

ED CARLO ROSA PAIVA

**AVALIAÇÃO DA COMPOSTAGEM DE CARÇAÇAS DE FRANGO PELOS
MÉTODOS DA COMPOSTEIRA E LEIRAS ESTÁTICAS AERADAS**

**Dissertação apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil da Universidade
Federal de Viçosa, como requisito parcial à
obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.**

**VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2008**

ED CARLO ROSA PAIVA

AVALIAÇÃO DA COMPOSTAGEM DE CARÇAÇAS DE FRANGO PELOS
MÉTODOS DA COMPOSTEIRA E LEIRAS ESTÁTICAS AERADAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

APROVADA: 14 de fevereiro de 2008.

Prof. Antonio Teixeira de Matos

Prof. Marcos Alves Magalhães

Prof^a. Maria Cristina Dantas Vanetti

Prof. Roberto Francisco de Azevedo

Prof^a. Mônica de Abreu Azevedo
(Orientadora)

A Deus, por tudo o que sou e o que tenho.

À minha filha Maria Grazia, minha esposa Nunziata e

meus irmãos, por tudo que eles representam em minha vida.

AGRADECIMENTOS

A professora Dra. Mônica de Abreu Azevedo, pela orientação deste trabalho e pela amizade.

Ao professor Dr. Antonio Teixeira de Matos do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV, pela co-orientação, amizade e pelo financiamento da pesquisa.

A professora Dra. Adriana Corrêa Guimarães, Universidade Européia Miguel de Cervantes, pelas valiosas contribuições na co-orientação deste trabalho.

Ao professor Dr. Marcos Magalhães do Centro universitário de CaratingaUNEC, Caratinga - MG, pela amizade e conselhos, além do empréstimo da maior parte das sondas usadas nos experimentos.

A pesquisadora da EMBRAPA - Suínos e Aves, Dra. Doralice Pedroso de Paiva, pelas informações prestadas e pela disponibilidade, durante a montagem e realização do experimento com a composteira.

A professora Dra. Maria Cristina Vanetti, Departamento de Microbiologia da UFV, pelas informações prestadas e pela disponibilidade, durante a realização das análises microbiológicas.

Ao Antônio Galvão do Nascimento, Departamento de Microbiologia da UFV, pela amizade e disponibilidade e, também, pelas informações prestadas, durante a realização deste trabalho.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Civil, em especial ao professor Eduardo, pela amizade, colaboração e ensinamentos. Ao professor Tinoco pelos ensinamentos e pela cessão de bibliografias de sua biblioteca particular. Em especial, aos funcionários do LESA-UFV, Geraldo “Capelão”, Júlio e Juliana, pela valiosa ajuda durante o desenvolvimento dos experimentos e da pesquisa bibliográfica.

Ao professor Dr. Sebastião Valadares, Departamento de Zootecnia da UFV, por ceder o equipamento usado na trituração das carcaças de frango.

Aos funcionários e alunos de graduação e pós-graduação do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV que direta, ou indiretamente contribuíram para a realização desse trabalho. Em especial, aos funcionários “Zé pequeno”, “Inhame”, Simão, Claudenilson e Amiltom e aos alunos, Tatiana, Múcio (Estagiários) e Débora Astoni, Reginaldo, Ednei (Pós-graduação).

Agradecimento especial à estudante de Engenharia Agrícola e Ambiental Renata Pereira de Barros pela sua valiosa contribuição ao longo de toda a pesquisa.

Ao Engenheiro Agrícola e Ambiental Francesco Miguel Valenza pela importante ajuda na concepção e construção do sistema de umedecimento implantado nos experimentos com aeração forçada.

A Capes, pela bolsa de estudo concedida.

A minha Esposa Nunziata pela contribuição na revisão deste trabalho.

Certamente esqueci de citar nomes de muitos que ajudaram neste “trabalho de equipe”, mas agradeço sinceramente a todos aqueles que direta ou mesmo indiretamente contribuíram para seu êxito.

