa em fermentação,

pelo maior tempo de cura em relação ao processo aeróbio e pela tendência do composto se tornar ácido.

Kiehl (2002) ainda afirma que a aeração é, na prática da compostagem, o fator mais importante a ser considerado no processo de decomposição da matéria orgânica.

Para Parchen (1988), a digestão aeróbia deve ser garantida por revolvimentos da massa em fermentação ou por insuflação de ar no interior das leiras, via compressores. No caso das leiras que necessitam ser revolvidas manualmente ou mecanicamente, devem ser adotadas medidas que facilitem a auto aeração via correntes de convecção. Para tal, recomenda-se que as pilhas tenham de 1,50 a 1,80 metros de altura, não sejam muito compactadas e contenham no interior da massa uma certa proporção de materiais grosseiros, de consistência firme e estruturalmente resistentes, de modo a aumentar a macroporosidade. Desse modo, o calor gerado leva a renovação do ar interno pela sua movimentação dentro da pilha.

Os sistemas de compostagem operados sob aeração forçada apresentam melhor eficiência, com melhores resultados para o sistema operado sob o modo positivo de aeração. Este modo de aeração permite um elevado grau de controle das temperaturas internas das pilhas, fato este que pode ser utilizado para aumentar a eficiência do processo: menor perda de umidade e nitrogênio, grande atividade microbiana de degradação e eliminação de organismos patogênicos. Com relação aos aspectos operacionais, este sistema também apresenta as melhores vantagens visto que envolve menos mão-de-obra, necessita de menor área para instalação (não requer espaço para a pilha filtro, reviramento e apresenta um menor período de compostagem), dispensa os aparatos para condensação, não produz chorume e nem odor (fatos associados ao sistema negativo e híbrido) (PEREIRA NETO, 1987).

Ainda, conforme Pereira Neto (1987), as pilhas aeradas por reviramento, embora apresentem a mesma eficiência em termos de taxa de biodegradação da matéria orgânica, não são eficientes em termos de eliminação de organismos patogênicos. Este fato parece ser uma deficiência do processo, uma vez que as camadas externas das pilhas (por não serem cobertas) funcionam como um reservatório de microorganismos que contaminam sucessivamente toda a massa de compostagem a cada reviramento. Desse modo, as perdas de nitrogênio registradas parecem ser também mais uma deficiência no processo, visto que as condições de temperatura e pH no processo de aeração forçada são bastante similares às do sistema windrow.

2.6.2 Temperatura

Os microorganismos possuem metabolismo exotérmico, isto é, realizam a decomposição da matéria orgânica gerando calor e elevando a temperatura da leira, graças às propriedades isolantes da massa em compostagem (KIEHL, 2002). Conforme Kiehl (2002), devido à existência de faixas de temperatura consideradas ótimas para os microorganismos encontrados no composto, estes são classificados em grupos denominados de mesófilos, termófilos e termotolerantes. Para Bidone (1999), a compostagem deve ser realizada nas faixas mesófilas, isto é, de 45°C a 55°C e termófilas, isto é, acima de 55°C, quando ocorre a erradicação de ervas daninhas e dos microorganismos patogênicos, garantindo a qualidade sanitária do composto. Esse autor ainda informa que temperaturas acima de 65°C são desaconselháveis, uma vez que mantidas por longos períodos, eliminam os microorganismos bioestabilizadores responsáveis pela transformação do material bruto em húmus. O aquecimento das pilhas ou leiras de compostagem ocorre naturalmente, em função do processamento do material pelos microorganismos cujo metabolismo é exotérmico.

O desenvolvimento da temperatura relaciona-se a vários fatores: materiais ricos em proteínas com relação carbono:nitrogênio (C:N) baixa aquecem-se rapidamente; materiais moídos e de maior homogeneidade formam montes com melhor distribuição e menor perda de calor; montes com materiais grosseiros, com boa aeração, alcançam altas temperaturas, mas perdem calor facilmente (BIDONE, 1999).

Durante o processo de compostagem, se sucedem diferentes estádios de temperatura. Inicialmente, a temperatura do material compostado é próxima a do ambiente. Em poucos dias, a temperatura atinge valores que se situam na fase mesófila, aumentando, a seguir, para valores que se situam na fase termófila e decrescendo para a mesófila. No final da degradação da matéria orgânica, quando a temperatura se iguala com a do ambiente, a fase é denominada de criófila (crio = frio). O tempo para atingir essas fases e sua duração variam de acordo com fatores como composição química da matéria-prima a ser tratada, granulometria, dimensões da leira, teor de umidade reinante, entre outros (KIEHL, 2002).

Parchen et al. (1990) realizaram um estudo para determinar a distribuição das temperaturas em leiras de compostagem de lixo urbano e constataram variações significativas da temperatura na linha inferior, média e superior. Considerar a

temperatura somente em um ponto pode se configurar em um erro grave de avaliação, pois pode retardar o processo de resfriamento e ocorrer perdas de N.

O controle da temperatura nas leiras pode ser feito via revolvimento, quando a temperatura cai, por encharcamento ou anaerobiose e por revolvimento e irrigação, quando a temperatura é excessiva, no caso de compostagem natural a céu aberto. Como a temperatura varia de acordo com a posição da leira, recomenda-se medi-la sempre a uma mesma profundidade, em torno de 50 cm e a meia altura da pilha, em diversos pontos para se ter um valor médio representativo (PARCHEM, 1988).

2.6.3 Umidade

Como a compostagem é um processo biológico de decomposição da matéria orgânica, a presença de água é imprescindível para as necessidades fisiológicas dos organismos. Se a umidade do substrato a ser compostado estiver abaixo de 40%, a decomposição será aeróbia, mas lenta, predominando a ação de fungos, pois as bactérias estarão pouco ativas. Se a umidade estiver acima de 60%, o material se mostrará molhado ou encharcado e, nesse caso, a água toma o espaço vazio do ar e a decomposição será em parte anaeróbia, podendo produzir maus odores. Portanto, a umidade deve estar sempre acima de 40% e abaixo de 60%, sendo o valor ótimo 55% (KIEHL, 2002).

Do mesmo modo, Bidone (1999) afirma que para que o processo ocorra idealmente, é importante buscar o equilíbrio entre água e ar, que é obtido mantendo-se o material em processamento com um teor de umidade da ordem de 55%. Os resíduos orgânicos domésticos ou domiciliares apresentam naturalmente uma umidade ao redor de 55%, razão pela qual a compostagem representa uma interessante alternativa para sua transformação em húmus.

Já para Kiehl (1985), o teor de umidade da matéria-prima em processo de compostagem é influenciado pelo tamanho e composição das partículas e pela sua capacidade de resistir à compactação, características que também vão governar a porosidade total da pilha. No composto encontram-se dois tipos de porosidade: a microporosidade, que retém água por capilaridade e a macroporosidade, cujos espaços são ocupados pelo ar ou pela água quando há encharcamento, mas que a perdem por efeito da força da gravidade tão logo cesse o efeito da saturação. Saindo a água da macroporosidade, o ar passa a ocupar esse espaço.

Em trabalho realizado por Santos et al. (2010), com compostagem de esterco de aves poedeiras, ficou constatado que no tratamento onde não houve revolvimento, a umidade final ficou acima do máximo permitido pelo MAPA (BRASIL, 2005) que estabelece os parâmetros para comercialização de fertilizante orgânico.

O excesso de umidade de um material em compostagem pode ser reduzido por meio de revolvimentos freqüentes, pela formação de leiras de menor altura e pelo método de aeração forçada. Sabe-se que a quantidade de ar para remover o calor e a umidade é muitas vezes maior que a necessária para suprir a leira com oxigênio para o metabolismo microbiano (KIEHL, 2002).

2.6.4 Relação carbono:nitrogênio

O tempo de compostagem é condicionado, entre outros fatores, pela relação carbono:nitrogênio (C:N) do material compostado. Quanto mais elevada a relação, maior será o tempo necessário para se atingir a humificação da matéria orgânica. Matérias-primas com baixos teores de nitrogênio, 0,5% ou menos, também prolongam o tempo de compostagem. A explicação para este fato é que, durante a decomposição, os microorganismos obtêm carbono e nitrogênio da matéria orgânica na relação 30/1 (KIEHL, 2002).

Na seleção do material a ser compostado, deve-se ter em mente a relação final entre os materiais ricos em carbono e os ricos em nitrogênio utilizados na compostagem. A melhor relação C:N em uma pilha de composto é de 25 a 30 partes de carbono para uma parte de nitrogênio. Em termos práticos, isso significa que quase todo o material a ser adicionado deve ser material concentrado em carbono. Uma pilha com uma relação C:N muito superior a 25:1 ou 30:1 levará bastante tempo para decompor. Se a relação C:N é muito baixa, ou seja, se tiver muito nitrogênio, a pilha provavelmente irá liberar o excesso de N na forma de gás de amônia, com forte cheiro. Conforme Bidone (2001), essas perdas ocorrem, principalmente, durante os revolvimentos do material para oxigenação e controle da temperatura. Em geral, adiciona-se de 1 a 1,5 kg de material rico em nitrogênio para cada 50 kg de material rico em carbono (KIEHL, 2002).