“Os ideais são como as estrelas: nunca as alcançaremos.
Porém, assim como os marinheiros, em alto mar,
traçaremos nosso caminho
seguindo-as.”
(Jean Paul Sartre)

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xiii
RESUMO.....	xiv
ABSTRACT.....	xvi
1. INTRODUÇÃO.....	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 - Definição	22
2.2 - A Compostagem de Carcaça de Animais.....	23
2.3 - Classificação dos Processos de Compostagem	25
2.4 - Vantagens e Limitações do Processo	26
2.5. Microrganismos Associados a Compostagem	27
2.5.1. Bactérias.....	30
2.5.2. Fungos.....	31
2.5.3. Actinomicetos	32
2.5.4. Outros Organismos.....	33
2.6. Mudanças Durante a Compostagem.....	34
2.7. Principais Fatores que Afetam os Processos de Compostagem.....	41
2.7.1. Temperatura	42
2.7.2. Requerimento de Oxigênio/Taxa de Aeração	46
2.7.3. Conteúdo de Água	48
2.7.4. Nutrientes	49
2.7.5. Tamanho da Partícula.....	52
2.7.6. pH	53
2.8. Sistemas de Compostagem	54
2.8.1. Método da Composteira.....	54
2.8.2. Compostagem em Leiras.....	58
2.8.2.1. Processo “Windrow”	59

2.8.2.2. Sistema de Compostagem por Leiras Estáticas Aeradas	62
2.9. O Composto	66
2.9.1 Aspectos Qualitativos do Composto Orgânico Como Fertilizante.....	66
2.9.2. Aspectos Sanitários do Composto Orgânico	68
3. MATERIAIS E MÉTODOS	72
3.1. Primeira Etapa.....	73
3.2. Segunda Etapa.....	75
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	93
4.1. Método da Composteira	93
4.1.1. Requerimento de Oxigênio/Taxa de Aeração.....	93
4.1.2. Temperatura	93
4.1.3. Conteúdo de Água	97
4.1.4. pH	98
4.1.5. Sólidos Voláteis (SV)	101
4.1.6. Nutrientes	102
4.2. Leiras Estáticas Aeradas (LEAs).....	108
4.2.1 - Requerimento de Oxigênio/Taxa de Aeração.....	108
4.2.2. LEA 01	110
4.2.2.1. Temperatura.....	110
4.2.2.2. Conteúdo de Água	112
4.2.2.3. pH.....	115
4.2.2.4. Sólidos Voláteis.....	115
4.2.2.5. Nutrientes	116
4.2.3. LEA 02	120
4.2.3.1. Temperatura.....	120
4.2.3.2. Conteúdo de Água	122
4.2.3.3. pH.....	123
4.2.3.4. Sólidos Voláteis.....	124
4.2.3.5 Nutrientes	125
4.2.4. LEA 03	128
4.2.4.1. Temperatura.....	128
4.2.4.2. Conteúdo de Água	130
4.2.4.3. pH.....	131

4.2.4.4. Sólidos Voláteis.....	132
4.2.4.5 Nutrientes.....	134
4.3. Aspectos Sanitários do Composto Orgânico Produzido.....	138
4.4. Aspectos Qualitativos, em Termos de Valor Fertilizante.....	140
4.4.1. Capacidade de Troca Catiônica (CTC).....	140
4.4.2 – Outros Nutrientes.....	142
4.5. A Responsabilidade Social das Empresas e a Sustentabilidade da Produção	143
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	147
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	150

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1	Faixas ótimas de valores para os principais fatores que afetam a compostagem.....	42
TABELA 2.2	Conteúdo máximo de água recomendado para a compostagem de diferentes resíduos.....	48
TABELA 2.3	Proporção dos materiais necessários ao processo de compostagem, com base na proporção de volume ou massa.....	57
TABELA 2.4	Ponto de morte térmica de alguns patogênicos e parasitas comumente encontrados na compostagem.....	69
TABELA 2.5	Temperatura e tempo requeridos para a inativação de patógenos.....	70
TABELA 4.1	Parâmetros Avaliados	100
TABELA 4.2	Parâmetros microbiológicos durante os processos de compostagem.....	138

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1	Equipamento utilizado na determinação do gradiente de pressão estática.....	73
FIGURA 3.2	Esquema de protótipo utilizado na determinação do gradiente de pressão estática sob diferentes fluxos de ar.	74
FIGURA 3.3	Aspecto visual da primeira camada de carcaças na composteira.....	76
FIGURA 3.4	Seqüência de montagem e formação da estrutura da composteira.....	78
FIGURA 3.5	Conjunto utilizado para aeração das leiras.....	79
FIGURA 3.6	Detalhamento da camada de brita colocada sobre o duto de aeração e, ao fundo observa-se o duto interligado ao ventilador.....	80
FIGURA 3.7	Aspecto visual da disposição das carcaças de frango na Leira 01 durante a sua montagem.....	81
FIGURA 3.8	Aspecto visual da leira 01, depois de concluída a sua montagem.....	81
FIGURA 3.9	Detalhe das carcaças de frango, ao serem trituradas em moedor industrial, para serem adicionadas ao material a ser compostado nas leiras 02 e 03.....	82
FIGURA 3.10	Detalhe da Leira 02, posicionada ao centro, depois de concluída a sua montagem.....	83
FIGURA 3.11	Detalhe da Leira 03, em primeiro plano, depois de concluída a sua montagem.....	84
FIGURA 3.12	Esquema do sistema de umedecimento das leiras.....	87
FIGURA 3.13	Vista longitudinal, em elevação – Esquema de amostragem.....	88
FIGURA 3.14	Pontos de amostragem e de determinação de temperatura na compostera.....	89
FIGURA 3.15	Detalhe do amostrador, em tubo de PVC de $\frac{3}{4}$ ", utilizado para a coletar amostras na compostera, juntamente com uma amostra já coletada e acondicionada para análise.....	90

FIGURA 3.16	Posicionamento das sondas de temperatura – Perfil longitudinal.....	91
FIGURA 4.1	Varição da temperatura em função do tempo de compostagem. (1º estágio).....	94
FIGURA 4.2	Varição da temperatura em função do tempo de compostagem. (2º estágio – “Windrow”).....	96
FIGURA 4.3	Varição do pH no material em função do tempo de compostagem – Composteira.....	98
FIGURA 4.4	Varição na concentração de sólidos voláteis no material em função do tempo de Compostagem – Composteira.....	101
FIGURA 4.5	Varição na concentração de nitrogênio em função do tempo de compostagem.....	103
FIGURA 4.6	Varição na concentração de Carbono Orgânico Total em função do tempo de compostagem – Composteira.....	105
FIGURA 4.7	Varição na relação C/N em função do tempo de compostagem (1º estágio).....	107
FIGURA 4.8	Curva característica dos ventiladores.....	109
FIGURA 4.9	Varição da temperatura em função do tempo de compostagem – LEA01.....	111
FIGURA 4.10	Detalhe do perfil de distribuição de água no material constituinte da Leira Estática Aerada 01.....	114
FIGURA 4.11	Esquema das zonas de alta temperatura e formação de zonas de condensação de água no topo das leiras – LEA 01.....	114
FIGURA 4.12	Varição do pH em função do tempo de compostagem – LEA 01.....	115
FIGURA 4.13	Varição na concentração de sólidos voláteis em função do tempo de compostagem – LEA 01.....	116
FIGURA 4.14	Varição da concentração de Nitrogênio em função do tempo de compostagem – LEA 01.....	117
FIGURA 4.15	Varição na concentração de Carbono Orgânico Total em função do tempo de compostagem – LEA 01.....	119

FIGURA 4.16	Variação na relação C/N em função do tempo de compostagem – LEA 01.....	120
FIGURA 4.17	Variação da temperatura em função do tempo de compostagem – LEA 02.....	121
FIGURA 4.18	Detalhe do perfil de distribuição de água no material constituinte da LEA 02.....	123
FIGURA 4.19	Variação do pH em função do tempo de compostagem – LEA 02.....	124
FIGURA 4.20	Variação na concentração de sólidos voláteis em função do tempo de compostagem – LEA 02.....	125
FIGURA 4.21	Variação na concentração de Nitrogênio em função do tempo de compostagem – LEA 02.....	126
FIGURA 4.22	Variação na concentração de Carbono Orgânico Total em função do tempo de compostagem – LEA 02.....	127
FIGURA 4.23	Variação na relação C/N em função do tempo de compostagem – LEA 02.....	128
FIGURA 4.24	Variação da temperatura em função do tempo de compostagem – LEA 03.....	129
FIGURA 4.25	Detalhe do perfil de distribuição de água no material constituinte da LEA 03.....	131
FIGURA 4.26	Variação do pH em função do tempo de compostagem – LEA 03.....	132
FIGURA 4.27	Variação na concentração de sólidos voláteis em função do tempo de compostagem – LEA 03.....	133
FIGURA 4.28	Variação na concentração de sólidos voláteis em função do tempo de compostagem – Todos os experimentos.....	134
FIGURA 4.29	Variação na concentração de Nitrogênio em função do tempo de compostagem – LEA 03.....	135
FIGURA 4.30	Variação na concentração de Carbono Orgânico Total em função do tempo de compostagem – LEA 03.....	136
FIGURA 4.31	Variação da relação C/N em função do tempo de compostagem – Leira 03.....	137