Materiais orgânicos com elevada relação C:N, quando aplicados ao solo, podem induzir a deficiência de nitrogênio nas plantas, o que resulta em sintomas de clorose, podendo chegar até a necrose das folhas. No entanto, quando a relação C:N é

excessivamente baixa, em torno de 5:1 ou 10:1, como acontece com os resíduos animais oriundos de frigoríficos, os organismos tendo a disposição alto teor de nitrogênio e baixo de carbono como fonte de energia, utilizam todo o carbono disponível, e eliminam o excesso de nitrogênio na forma amoniacal. Essa liberação de amônia na atmosfera causa perdas de nitrogênio reduzindo o teor do elemento no produto acabado. As perdas de nitrogênio são mais acentuadas quando se procura preparar o composto em curto prazo, realizando mais revolvimentos para garantir melhor arejamento da massa, que, por suas características naturais, tende a se compactar. As perdas mais pronunciadas na fase termófila, e com pH na faixa de alcalinidade, favorecem o desprendimento de amônia, volatilização essa auxiliada pela elevada temperatura e pelo revolvimento. O desprendimento de amônia é tão intenso que se chega a sentir o cheiro característico de amoníaco desprendendo do composto ao ser revolvido (KIEHL, 1985).

A relação C:N constitui um parâmetro confiável para o acompanhamento da compostagem até ao final do processo, quando o produto final, humificado, apresenta relação C:N entre 8:1 e 12:1, com valor médio de 10:1. Ela ainda indica que o composto com relação 18:1 ou um pouco menor está semicurado ou bioestabilizado, já podendo ser utilizado como fertilizante orgânico sem riscos de causar danos às plantas. Pela legislação brasileira em vigor, um produto pode ser comercializado como fertilizante orgânico se apresentar a relação C:N menor do que 18:1, C maior que 15 e N maior que 0,5 (BRASIL, 2005). Mesmo sendo um parâmetro confiável, sempre se deve valer de dois ou mais parâmetros para a confirmação da fase final de decomposição do composto, como por exemplo, o pH e a ausência de nitrogênio amoniacal, entre outros (KIEHL, 2002).

2.6.5 Granulometria

A granulometria é um fator muito importante que influencia diretamente na eficiência do processo de compostagem. Quando por algum processo de trituração mecânica ou pelas características originais do material, este apresentar uma granulometria muito fina, a massa pode sofrer compactação, comprometendo com isso a aeração. Resíduos com granulometria muito grande ou pedaços inteiros podem apresentar baixa umidade no interior e menor superfície aparente de contato com os microorganismos. Este fato faz com que ocorra um retardamento no processo de compostagem. Para solucionar este tipo de problema, podem-se acrescentar alguns

materiais alternativos, como, por exemplo, restos vegetais quando o material a ser compostado apresentar granulometria muito pequena. Os restos vegetais ajudarão na aeração do material (FERNANDES; SILVA, 1996).

Kühr e Müller (1999) afirmam que a granulometria tem importante função no processo de compostagem, pois facilita a aeração e influencia na eficiência final.

Quando se tem partículas muito pequenas pode ocorrer compactação, comprometendo a aeração. Por outro lado, partículas muito grandes podem retardar a compostagem por reterem pouca umidade e apresentarem menor superfície de contato com os microorganismos (CERRI et al., 2008)

2.6.6 Potencial hidrogeniônico

A leitura do potencial hidrogeniônico (pH) durante o processo pode indicar o estado de compostagem dos resíduos. O pH da massa nas primeiras horas de processamento poderá ser inferior a 5,0, e, com o andamento do processo, pode-se chegar, no final, a níveis entre 7,0 e 8,0. Valores baixos de pH são indicativos de maturação não completa ou ocorrência de processos anaeróbios na leira de compostagem. À medida que os microorganismos digerem a matéria orgânica, os mesmos liberam ácidos que se acumulam e acidificam o meio. Com o passar do tempo estes ácidos são decompostos e se oxidam. Porém, se existir deficiência de O₂, o pH poderá descer a valores muito baixos e limitar a atividade microbiana (JIMENEZ; GARCIA, 1989).

Os compostos de dejetos animais geralmente apresentam índice de pH neutro ou levemente alcalinos. Os microorganismos que atuam na compostagem tem uma faixa ótima de atuação entre 6,5 a 8,0. Quando o processo é bem conduzido em termos de granulometria, umidade, aeração, não apresenta problemas quanto ao controle de pH (PEIXOTO, 1981).

2.7 Impactos ambientais e a saúde

2.7.1 Odor

De acordo com Kiehl (2002), os odores têm as seguintes origens: cheiro natural do resíduo sólido orgânico; compostagem mal conduzida (leiras sem revolvimento,

muito altas ou encharcadas); cheiro oriundo do lixiviado ou chorume (excesso de umidade); entre outros.

A maior parte dos problemas de odores nos processos de compostagem aeróbia está associada ao desenvolvimento de condições anaeróbias na pilha de compostagem. Em grandes processos de compostagem aeróbia é comum encontrar fragmentos de revistas, livros e outros compostos orgânicos que não são compostados num espaço curto de tempo, e como o oxigênio nem sempre é suficiente, desenvolvem-se condições anaeróbias. Nestas circunstâncias, há produção de ácidos orgânicos que emitem odores intensos. Para minimizar os potenciais problemas de odores é importante reduzir o tamanho das partículas, retirar plásticos e outros materiais não biodegradáveis do material orgânico para compostar (KIEHL,1985).

2.7.2 Insetos e vetores

Os resíduos sólidos domiciliares ao ficarem expostos nas ruas esperando para serem recolhidos, nos recipientes dentro de casa, ou até mesmo no destino final, muitas vezes favorecem a proliferação de moscas. Estas por sua vez podem transmitir uma série de doenças infecciosas como a amebíase, salmonelose, etc. O lixo mal acondicionado serve ainda para criadouro e esconderijo de ratos. Estes por sua vez podem transmitir doenças como peste bubônica e leptospirose. O lixo pode favorecer a proliferação de mosquitos que se desenvolvem na água parada que fica acumulada em latas, pneus etc.

Mota (2003) diz que o homem causa poluição ambiental ao fazer o lançamento de resíduos de seu próprio processo biológico, ou dejetos que resultam das suas atividades. O lançamento destes resíduos sólidos no solo resultam em alguns problemas como aspectos estéticos, produção de maus odores, proliferação de insetos e roedores transmissores de doenças.

Araújo (2009) afirma que os vetores que vem associados com a ocupação urbana e disposição inadequada de resíduos sólidos urbanos, provavelmente são endêmicos das áreas naturais primitivas. Esta condição, associada com indicadores desfavoráveis de condição de vida no entorno destas áreas pode significar um aumento da ocorrência no ambiente urbano e das patologias a eles associados. A presença de vetores em áreas de vegetação próxima de ocupação humana deve ser motivo de preocupação. A infraestrutura básica como coleta de lixo, saneamento básico e rede de água potável,

associada à melhores indicadores sócio-econômicos, parece estar relacionada a uma diminuição da densidade destes insetos e vetores.

2.7.3 Lixiviado

O lixiviado ou chorume é um líquido de coloração escura proveniente da umidade natural do lixo que em locais descobertos em época de chuva mais intensa aumenta significativamente, da constituição dos materiais que sobram durante a decomposição e da dissolução de matéria orgânica pelas enzimas expelidas pelas bactérias. Estes microorganismos, no momento da alimentação, expõem enzimas que dissolvem a matéria orgânica e o excesso destas enzimas escorre como lixiviado.

A descarga deste material no solo e nas águas provoca a poluição química, baixando as taxas de oxigênio, elevando a DBO (demanda bioquímica de oxigênio). Quando a taxa de oxigênio diminui, desaparecem quase que totalmente os organismos aeróbios cedendo lugar para os anaeróbios. Estes por sua vez são responsáveis pelo desprendimento de gases como o CH_4 e NH_3 , sendo estes tóxicos para a maioria das formas de vida, principalmente o último. A carga orgânica de líquidos proveniente de sistemas de aterros sanitários indicam uma média de 10.000 mg.L^{-1} . Este valor é muito alto quando comparado a um lodo de esgoto sem tratamento que chega em média a 300 mg.L^{-1} (LIMA,1991).

Segundo Melo (2002), as concentrações de metais pesados no lixo urbano, principalmente nas grandes cidades provem de pilhas, baterias, jornais, tintas, tecidos, enlatados e até mesmo de alimentos que ao serem produzidos necessitam de substâncias a base de metais pesados. Esses metais são tóxicos mesmo em concentrações muito baixas e afetam o desenvolvimento bacteriológico que irá decompor os resíduos. Estes metais estarão presentes no lixiviado que chegará até o solo, águas superficiais e até mesmo nas águas profundas causando contaminação e impactos ao meio físico.

Para se determinar as características e o volume do lixiviado em locais de disposição de resíduos sólidos domiciliares, é necessário se conhecer as particularidades de cada aterro. Para se evitar a contaminação da água e do solo, são necessários estudos de reconhecimento ou projetos bem dimensionados e que levem em conta todos os fatores como coleta e tratamento deste lixiviado.

Wemer et al. (1996) apud Gorgati; Júnior (2002), em pesquisa realizada no Departamento de Recursos Naturais de Iowa concluíram que entre algumas alternativas,

a aspersão do lixiviado ou chorume sobre a leira foi o que se apresentou mais viável economicamente, tendo ainda as vantagens de aumentar significativamente a atividade microbiológica no processo e fornecer água para a manutenção da umidade necessária para o processo.

2.7.4 Microorganismos enteropatogênicos

Bidone (1999) destaca que a compostagem é um processo desenvolvido por uma colônia diversificada de microorganismos. Nesta população existem organismos patogênicos de origem animal e humano.

Kiehl (2002) diz que os RSD, assim como o lodo de esgoto e demais resíduos orgânicos, podem ser portadores de organismos patogênicos.

Uma das maneiras mais eficientes de eliminação dos patogênicos na compostagem é através da temperatura e do tempo de exposição destes microorganismos às altas temperaturas. Nas leiras de compostagem a temperatura não é uniforme em toda a leira, por isso naqueles sistemas onde há o revolvimento a eficiência da eliminação destes patogênicos é maior pois com certeza mais cedo ou mais tarde todo o material será exposto às temperaturas mais altas.

Os organismos patogênicos presentes na massa do material a ser compostado basicamente estão divididos em quatro grupos: fungos, vírus, bactérias e parasitas. O conhecimento e identificação dos agentes patogênicos é o que permite avaliar o potencial de risco de infecção a que o homem e outros animais estão expostos. Os agentes patogênicos que geralmente estão presentes e que mais preocupam são os parasitas intestinais, ovos de helmintos e cistos de protozoários (SOCCOL et al., 1997).

Em estudo realizado por Escosteguy et al. (1993), com o uso de RSD, foi constatado que embora comum neste tipo de resíduo, a *salmonella spp.* e *Streptococcus sp.* não foram encontrados nos compostos objeto deste estudo. Segundo os autores, isso se deve à ação da temperatura nas pilhas de compostagem, cujos valores foram superiores a 60°C, o que também eliminou quase que totalmente os coliformes fecais.

2.8 Composto de lixo

2.8.1 Conceito

Conforme Kiehl (2002), o termo composto indica o fertilizante orgânico preparado a partir de restos vegetais e animais, através de um processo denominado compostagem. Para evitar impactos ambientais indesejáveis do uso agrícola do composto de lixo, a qualidade desse produto é normatizada pelo Ministério de Agricultura do Brasil (MAPA), que considera o composto de lixo como sendo um

“fertilizante orgânico composto, obtido pela separação da parte orgânica dos resíduos sólidos domiciliares e sua compostagem, resultando em produto de utilização segura na agricultura e atendendo aos limites estabelecidos para contaminantes (BRASIL, 2009).

2.8.2 Classificação

Segundo a IN 25/2009, em se tratando de classificação, o composto orgânico proveniente da compostagem de lixo domiciliar que resulta em produto de utilização segura na agricultura esta classificado com Classe “C”, produto objeto deste estudo.

Quanto à granulometria, ele está classificado como granulado, pó, farelado e farelado grosso. Os que não podem ser enquadrados segundo a granulometria, em seu rótulo devem ter a expressão “Produto sem especificação granulométrica” (BRASIL, 2009)

2.8.3 Tolerância

Quanto aos parâmetros estabelecidos pela IN 25/2009, o composto orgânico resultante da compostagem de lixo domiciliar, tem que apresentar quanto à umidade máxima um valor ≤ 50 %. Quanto ao nitrogênio total este valor tem que ser no mínimo 0,5 %, o valor do carbono orgânico não pode ser menor que 15 %, e a relação carbono:nitrogênio tem que apresentar um valor máximo de 20. O potencial hidrogeniônico deverá ser $\geq 6,5$. Quanto aos teores de fósforo total (P_2O_5) e do potássio (K_2O) estes valores deverão constar conforme o declarado. Quanto aos valores de cálcio

(Ca) e magnésio (Mg), estes tem que apresentar percentuais maiores que 1% (BRASIL, 2009)

2.8.4 Propriedades físico-química do composto

Entre as características do composto já humificado pode-se destacar a capacidade de troca catiônica (CTC), onde o colóide húmus tem a propriedade de reter ou adsorver cátions eletrostaticamente, evitando o seu carreamento pela água da chuva. Outra característica do composto é a de formar quelados, ou seja, a propriedade de certos compostos orgânicos envolverem nutrientes metálicos como o potássio, cálcio magnésio, ferro, zinco, manganês, cobre, etc. Isso se dá pela propriedade de certos reagentes orgânicos atuarem como ligantes. Após a combinação do quelante com um metal o composto se chama quelado. Este material pode ser absorvido pelas raízes das plantas. Outra característica físico-química do composto humificado é a superfície específica. Quando os organismos decompõem a matéria orgânica formam uma massa de partículas diminutas, aumentando assim a área de exposição ou superfície específica. Quanto mais humificado for o composto, maior a superfície específica e maior a sua capacidade de retenção de nutrientes (KIEHL, 2002).

2.8.5 Qualidade biológica do composto

A utilização de composto orgânico como fertilizante no solo propicia uma ativação na microbiota do solo. A matéria orgânica é utilizada pelos microorganismos como fonte de energia. Como os nutrientes presentes no composto se encontram em baixa concentração, é usual se utilizar um quantidade alta de kg por hectare. O massa geralmente utilizado varia de 10 a 20 toneladas por hectare.

Todo o composto aplicado diretamente no solo atua como fonte de energia e fornecimento de nutrientes para os organismos vivos que estão naquele determinado solo. Na compostagem, os fenômenos biológicos da digestão aeróbia e anaeróbia fazem com que muitos microorganismos que poderiam se tornar maléficos ao solo sejam eliminados no processo, e quando este é incorporado já de forma processada fará com que os impactos ao solo sejam minimizados (KIEHL (2002).

Nascimento et al. (2005) relacionaram algumas vantagens da compostagem sob o ponto de vista biológico:

- Quando utilizado no solo melhora a estrutura;
- Aumenta a capacidade de infiltração de água;
- Dificulta ou impede a germinação de sementes;
- Aumenta o número de microorganismos desejáveis, devido à presença de matéria orgânica;
- Mantém a temperatura e os níveis de acidez do solo;
- Permite o aproveitamento agrícola da matéria orgânica;
- É um processo ambientalmente seguro;
- Permite a eliminação de patógenos;
- Rastreabilidade.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Local do Experimento

O experimento foi desenvolvido na Central de Triagem, Compostagem e Destinação Final de Resíduos Sólidos Domiciliares da Prefeitura de São Domingos do Sul – RS (Figura 6). As coordenadas geográficas do local $28^{\circ}33'04,87''S$ - $51^{\circ}51'43,68''O$ foram obtidas a partir de GPS Garmim Etrex e demarcado na imagem Google earth (Figura 7), com altitude de 662 metros. Este empreendimento foi implantado em 2003, com o devido licenciamento ambiental, e iniciou as atividades em setembro do referido ano.



Figura 6 - Mapa do Rio Grande do Sul, destacando a localização do Município de São Domingos do Sul.

A coleta dos resíduos sólidos utilizados no experimento foi realizada pela prefeitura de São Domingos do Sul, que utilizou um caminhão caçamba, três funcionários e um motorista. Nas segundas e sextas-feiras são coletados os RSD na zona urbana do município. Nas quartas-feiras são coletados os resíduos da coleta seletiva.



Fonte: Google earth. <http://maps.google.com/maps?ll=-28.544658,-51.87332&z=13&t=h&hl=pt-BR>, acessado em 11/01/2012.

Figura 7 - Imagem do Google earth do local do experimento.

O sistema de recebimento e triagem dos RSD é dotado de cercamento, com tela de alambrado de 1,50 metros, mureta de tijolos e portão dotado com fechadura (Figura 8).

O pátio de compostagem tem desnível em direção às laterais, onde há canaletas que recolhem o lixiviado proveniente do processo de compostagem e também a água da chuva incidente sobre o material e o pátio.

O revestimento do pátio foi executado com piso impermeável em concreto, com uma malha de ferro de 4 mm. A espessura do concreto é de 0,10 m que, juntamente com a malha de ferro, possibilita trafegar com veículos médios sobre ele.

O material proveniente do recolhimento é descarregado na moega (Figura 9). Esta tem capacidade para armazenar o material recolhido em um dia. O material construtivo é resistente e de fácil higienização.

O caminhão que faz a coleta dos RSD no município descarrega na moega basculando a caçamba. O material depositado na moega é conduzido até a esteira de triagem por gravidade (Figura 10). A esteira é movimentada por um moto redutor alimentado com energia elétrica.



Figura 8 - Acesso, cerca e pátio de compostagem, onde foi realizado o experimento. São Domingos do Sul, RS, 2003.



Figura 9 - Moega utilizada para a recepção dos resíduos sólidos domiciliares no experimento. São Domingos do Sul, RS, 2003.

Após a triagem, o material reciclável é devidamente separado e encaminhado até os depósitos de armazenagem, permanecendo dentro do galpão para futura embalagem e venda. O material destinado a compostagem é depositado no pátio de compostagem. Esse material possui ainda um alto teor de sólidos que não podem ser submetidos a este processo (Figura 11). Isso indica que a separação poderia ser feita de forma mais rigorosa, levando-se ao pátio de compostagem um volume menor.



Figura 10 - Esteira utilizada para a seleção manual dos resíduos sólidos domiciliares no experimento. São Domingos do Sul, RS, 2003.