LISTA DE SÍMBOLOS

AVIZOM – Associação de Avicultores da Zona da Mata (Minas Gerais)

b.u – Base úmida

b.s – Base seca

CFO – Carbono Facilmente oxidável

C/N – Relação Carbono/Nitrogênio

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente

COT – Carbono Orgânico Total

CTC – Capacidade de Troca Catiônica

° C – Graus Celsius

dag kg⁻¹ – Decagrama por quilo

DEA – Departamento de Engenharia Agrícola

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

K – Potássio

LEA – Leiras Estáticas Aeradas

LESA – Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental - Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa

N – Nitrogênio

Na – Sódio

P – Fósforo

pH (H₂O) – Potencial hidrogeniônico medido em água

pH (CaCl₂) – Potencial hidrogeniônico medido em cloreto de cálcio

RSU – Resíduos sólidos urbanos

SV – Teor de Sólidos Voláteis (%)

RESUMO

ROSA-PAIVA, Ed Carlo, M. Sc. Universidade Federal de Viçosa, Fevereiro de 2008. **Avaliação da compostagem de carcaças de frango pelos métodos da composteira e leiras estáticas aeradas**. Orientadora: Mônica de Abreu Azevedo. Co-orientadores: Antonio Teixeira de Matos e Adriana Corrêa Guimarães.

No presente trabalho buscou-se avaliar a compostabilidade dos resíduos de carcaças de frango, cama-de-frango, bagaço de cana de açúcar e palha de café, misturados adequadamente. Além disso, buscou-se avaliar e comparar os diferentes processos quanto à eficiência na eliminação de microrganismos patogênicos, reciclagem de nutrientes e tempo de compostagem

Os processos analisados foram o método da composteira, dando ênfase ao procedimento adotado pelos avicultores da Zona da Mata Norte de Minas Gerais e o de compostagem em leiras estáticas aeradas (LEA), com aeração forçada positiva. A pesquisa foi desenvolvida em duas etapas. Na primeira buscou-se a proporção ótima dos resíduos a serem compostados, mediante a determinação da relação C/N de cada material e da perda de pressão do ar ao passar pela massa em compostagem. Na segunda etapa, foram montados e monitorados os experimentos com a seguinte composição composteira, palha de café, cama de frango e carcaça de frango, LEA 01, bagaço de cana-de-açúcar, cama de frango e carcaça de frango inteira, LEA 02, bagaço de cana-de-açúcar, cama de frango e carcaça de frango triturada, LEA 03, palha de café, cama de frango e carcaça de frango triturada. Os parâmetros monitorados, ao longo do processo, foram: temperatura, relação C/N, sólidos voláteis (SV), pH, CTC e conteúdo de água. Para avaliação da eficiência de cada processo foram avaliadas a redução de SV e o índice CTC/COT $\geq 1,7$, (grau de estabilização da matéria orgânica) e eliminação de *Salmonella* e redução de coliformes termotolerantes (higienização do composto). Ao final de 90 dias todos os experimentos apresentaram resultados satisfatórios, tanto quanto a estabilização da matéria orgânica quanto a sanitização do composto, com ausência de *Salmonella* e redução de coliformes termotolerantes a níveis satisfatórios. A redução de SV e o índice CTC/COT

foram, respectivamente de 22,05% e 5,75 (composteira), 22,05% e 5,25 (LEA 01), 28,86% e 5,76 (LEA 02) e 54,5% e 9,74 (LEA 03). De acordo com os resultados concluiu-se que todos os experimentos apresentaram valores satisfatórios.

ABSTRACT

ROSA-PAIVA, Ed Carlo, M. Sc. Universidade Federal de Viçosa, February, 2008. **Assessment of the composting of poultry carcasses by bin methods and aerated static piles.** Adviser: Mônica de Abreu Azevedo. Co-advisers: Antonio Teixeira de Matos and Adriana Corrêa Guimarães.