A prefeitura adotou o procedimento de triagem onde o material segregado para a comercialização é aquele de maior valor comercial. Plásticos e papéis misturados com resíduos orgânicos conduzidos ao pátio de compostagem, após este processo são separados por uma peneira rotativa, sendo depois conduzidos para descarte na célula de deposição de rejeitos. Esta célula tem as mesmas características de impermeabilização da lagoa de tratamento (Figura 13), que foi feita em polietileno de alta densidade - PEAD, com espessura de 1,5 mm.



Figura 11 - Material triado na esteira da unidade de triagem de São Domingos do Sul e que foi para a compostagem, contendo quantidades expressivas de materiais sólidos não putrescíveis.

O rejeito, antes de ser conduzido até a célula de descarte, passa pela prensa, que faz com que seu volume seja reduzido e desta forma a célula tenha uma vida útil maior. Esta célula possui um sistema de coleta de lixiviado e água da chuva que leva até o filtro anaeróbico e posteriormente até a lagoa de tratamento.

3.2 Sistema de tratamento

Todo material que passa pela esteira de triagem e não é segregado vai para o pátio de compostagem, carregado por um carro de mão. No final do processo de compostagem, o material é submetido ao peneiramento (Figura 12), com posterior embalagem do material compostado para a utilização em praças, vias públicas, em jardins, e, conforme a produção, também no horto florestal na produção de mudas.



Figura 12 - Peneira rotativa com acionamento elétrico para separação do composto. São Domingos do Sul, RS, 2003.

A peneira utilizada possui estrutura metálica de forma tubular com 3,0 metros de comprimento, e diâmetro de 0,80 metros. O acionamento é elétrico com moto redutor de 1 cv. O diâmetro dos furos da peneira é de 5 mm, no primeiro metro; 10 mm, no meio; e 25 mm no metro final.

O rejeito deste processo é submetido à prensagem e depositado na célula de disposição final, similar à apresentada na Figura 13.

Durante o processo de compostagem e operação do aterro sanitário, ocorre o processo biológico de decomposição da matéria orgânica e este gera um líquido chamado lixiviado ou chorume. Este líquido, juntamente com a água de lavagem dos

equipamentos, do piso do galpão e da chuva incidente sobre a área do pátio é conduzido a um sistema de tratamento composto por uma caixa separadora e um filtro anaeróbio de fluxo ascendente. Saindo do filtro, o efluente é conduzido até a lagoa de tratamento.



Figura 13 - Lagoa de tratamento do lixiviado, com revestimento em PEAD. São Domingos do Sul, RS, 2003.

3.3 Descrição do experimento

O experimento teve início no final do mês de setembro de 2003, após a cobertura do pátio de compostagem, pois a prefeitura possuía o pátio com revestimento em concreto, mas o mesmo não estava coberto. A cobertura foi executada com estrutura de madeira, com pé direito livre de 3,0 metros (Figura 14) e cobertura com telhas de fibrocimento de 4 mm.

O experimento consistiu em avaliar quatro tratamentos com duas repetições cada:

- 1 - leiras revolvidas e cobertas (LREV-COB);
- 2 - leiras não revolvidas e cobertas (LNREV-COB);
- 3 - leiras revolvidas e descobertas (LREV-DESCOB);
- 4 - leiras não revolvidas e descobertas (LNREV-DESCOB).



Figura 14 - Característica da cobertura do pátio de compostagem. São Domingos do Sul, RS, 2003.

O revolvimento dos tratamentos 1 e 3 ocorreu a cada duas semanas, e o mesmo foi executado de forma manual com o auxílio de pás (Figura 15). Esse processo durou 121 dias.



Figura 15 - Revolvimento da leira de compostagem. São Domingos do Sul, RS, 2003.

3.3.1 Montagem das leiras

Cada leira foi montada com o material proveniente da triagem da coleta realizada em uma semana. Com isso se conseguiu montar leiras com 1.700 kg de material em base úmida, e umidade inicial média de 68,9 %. As leiras foram montadas de forma

prismática, com 1,5 metros de altura e a base com 2,0 metros (Figura 19), sendo possível somente implantar um tratamento por semana, seguindo a ordem descrita no item 3.3.

Com a preocupação ambiental, para coletar de forma segura o lixiviado nos tratamentos dispostos em ambiente coberto e descoberto, as leiras foram dispostas sobre uma manta de PEAD (polietileno de alta densidade), com 1 mm de espessura (Figura 16). Este material apresenta uma boa resistência às perfurações, as quais poderiam ocorrer durante o revolvimento como consequência do atrito da pá com o material e a manta.



Figura 16 - Leira de compostagem montada sobre a manta impermeável. São Domingos do Sul, RS, 2003.

Os RSD das leiras descobertas apresentam características quanto ao tipo de material, volume e forma de disposição semelhantes ao resíduo utilizado nas leiras cobertas. As leiras externas tiveram que ser montadas sobre um estrado de madeira, para facilitar a condução e captação do lixiviado (Figura 17).

Sobre o estrado de madeira, que foi obtida de reflorestamento, foi colocada uma manta de polietileno da alta densidade (PEAD), mas somente nas leiras revolvidas. Nas leiras sem revolvimento, foi utilizada uma manta de policloreto de vinila (PVC), por esta ter um custo menor, já que não há necessidade de evitar o efeito do atrito da manta com as ferramentas, pois nestes tratamentos não houve revolvimento.



Figura 17 - Montagem de leira de compostagem descoberta - LREV-DESCOB. São Domingos do Sul, RS, 2003.

3.3.2 Controle da temperatura

Foi efetuado o monitoramento diário da temperatura, em todos os tratamentos, com coleta dos dados entre 8:30 e 9:00 horas. O monitoramento foi efetuado com termômetro digital, com haste metálica (Figura 18).



Figura 18 - Termômetro digital com haste metálica. São Domingos do Sul, RS, 2003.

A haste metálica foi introduzida na leira em três pontos diferentes (Figura 19). Na ponta inferior da haste metálica existe um sensor de temperatura, o qual foi posicionado nas profundidades indicadas na Figura 19.

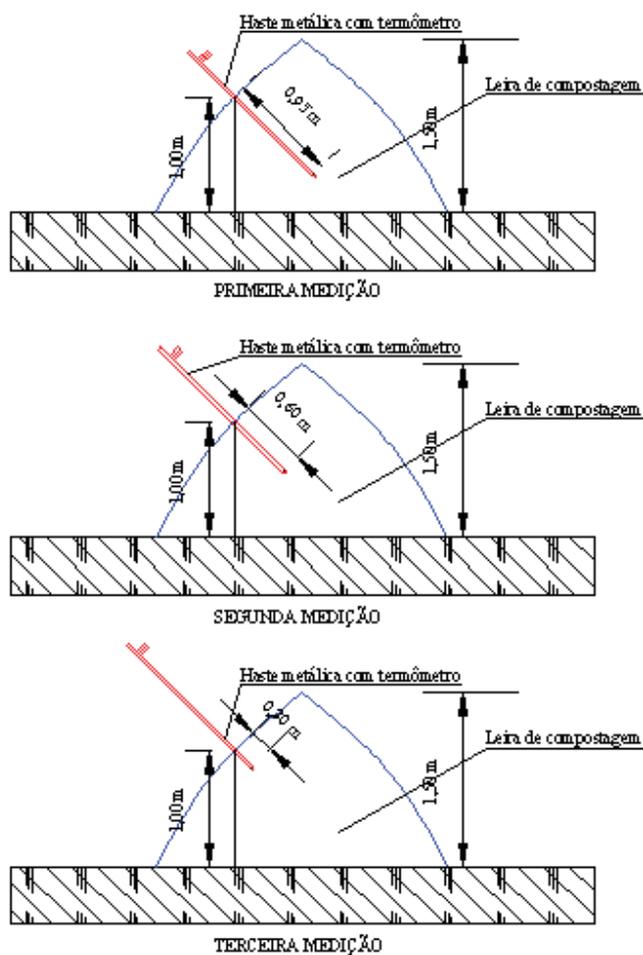


Figura 19 - Esquema de introdução da haste. São Domingos do Sul, RS, 2003.

3.3.3 Controle da umidade

O controle de umidade foi executado semanalmente com a coleta de uma amostra em cada leira. Esta amostra foi retirada a 0,20 metros da superfície e em dois pontos de cada leira e misturados (Figura 20). A análise da umidade foi realizada em laboratório, com a utilização de estufa a uma temperatura de 105 °C por um período de 24 horas. Foi adicionada água no processo para manter o material das leiras com umidade próxima de 55%. A adição de água nas leiras com revolvimento foi executada no momento deste. Nas leiras sem revolvimento, a adição da água foi feita com cuidado para que não ocorresse escoamento superficial. Nas leiras descobertas não foi acrescentada água, pois estas estavam sujeitas ao regime de chuvas.



Figura 20 - Coleta das amostras para envio ao laboratório.

3.3.4 Coleta e análise do lixiviado

Na montagem das leiras externas foi instalado um sistema de captação do lixiviado individual para cada uma delas (Figura 21). O material foi coletado após a primeira chuva, após 60 dias do início do processo e no final do experimento. A coleta foi feita com recipiente adequado e encaminhado ao laboratório onde o material foi submetido à análise de microorganismos patogênicos e determinação de parâmetros físico-químicos como DQO, DBO₅, sólidos suspensos, sólidos totais, nitrogênio total, fósforo total, condutividade elétrica e pH, conforme a metodologia descrita no Standard Methods (APHA, 1998).