The aim of this work was evaluate the compostability of the poultry carcasses, poultry litter, sugar cane bagasse and coffee straw, suitably mixed. Besides, the different processes in relation to efficiency on pathogenic microorganism elimination, nutrients recycling and time of composting were evaluated and to compared

The analyzed processes were the bin method, emphasizing the procedure adopted by poultry farmers of Zona da Mata Norte of Minas Gerais and the composting in aerated static pile (ASP) with positive forced aeration. The research was carried out in two phases. In the first phase the wastes to be composted the optimum ratio was found, through the determination of C/N ratio of each material and of the loss of air pressure when passing through the composting material. In the second phase the experiments were built and monitored with the following compositions: bin method - coffee straw, poultry litter and poultry carcasses, ASP 01 – sugar cane bagasse, poultry litter and poultry carcasses; ASP 02 - sugar cane bagasse, poultry litter and ground poultry carcasses; ASP 03 - coffee straw, poultry litter and ground poultry carcasses. The parameters monitored during the process, were: temperature, C/N ratio, volatiles solids (VS), pH, cation-exchange capacity (CEC) and water content. For assessment of the efficiency of each process the reduction of VS and CEC/TOC index, which $CEC/TOC \geq 1,7$ (stabilization grade of organic matter); the Salmonella elimination and thermotolerants coliforms reduction (sanitization of compost) were evaluated. After 90 days all experiments showed satisfactory results, not only in the organic matter stabilization but also in the compost sanitization, which is the absence of Salmonella and satisfactory reduction of thermotolerants coliforms. The reduction of VS and the CEC/TOC index were, respectively 22,05% and 5,75 (bin method), 22,05% and 5,25 (ASP

01), 28,86% and 5,76 (ASP 02) and 54,5% and 9,74 (ASP 03). According with these results, it was concluded that all the experiments showed satisfactory values.

1. INTRODUÇÃO

O grande crescimento populacional presenciado em nosso planeta tem gerado uma proporcional demanda por alimentos, materiais e insumos. Entretanto, para suprir essa demanda, tem sido gerada grande quantidade de resíduos, subprodutos da atividade humana constituindo grande problema de ordem social, econômica e ambiental. Dentre as atividades produtoras de alimentos, encontra-se a produção de frangos de corte, geradora de grande quantidade de resíduos. Nessa atividade, o Brasil é hoje um dos maiores produtores e o maior exportador de carne de frango do mundo.

A criação de frango e a produção brasileira de carne de frango crescem a cada ano e, juntamente com ela, cresce também a quantidade de resíduos gerados. Segundo dados da UBA (União Brasileira de Avicultura) e da ABEF (Associação Brasileira de Exportadores de Frango), em 2005 foram abatidas cerca de 4,427 bilhões e em 2006 foram abatidas 4,450 bilhões de aves (QUEVEDO, 2006).

Segundo a AVIZOM (2006)¹ (Associação dos Avicultores da Zona da Mata), cada ave produz cerca de 1,4 kg de excretas, o que daria, aproximadamente, 12,4 milhões de toneladas de excretas produzidas no Brasil, nos últimos dois anos. A mesma associação afirma que, além da “cama de frango” (excretas mais material palhoso usado na cobertura dos pisos dos criatórios) descartada, 5 a 15% das aves morrem de causas naturais durante a criação e, segundo dados da mesma associação, estima-se que no mesmo período, foram mortas, em média, 900 milhões de aves. Na região de atuação da AVIZOM (Zona da Mata Norte de Minas Gerais), a associação informou que são abatidas, diariamente, cerca de 180.000 aves, significando uma produção diária de 252 toneladas de dejetos e 18 mil aves

¹ AVIZOM – Associação dos Avicultores da Zona da Mata. Projeto de pesquisa: Cama de frango. Visconde do Rio Branco – MG, fevereiro de 2006. Texto não publicado.

mortas, correspondendo uma produção anual de 75.600 toneladas de excretas e cerca de 6,48 milhões de aves mortas.

A cama de frango descartada dos criatórios, antes Instrução Normativa nº 8, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, não constituía problema ambiental, sendo, ao contrário, responsável pela viabilidade econômica do sistema de integração de frango na região, uma vez que todo esse material era comercializado como suplemento alimentar de gado. As carcaças de aves mortas durante a fase de criação eram enterradas, lançadas nos rios da região ou utilizadas como alimento para outros animais (AVIZOM, 2006).

A Instrução Normativa nº 8, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, promulgada em março de 2004, proibiu a prática de alimentar outros animais com a cama de frango. Além disso, leis ambientais, tanto estaduais quanto federais, exigem maior cuidado na disposição dos resíduos no solo, seja por questões sanitárias ou mesmo ambiental. Maior atenção passou a ser dada, pelos agricultores, à forma de disposição final das carcaças de aves, de forma a atender a legislação vigente, que proíbe o seu lançamento em cursos d'água, enterro sem critério ou uso na alimentação animal.