3.3.5 Carbono orgânico, nitrogênio e relação carbono:nitrogênio

Para a determinação do carbono orgânico se utilizou a metodologia de Walkley Black, conforme descrita em Tedesco et al. (1995), que se constitui em método de combustão úmida. Este método se baseia na redução do dicromato (Cr₂O₇) pelos compostos de carbono orgânico do composto, sendo o excedente não reduzido determinado por titulação de oxi-redução com Fe₂ (adotado no trabalho) ou por colorimetria. Os teores de N foram determinados conforme a IN n° 28/2007 (BRASIL, 2007).

A relação C:N é calculada pela divisão dos resultados, expressos em porcentagem de carbono orgânico e de nitrogênio. Esta relação é feita com as amostras em base seca.



Figura 21 - Sistema de coleta e armazenamento do lixiviado.

3.3.6 Análise do composto

Após o término da compostagem, o produto final foi submetido à análise laboratorial para a determinação quantitativa de coliformes fecais e totais, salmonella sp além dos teores de macronutrientes e dos valores de pH e umidade.

3.3.7 Balanço de massa

A massa inicial de RSD em cada leira foi de 1.700 kg, com umidade de 68 %, correspondendo a 1011,9 kg de massa seca.

Após a finalização da compostagem, o material dos tratamentos LREV-COB e LNREV-COB foram tamisados na peneira ilustrada na Figura 12, para pesagem do material passante e cálculo do balanço de massa. O material passante, ou composto, correspondeu ao material que passou nas peneiras com o diâmetro de 5 mm e de 10 mm.

3.3.8 Outras análises

Além da análise da temperatura, da umidade e do lixiviado, ainda foram efetuadas as análises para determinação de pH em H₂O e em CaCl₂, do teor de matéria orgânica utilizando os métodos de combustão seca e de Walkley-Black (Carbono orgânico), dos teores dos macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg) conforme a IN n° 28/2007

(BRASIL, 2007). Para estas análises se utilizou o material em compostagem, o mesmo utilizado para a análise da umidade.

Os resultados obtidos foram comparados com os parâmetros estabelecidos para fertilizantes orgânicos, conforme a IN n° 27/2006 e IN n° 25/2009 do MAPA (BRASIL, 2006; 2009). Os parâmetros analisados do lixiviado foram comparados com os valores máximos admitidos na Resolução 357/2005 do CONAMA (BRASIL, 2005). As médias dos tratamentos foram comparadas utilizando-se a Análise de Variância (ANOVA), e o teste de Tukey, com nível de significância de 5%. As análises foram efetuadas com o auxílio do software Minitab.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após 121 dias da montagem da primeira leira (LREV-COB), o experimento foi finalizado. A leira do tratamento LNREV-DESCOB, última a ser montada, foi monitorada por 107 dias. Durante este tempo, o monitoramento da temperatura foi feito todos os dias da semana. Além da temperatura, houve o monitoramento da umidade, do pH e do carbono orgânico e de outras variáveis físico-químicas, de microrganismos enteropatogênicos e do desempenho de cada tratamento, com frequência menor que o monitoramento diário da temperatura, e que consta a seguir.

4.1 Temperatura

Os valores de temperatura das leiras constam na Figura 22, onde foi plotada a média das três profundidades de leitura das leiras. Como ilustrado na figura 22, os valores de temperatura dos tratamentos LREV-COB e LNREV-COB foram, em geral, maiores que os obtidos nos demais tratamentos. O tratamento LREV-COB proporcionou o maior número de dias com valores de temperatura correspondente a faixa termófila, representando um percentual de 14,84 % dos dias com valores maiores que 65°C. Isso se deve ao revolvimento que possibilita maior atividade microbiana e, conseqüentemente, maior temperatura (KIEHL, 2002).

Tabela 1 – Percentual do número de dias em que os valores de temperatura das leiras de compostagem revolvidas (LREV), e não revolvidas (LNREV), em ambiente coberto (COB), e ambiente descoberto (DESCOB), permaneceram em diferentes faixas.

Temperatura	Anova (Valor P)	LREV- COB	LNREV- COB	LREV- DESCOB	LNREV- DESCOB
< 45°	0,059 (NS)	8,20a	0,83a	10,53a	55,61a
45° a 55°	0,173 (NS)	25,39a	26,86a	53,51a	38,79a
55° a 65°	0,002 (S)	51,56bc	58,68c	35,96b	5,61a
> 65°	0,003 (S)	14,84b	13,64b	0,00a	0,00a

*As médias seguidas pela mesma letra na mesma linha não diferem de acordo com o teste de Tukey ($\alpha = 0.05$).

** S e NS – efeitos significativos e não significativos respectivamente, observados entre tratamentos ($\alpha = 0.05$).

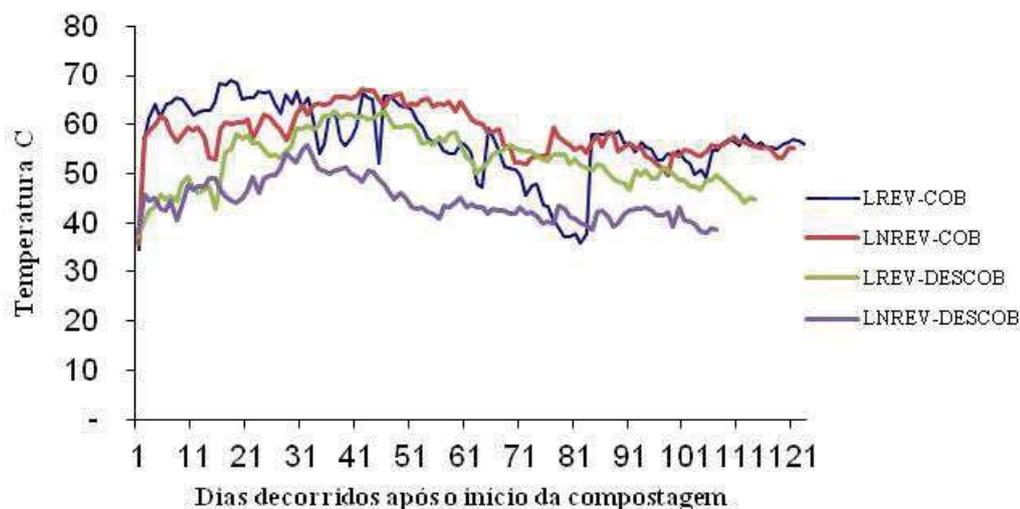


Figura 22 - Valores de temperatura das leiras de compostagem de resíduos sólidos domiciliares tratados com revolvimento (LREV) e sem revolvimento (LNREV) em ambiente coberto (COB) e descoberto (DESCOB), ao longo dos dias de compostagem. São Domingos do Sul, 2003.

A fase inicial durou, em todos os tratamentos cerca de um dia (Tabela 1; Figura 22). Nos tratamentos LREV-DESCOB e LNREV-DESCOB, cerca de 7 e 8 % dos dias de compostagem, respectivamente, tiveram valores de temperatura menores que 45 °C, ao longo dos período do experimento, como esperado. Os tratamentos LREV-DESCOB e LNREV-DESCOB, foram os mais influenciados pelos fatores ambientais. Como a condução do experimento se deu parte na primavera e parte no verão, as temperaturas externas não tiveram muita variação, o que variou e influenciou foi a precipitação pluviométrica do período. Como as leiras não foram cobertas as temperaturas permaneceram um menor número de dias na faixa de 55 - 65 °C (3,3 e 1,9 %, respectivamente). Nestes tratamentos não ocorreram valores de temperatura maiores que 65 °C (Tabela 1). Isso se deve ao fato de que a temperatura é influenciada pela umidade e aeração (BIDONE, 1999).

4.2 Umidade

Os valores médios da umidade nos tratamentos constam na Tabela 2. O tratamento LNREV-DESCOB manteve a umidade mais alta e estável, pois ficou sujeito

a incidência das chuvas. O tratamento LREV-DESCOB também ficou exposto às chuvas, porém devido ao revolvimento a umidade baixou logo no primeiro revolvimento. O excesso de umidade de um material em compostagem pode ser diminuído pelo revolvimento freqüente (KIEHL, 2002). Nos tratamentos que possibilitaram a umidade se manter por um maior período dentro das faixas ótimas recomendadas para a compostagem, verificou-se que a temperatura também se manteve mais alta. Quanto maior a umidade do composto, menor a temperatura, com baixa perda por evaporação e menor atividade microbiana. A umidade média no tratamento LREV-COB foi de 53 %; nas LNREV-COB foi de 57 %; nas LREV-DESCOB foi de 50 % e no tratamento LNREV-DESCOB foi de 62 %. Segundo Bidone (1999), a umidade indicada para que a compostagem ocorra de forma eficiente é de 55 %.

Tabela 2 – Umidade das leiras de compostagem revolvidas (LREV), e não revolvidas (LNREV), em ambiente coberto (COB), e ambiente descoberto (DESCOB), levantada semanalmente.

Dias	Anova (Valor P)	LREV- COB	LNREV- COB	LREV- DESCOB	LNREV- DESCOB
7 a 9	0,012 (S)	62,65ab	68,43b	60,84ab	54,60a
14 a 16	0,007 (S)	59,05b	60,39b	28,58a	56,94b
21 a 24	0,206 (NS)	56,07a	49,45a	51,87a	71,58a
28 a 30	0,003 (S)	18,87a	44,94b	68,63b	66,40b
35 a 37	0,365 (NS)	61,80a	69,97a	54,88a	65,00a
42 a 45	0,610 (NS)	48,02a	58,19a	54,46a	67,64a
49 a 50	0,016 (S)	52,41a	66,48b	67,16b	69,71b
56 a 57	0,138 (NS)	39,54a	63,72a	60,13a	59,89a
63 a 64	0,695 (NS)	57,47a	54,23a	50,00a	60,63a
70 a 71	0,026 (S)	53,70ab	36,90a	37,64a	67,88b
76 a 79	0,041 (S)	42,85a	59,15ab	54,33ab	67,58b
83 a 85	0,432 (NS)	66,02a	58,10a	49,61a	54,02a
91	0,517 (NS)	49,82a	59,41a	52,56a	60,40a
98 a 99	0,125 (NS)	56,09a	63,33a	33,19a	59,44a
105 a 106	0,006 (S)	62,04b	54,01b	35,52a	60,93b
112 a 113	0,006 (S)	---	62,79b	40,47a	---

*As médias seguidas pela mesma letra na mesma linha não diferem de acordo com o teste de Tukey ($\alpha = 0.05$).

** S e NS – efeitos significativos e não significativos respectivamente, observados entre tratamentos ($\alpha = 0.05$).

Na Tabela 3 consta o volume de adição de água nos tratamentos LREV-COB e LNREV-COB, necessária para manter a umidade próxima da faixa dos 55 %, conforme recomendado por Bidone (1999) e Kiehl (2002). Como mostram os resultados dessa tabela, a adição de água no tratamento LREV-COB foi um pouco maior que a do

tratamento LNREV-COB. Isso se deve ao revolvimento, que propicia maior evaporação de água do material compostado. Os resultados da Tabela 2 mostram ainda que a evolução da umidade ao longo do tempo com adição de água, se manteve próxima da faixa ideal, no tratamento LREV-COB.

Tabela 3 – Volume de água adicionada nas leiras de compostagem revolvidas (LREV), e não revolvidas (LNREV), em ambiente coberto (COB), ao longo dos dias de compostagem.

Dias	LREV-COB		LNREV-COB	
	L.dia ⁻¹	Volume	L.dia ⁻¹	Volume
30 a 35	20	120	20	120
43 a 47	60	300	60	300
48 a 59	20	240	20	240
60 a 61	100	200	20	40
62 a 79	20	360	20	360
80 a 81	100	200	50	100
82 a 123	20	840	20	840
	Total	2,26 m ³	Total	2,00 m ³

4.3 Potencial hidrogeniônico

O valor de potencial hidrogeniônico (pH em H₂O) da fração putrescível dos RSD, das amostras analisadas antes da compostagem, foi de 5,6. Os resultados da Tabela 4 mostram que os valores de pH em solução de CaCl₂ a 0,01mol.L⁻¹ nos primeiros sete dias de compostagem foram baixos (4,32 a 4,72), em todos os tratamentos. Nas semanas seguintes, os valores de pH foram maiores, estabilizando em valores próximos a 8,0, após 44 dias de compostagem e até o final desse processo.

A elevação do pH está diretamente relacionado com a atividade dos microorganismos, da temperatura e da umidade. A passagem para a fase termófila é acompanhada de rápida elevação do pH, que se explica pela hidrólise das proteínas e liberação de amônia (FERNANDES e SILVA, 1996). No tratamento LNREV-DESCOB, a elevação dos valores de pH levou um tempo maior, o que é devido ao valor de temperatura baixa e a maior umidade deste tratamento.

De acordo com a Instrução Normativa n^o 25/2009, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento do governo brasileiro (MAPA), o valor de pH, em compostos de resíduos orgânicos utilizados como fertilizantes, deve ser maior 6,5 para compostos da classe C (BRASIL, 2009). De acordo com a Tabela 4 os resultados atendem os

valores mínimos da IN referida em todos os tratamentos a partir de 44 dias do início da compostagem.

Tabela 4 – Valor de pH em solução de CaCl_2 mol.L⁻¹ das leiras de compostagem revolvidas (LREV), e não revolvidas (LNREV), em ambiente coberto (COB), e ambiente descoberto (DESCOB), levantada a cada duas semanas.

Dias	Anova (Valor P)	LREV- COB	LNREV- COB	LREV- DESCOB	LNREV- DESCOB
7	0,481 (NS)	4,54a	4,72a	4,55a	4,32a
14	0,015 (NS)	6,39a	6,76a	5,21a	5,84a
28	0,015 (NS)	6,12a	8,18a	8,49a	7,28a
44	0,083 (NS)	7,91a	7,95a	8,64a	8,04a
56	0,499 (NS)	8,61a	8,29a	8,01a	7,94a
70	0,394 (NS)	7,99a	8,41a	8,13a	8,05a
84	0,202 (NS)	8,03a	8,33a	7,84a	7,51a
98	0,113 (NS)	8,55a	8,52a	7,78a	7,25a
112	0,015 (S)	8,00a	7,77a		

*As médias seguidas pela mesma letra na mesma linha não diferem de acordo com o teste de Tukey ($\alpha = 0.05$).

** S e NS – efeitos significativos e não significativos respectivamente, observados entre tratamentos ($\alpha = 0.05$).

4.4 Teor de carbono orgânico, de nitrogênio e relação carbono:nitrogênio

Os valores apresentados na Tabela 5 mostram que o teor de carbono orgânico nas leiras de compostagem foram semelhante entre os tratamentos testados e decresceram gradativamente, ao longo do tempo de compostagem .

Tabela 5 – Carbono orgânico de leiras de compostagem revolvidas (LREV) e não revolvidas (LNREV), em ambiente coberto (COB), e ambiente descoberto (DESCOB), determinado a cada duas semanas.

Semanas	Anova (Valor P)	LREV- COB	LNREV- COB	LREV- DESCOB	LNREV- DESCOB
2 ^a	0,553 (NS)	41,52a	43,85a	37,59a	43,51a
4 ^a	0,048 (NS)	39,94a	39,84a	40,77a	47,80a
6 ^a	0,557 (NS)	36,61a	38,92a	36,79a	39,08a
8 ^a	0,651 (NS)	35,16a	34,26a	30,17a	30,56a
10 ^a	0,088 (NS)	30,93a	30,57a	33,39a	36,82a
12 ^a	0,922 (NS)	30,27a	32,20a	29,86a	31,18a
14 ^a	0,115 (NS)	31,42a	28,79a	28,85a	32,89a
16 ^a	0,210 (NS)	27,71a	21,54a		

*As médias seguidas pela mesma letra na mesma linha não diferem de acordo com o teste de Tukey ($\alpha = 0.05$).

** S e NS – efeitos significativos e não significativos respectivamente, observados entre tratamentos ($\alpha = 0.05$).

O valor final de carbono orgânico em todos os tratamentos atende o valor mínimo exigido pela IN n° 25/2009 que deve ser maior ou igual a 15 (BRASIL, 2009).

Quanto aos teores de nitrogênio, os valores apresentados na Tabela 6 tiveram pouca variação, principalmente, na LREV-COB. Isso é um indicativo que a compostagem ocorreu sem odores indesejáveis causados pela liberação de amônia, comum quando o teor de N é elevado e a relação C:N é muito baixa (KIEHL, 1985; FERNANDES e SILVA, 1996; BIDONE, 2001).

Tabela 6 – Nitrogênio total das leiras de compostagem revolvidas (LREV), e não revolvidas (LNREV), em ambiente coberto (COB), e ambiente descoberto (DESCOB), levantado a cada duas semanas.

Semanas	Anova (Valor P)	LREV- COB	LNREV- COB	LREV- DESCOB	LNREV- DESCOB
2 ^a	0,113 (NS)	3,11a	2,46a	2,16a	3,99a
4 ^a	0,432 (NS)	2,80a	3,33a	2,58a	2,97a
6 ^a	0,583 (NS)	2,83a	3,09a	2,78a	2,48a
8 ^a	0,503 (NS)	3,13a	2,98a	2,64a	2,73a
10 ^a	0,471 (NS)	3,11a	2,84a	2,89a	3,09a
12 ^a	0,200 (NS)	3,03a	3,46a	2,80a	2,87a
14 ^a	0,285 (NS)	3,26a	2,74a	3,09a	3,22a
16 ^a	0,974 (NS)	3,12a	3,14a		

*As médias seguidas pela mesma letra na mesma linha não diferem de acordo com o teste de Tukey ($\alpha = 0.05$).

** S e NS – efeitos significativos e não significativos respectivamente, observados entre tratamentos ($\alpha = 0.05$).

O valor final do nitrogênio total em todos os tratamentos atende o valor mínimo exigido pela IN n° 25/2009 que deve ser maior ou igual a 0,5% (BRASIL, 2009).

A relação C:N inicial de amostra de material coletado antes de iniciar a compostagem foi de 23:1. Este valor ficou próximo do valor considerado alto, onde o tempo de compostagem pode ser maior (BIDONE, 2001; KIEHL, 2002). Porém a avaliação na segunda semana, conforme a Tabela 7, já apresentaram valores considerados dentro da faixa ótima para o bom desenvolvimento da compostagem. O valor final da relação C:N em todos os tratamentos atende o valor mínimo exigido pela IN n° 25/2009 que deve ser menor ou igual a 20 (BRASIL, 2009).

Tabela 7 – Relação Carbono:Nitrogênio das leiras de compostagem revolvidas (LREV), e não revolvidas (LNREV), em ambiente coberto (COB), e ambiente descoberto (DESCOB), levantado a cada duas semanas.

Semanas	LREV-COB	LNREV-COB	LREV-DESCOB	LNREV-DESCOB
2 ^a	13,35	17,83	17,44	10,90
4 ^a	14,26	11,98	15,80	16,12
6 ^a	12,96	12,61	13,26	15,79
8 ^a	11,23	11,51	11,45	11,21
10 ^a	9,94	10,76	11,57	11,91
12 ^a	10,01	9,30	10,68	10,88
14 ^a	9,64	10,51	9,33	10,23
16 ^a	8,88	6,87		

4.5 Atributos físico-químicos do lixiviado

Para a análise físico química em laboratório do lixiviado, esse foi coletado 60 dias após o início da compostagem sob as leiras descobertas (LREV-DESCOB e LNREV-DESCOB), pois aquelas em ambiente coberto (LREV-COB e LNREV-COB) não geraram lixiviado, impossibilitando a coleta.

Os resultados da Tabela 8 indicam elevados valores das variáveis analisadas, principalmente de DBO₅ e de DQO.

Tabela 8 – Análise físico-química do lixiviado das leiras de compostagem revolvidas (LREV), e não revolvidas (LNREV), e ambiente descoberto (DESCOB).

ITEM	Unidade	LREV-DESCOB	LNREV-DESCOB
DQO	mg.L ⁻¹ O ₂	55.772	54.329
DBO ₅	mg.L ⁻¹ O ₂	22.070	25.057
Sólidos suspensos	mg.L ⁻¹	950	2.100
Sólidos totais	mg.L ⁻¹	44.250	35.300
Nitrogênio total	mg.L ⁻¹	1.519	2.229
Fósforo total	mg.L ⁻¹	>6	>6
Condutividade elétrica	MS.cm ⁻¹	12,8	13,14
pH		5,42	5,20

De acordo com os dados da Tabela 8, podemos verificar os altos valores de DQO e DBO₅. Segundo Lima (1991) a média encontrada de DBO₅ no lixiviado de lixões é por volta de 10.000 mg.L⁻¹ O₂, enquanto que o valor médio dos tratamentos LREV-DESCOB e LNREV-DESCOB ficou acima de 22.000 mg.L⁻¹ O₂. Todos os indicadores analisados apresentam valores acima dos estabelecidos pela Resolução do CONAMA 430/2011 que dispõe sobre os padrões de lançamento de efluentes (BRASIL, 2011). A

carga orgânica tem alto valor de concentração pois a área de contribuição se restringe a área superficial da leira, não tem nenhuma contribuição das áreas no entorno. O volume gerado não foi medido e nem o volume de chuvas no período. Existe um sistema de tratamento conforme a Figura 13.

4.6 Enteropatogênicos no lixiviado e nas leiras de compostagem

As análises de microorganismos enteropatogênicos no lixiviado foram feitas com o objetivo de verificar a ocorrência desses 60 dias após o início da compostagem (Tabela 9).

Tabela 9 – Análise dos patogênicos do lixiviado das leiras de compostagem revolvidas (LREV), e não revolvidas (LNREV), e ambiente descoberto (DESCOB).

Item	Unidade	LREV- DESCOB	LNREV- DESCOB
Coliformes fecais	NMP/g	$>2,4 \times 10^4$	$>2,4 \times 10^4$
Coliformes totais	NMP/g	$>2,4 \times 10^4$	$>2,4 \times 10^4$
Salmonella sp	25 g	presente	presente

Os valores de coliformes fecais, totais e salmonella não se configuram em um dado muito importante em se tratando de lixiviado, os parâmetros mais importante e que merecem preocupação são a DBO E DQO, pela grande carga orgânica característica do lixiviado (TORRES et al., 1997).

Tabela 10 – Análise dos patogênicos no material sólido das leiras de compostagem revolvidas (LREV), e não revolvidas (LNREV), em ambiente coberto (COB), e ambiente descoberto (DESCOB).

Item	Unidade	LREV- COB	LNREV- COB	LREV- DESCOB	LNREV- DESCOB
Coliformes fecais	NMP/g	$>2,4 \times 10^3$	$>2,4 \times 10^4$	$>2,4 \times 10^3$	$>2,4 \times 10^3$
Coliformes totais	NMP/g	$>2,4 \times 10^4$	$>2,4 \times 10^4$	$>2,4 \times 10^3$	$>2,4 \times 10^3$
Salmonella sp	25 g	ausente	ausente	presente	presente

No final do processo foi feita a análise de *coliformes fecais*, *totais* e *salmonella sp* no composto final. Nos tratamentos LREV-DESCOB e LNREV-DESCOB a *salmonella sp* se mostrou presente. Segundo Escosteguy et al. (1993), em trabalho realizado com lixo domiciliar, o tempo em que a temperatura no tratamento permanece com valores acima de 65 °C determina a ausência de *salmonella sp*, pela Tabela 1,

podemos verificar que os tratamentos LREV-COB e LNREV-COB permaneceram 14,84 % e 13,64 % dos dias com temperaturas acima dos 65 °C respectivamente e os tratamentos LREV-DESCOB e LNREV-DESCOB não tiveram nenhum dia com este valor de temperatura. Pelo tempo com que os valores da temperatura permaneceram acima dos 65 °C, a *Salmonella* sp se mostrou ausente nos tratamentos leiras revolvidas (LREV) e leiras não revolvidas (LNREV) em ambiente coberto (COB) atendendo a IN n° 27, de 5 de julho de 2006, já os tratamentos leiras revolvidas (LREV) e leiras não revolvidas (LNREV) em ambiente descoberto (DESCOB) não atendem a referida IN (BRASIL, 2006)(Tabela 10). Quanto aos valores de coliformes fecais e totais o composto não atende a IN 27/2006 (BRASIL,2006).

4.7 Qualidade do composto em atendimento a IN n° 25/2009

Tabela 11 – Teor de carbono orgânico (C), de nitrogênio total (N), da relação carbono:nitrogênio (C:N) e valores de pH em solução de CaCl₂ mol/L⁻¹ e de umidade (Ug), macro e micronutrientes de compostos orgânicos obtidos em diferentes tratamentos de compostagem de resíduos sólidos domiciliares.

Atributo ¹	LREV-COB	LNREV-COB	LREV-DESCOB	LNREV-DESCOB	Valores máximos admitidos ²
C %	27,71	21,54	30,52	30,97	≥ 15
N %	3,12	3,14	3,03	3,08	≥ 0,5
C:N	8,88	6,87	10,09	10,05	≤ 20
pH	8,0	7,77	7,78	7,25	≥ 6,5
Ug (%)	53	57	50	62	≤ 50
P (%)	0,62	0,64	0,60	0,68	Conforme declarado
K (%)	1,83	1,64	1,53	1,26	Conforme declarado
Ca (%)	5,37	5,40	3,9	5,25	≥ 1
Mg (%)	0,31	0,32	0,32	0,27	≥ 1

¹Valores expressos em base seca, umidade determinada a 65 °C. ²Instrução Normativa n° 25/2009 (BRASIL, 2009).

Os resultados da Tabela 11 indicam que os teores de carbono, nitrogênio, umidade e o valor do potencial hidrogeniônico atendem o que determina a IN n° 25/2009 para fertilizantes orgânicos da classe "C". Quanto ao teor de cálcio o mesmo atende o teor total mínimo em percentual. O valor de magnésio esta abaixo dos valores mínimos exigidos pela IN n° 25/2009. A umidade verificada no último dia de compostagem em cada um dos tratamentos foi maior que o valor admitido, porém com valores muito próximos dos admitidos (BRASIL, 2009).

4.8 Balanço de massa

No final da compostagem foi realizado o peneiramento do material dos tratamentos LREV-COB e LNREV-COB. Foi utilizada a peneira rotativa descrita na Figura 12. O material inicial do material de cada leira foi de 1700 kg em base úmida.

Tabela 12 – Balanço de massa das leiras de compostagem revolvidas (LREV), e não revolvidas (LNREV), em ambiente coberto (COB).

Tratamentos	Repetição 1 kg	Repetição 2 kg	% Final	Massa seca kg
LREV-COB	712	663	40	445
LNREV-COB	620	613	36	387

Conforme a Tabela 12, o valor final do percentual do balanço de massa foi de 40 % nas LREV-COB e de 36% nas LNREV-COB. Este valor poderia ser maior, porém pelo fato de que a separação na origem não ter sido conduzida de forma correta, ou seja, muito material inerte, ou de difícil decomposição (Figura 11), no momento da peneiração boa parte da matéria orgânica ficou aderida a estes materiais grosseiros e não passou na peneira.

5 CONCLUSÕES

Diante dos objetivos propostos neste trabalho, ficou evidenciado claramente que os tratamentos em ambiente coberto ficaram mais fáceis de serem conduzidos pois não existe a interferência direta dos fatores climáticos como a incidência de chuvas e o excesso de sol, exige porém um controle rigoroso quanto a adição de água no sistema.

Quanto ao atendimento dos parâmetros do MAPA, todos os tratamentos se mostraram eficientes ficando dentro do estabelecido pela IN 25/2009 em se tratando de carbono orgânico, nitrogênio total, relação carbono:nitrogênio, potencial hidrogeniônico e umidade.

Importante diferença entre os tratamentos é a questão da temperatura onde o tratamento leira revolvida coberta (LREV-COB) apresentou um maior período dentro da fase termófila fazendo com que se eliminem mais facilmente os organismos enteropatogênicos, e, pelo revolvimento, o tratamento se mostrou eficiente como pode ser comprovado pelo balanço de massa.

A principal contribuição do ponto de vista ambiental, é que nos tratamentos em ambiente coberto não houve a geração de lixiviado, fazendo com que o impacto ambiental seja minimizado. De forma econômica é muito dispendioso o tratamento deste lixiviado pela grande carga poluente presente nele. Desta forma chegamos a conclusão que o sistema de compostagem de resíduos sólidos domiciliares em ambiente coberto se configura em uma ação sustentável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Norma Técnica. NBR 10.004:2004 - **Resíduos sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

APHA-AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, **Standard Methods for Examination of Water and Wastewater**. 20th Edition. Washington, DC. APHA/AWWA/WPCF.1998.

ARAÚJO, P. S. F. **A ocupação urbana do entorno de zonas de proteção ambiental de Natal, suas condições de sustentabilidade e a relação com a ocorrência de insetos vetores**. Natal, RN, 2009.

BIDONE, F. R. A. **Experiências em valorização de resíduos sólidos**. In: Resíduos Sólidos provenientes de coletas especiais: reciclagem e disposição final / Francisco Ricardo Andrade Bidone (Coodernador). - Rio de Janeiro: Rima, ABES, 2001.

BIDONE, F. R. A. ; POVINELLI, J. **Conceitos básicos de resíduos sólidos**. 1^a ed. São Carlos-SP: EESC/USP - São Carlos-SP, 1999. v. 1. 109 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº 27, de 5 de junho de 2006. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 09 de junho de 2006**. Seção 1, pag. 12.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº 28, de 27 de julho de 2007. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 31 de julho de 2007**. Seção 1, p. 11.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº 25, de 23 de julho de 2009. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 28 de julho de 2009**. Seção 1, p. 20.

BRASIL. **Lei n.º 12.305, de 02 de agosto de 2010. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 03 de agosto de 2010**. Seção 1, p. 3.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília, DF, 16 de maio de 2011**. Seção 1, p. 89.

CALDERONI, S. **Os Bilhões Perdidos no Lixo**. 3^a ed., São Paulo: Humanitas Editora/FFLCH/USP, 1999

CERRI, C.E.P.; OLIVEIRA, E.C.A.; SARTORI, R.H.; GARCEZ, T.B. **Compostagem**. Apostila da disciplina de matéria orgânica do solo. ESALQ, Piracicaba, SP. 2008.

ESCOSTEGUY, P.A.V.; PARCHEN, C.A.P.; SELBACH, P.A. Bactérias enteropatogênicas em compostos de lixo domiciliar, solo e planta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Campinas-SP. n° 17 pag. 365 a 369. 1993.

FERNANDES, Fernando; SILVA, Sandra Márcia Cesário Pereira da. **Manual prático para compostagem de biossólidos**. UEL - Universidade Estadual de Londrina. Londrina PR. 1996.

GOTAAS, H.B. **Composting: Sanitary Disposal and Reclamation of Organic Wastes**. Geneva, World Health Organization. 1956

GORGATI, C. Q.; JÚNIOR, J. L. Produção de chorume durante o processo, nas estações de verão e inverno, em área de proteção de mananciais. **VI Simpósio Italo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Vitória-ES. 2002.

JIMÉNEZ, E. I. e GARCÍA, V. P. **Instituto de Productos Naturales y Agrobiología de Canarias CSIC**. Avda. Francisco Sanchez 3, 38206 La Laguna, Tenerife, Canary Islands, Spain .Accepted 4 July 1991. Available online 24 June 2003.

KIEHL, E. J. **Fertilizantes orgânicos**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1985.

KIEHL, E. J. **Manual de Compostagem: Maturação e qualidade do composto**. Piracicaba/SP: Ed. Agronômica Ceres. 4^a ed., 2002.

KRIEGER, K.I. **Informações sobre Compostagem. Projeto Solo Planta - Curso de Agronomia da UFPR**. Disponível em: soloplan@agrarias.ufpr.br. (acessado em: 11/12/03).

KÜHR, A.K.; MÜLLER, R. **A simple and effective system for biological waste treatment and composting**. Proceedings Sardinia 99, Seventh International Waste Management and Landfill Symposium S. Margherita di Paula, Italy; 4-8 October 1999. Environmental Sanitary Engineering Centre, Cagliari, Italy.

KUTER, G. A. (coordenador). **Biosolids composting** . Water Environmental Federation, Alexandria,VA, 187 p., 1995.

LIMA, L. M. Q. **Tratamento de Lixo**. São Paulo: Hemus Editora Ltda, 1991.

MARQUES, M.; HOGLAND, W. **Processo descentralizado de compostagem em pequena escala para resíduos sólidos domiciliares em áreas urbanas**. XXVII Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Cancún, México, 27 al 31 de octubre de 2002.

MELO, M.C.; MONTEIRO, V.E.D.; NEVES, M.L.; ARAÚJO, J.M. & JUCÁ, J.F.T. Estudos de Toxicidade em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos. **Revista Biotecnologia**. Ano V, Setembro/Outubro 2002.

MOTA, Suetônio. **Introdução à Engenharia Ambiental**. Rio de Janeiro: ABES, 2003.

NASCIMENTO, A. M.; COSTA K.; RIEHL L. A. S. R.; SANTOS Z. A. M. **Reciclagem de lixo e química verde**. Curso de formação continuada, ciências da natureza, matemática e suas tecnologias. Secretaria da educação do estado do Rio de Janeiro, 2005.

PARCHEN, C.A.P.; ESCOSTEGUY, P.A.V.; SELBACH, P.A. Distribuição da temperatura em leiras de compostagem de lixo urbano. **BIO - Revista brasileira de saneamento e meio-ambiente**. Caderno técnico. p. 58-59. 1990.

PARCHEN, C.A.P. **Condução, monitoração e avaliação do processo de compostagem natural de lixo urbano**. 1988. Dissertação de Mestrado UFRGS, Porto Alegre. 1988. p. 131.

PEIXOTO, J. O. **Destinação final de resíduos, nem sempre uma opção econômica**. Engenharia Sanitária, (1): 15-18, 1981.

PEREIRA NETO, J.T. **Avaliação do desempenho de três modos de aeração para sistemas de compostagem em pilhas**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 14°. São Paulo. Anais: p. 146-163. 1987.

PEREIRA NETO, J.T. **Composting: Experiences and Perspectives in Brazil**. In: European Commission International Symposium, Blackie Academic & Professional, 1996. Anais. England, v. 2, p 729-735.

PHILIPPI JR A. Agenda 21 e resíduos sólidos. São Paulo, SP. In: **Anais do RESID'99 - Seminário sobre Resíduos Sólidos**; ABGE, 1999. p. 15-25.

REICHERT, G.A. **A vermicompostagem aplicada ao tratamento de lixiviado de aterro sanitário**. 1999. Dissertação (Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1999.

SANTOS, F.G.dos; ESCOSTEGUY, P.A.V; RODRIGUES, L.B. Qualidade de esterco de ave poedeira submetido a dois tipos de tratamento de compostagem. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**. v. 14, n. 10, p. 1101 - 1108. Campina Grande, PB. 2010.

SILVA, A. C. **Tratamento do Percolado de Aterro Sanitário e avaliação da Toxicidade**. Rio de Janeiro 2002. Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

SILVA, A. G.; LEITE, V.D.; SILVA, M.M.P.; PRASAD, S.; FEITOSA, W.B. Compostagem aeróbia conjugada de lodo de tanque séptico e resíduos sólidos vegetais. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 13, n. 4 – out/dez de 2008. P. 371-379.

SOCCOL, V. T. et al . **Eficácia dos diferentes processos de tratamento do lodo na redução de viabilidade de ovos de Helminthos**. SANARE, Curitiba – Sanepar, v.8, n.8, p. 24-32, 1997.

TEIXEIRA, L. B.; GERMANO, V. L. C.; OLIVEIRA, R. F. de; JÚNIOR, J. F. **Circular Técnica nº 33, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Embrapa.** ISSN 1517-211X, Belém, PA, 2004.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H. & WOLKWEISS, S.J. **Análises de solo, plantas e outros materiais.** 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico, 5)

TORRES, S.; ASPÉ, E.; MATI, M. C. et al. **Differential bacterial growth kinetic and nitrification of fisheries wastewaters containing high ammonium and organic matter concentration by using pure oxygen.** Biotechnology Letters, v.19, n.3, p.241-244, 1997.

WERNER, M. **Using leachate on the Windrows.** Biocycle, p. 59-61, 1996.