Nesse sentido, tornou-se urgente o desenvolvimento de tecnologias que possibilite a destinação adequada, sob o ponto de vista sanitário e ambiental, se possível, com o aproveitamento desse resíduo para fins agrícolas. Para que isso seja possível, deve-se, no entanto, conhecer melhor os componentes químicos e microbiológicos desses resíduos, de forma a se obter um adubo orgânico sanitariamente seguro e que agregue valor econômico.

GRAVES *et al.* (2000) considera a compostagem de carcaças a técnica de tratamento de custo e tecnologia mais acessível aos produtores de aves. Na compostagem, propriamente dita, está implícita a aeração do material, seja por reviramento (processo “*Windrow*”) ou por aeração forçada (processo de leiras estáticas aeradas). O método da composteira, que é uma variante aos processos de compostagem, entretanto, difere dos anteriores, conceitualmente pois contempla uma fase onde se promove a aeração do material, nem por reviramento e nem a aeração forçada.

A compostagem de animais mortos nos sistemas de produção comercial tem sido feita, de forma predominante, em composteiras (“bin Method”) (GRAVES *et al.*, 2000), entretanto muita preocupação se tem com a qualidade sanitária do material.

GOLUEKE (1980), citado por PEREIRA NETO (1987a), afirma que a compostagem é o processo de tratamento de resíduos que apresenta menor custo em relação a outros métodos de tratamento. O mesmo autor cita vários estudos que demonstraram que a compostagem é o único processo que combina eliminação adequada de patógenos com alto grau de estabilização. Tais características fazem com que a compostagem seja o processo de tratamento de resíduos orgânicos mais utilizado no mundo.

Segundo STENTIFORD (1986), citado por AZEVEDO (1993), a bibliografia especializada contempla mais de 30 diferentes processos de compostagem. Sendo que, esses processos se apresentam divididos, basicamente, sob duas formas: os sistemas fechados, nos quais a compostagem ocorre dentro de reatores mecânicos e os sistemas abertos, nos quais o processo de compostagem ocorre em leiras. De qualquer forma, independente da forma de processamento, a maior parte dos estudos tem sido direcionada a compostagem da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (RSU).

O processo de Leiras Estáticas Aeradas (LEA) vem sendo muito difundido para o tratamento de resíduos orgânicos, principalmente, lodo de esgoto doméstico, devido suas características inerentes como, baixo custo de manutenção, grande produtividade e eficiência na eliminação de patógenos AZEVEDO (1993). Ainda segundo a mesma autora os custos de construção e operação das instalações dos sistemas de compostagem por LEA são similares ao processo “Windrow”, sendo assim, acredita-se que tal processo possa ser excelente alternativa de tratamento à crescente demanda dos resíduos gerados pelo processo produtivo de carnes de frango no Brasil.

Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivo geral:

- Avaliar a eficiência dos processos de compostagem por aeração forçada e por composteira (na forma como desenvolvido na Zona da Mata Norte mineira) no tratamento da carcaça de frango utilizando como materiais

estruturantes e fontes de carbono o bagaço de cana-de-açúcar, palha de café e a cama de frango. Os indicadores utilizados foram a estabilização da matéria orgânica (redução de sólidos voláteis e relação C/N) e sanitização (redução de microrganismos, coliformes termotolerantes e *Samonella*).

Objetivos específicos:

- Estudar e comparar a eficiência dos processos da composteira, tal como desenvolvido na Zona da Mata Norte em Minas Gerais, e de leiras estáticas aeradas na compostagem de cama-de-frango, bagaço de cana-de-açúcar, palha de café e carcaça de frango, quanto à estabilização da matéria orgânica e a eliminação de microrganismos patogênicos.
- Estudar a compostabilidade conjunta da cama-de-frango, carcaça de frango e bagaço de cana-de-açúcar ou palha de café.
- Avaliar o comportamento e o desempenho dos diferentes processos e misturas dos materiais, por meio de análises físicas, químicas e bacteriológicas, durante todo o período de compostagem.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Definição

A compostagem pode ser definida como um processo de decomposição controlada de materiais orgânicos, que ocorre quando esses materiais passam por um processo de “cozimento lento” promovido pela metabolização da matéria orgânica por microrganismos (USEPA, 2006).

A compostagem, tal como preconizada atualmente, é definida como um processo biológico, aeróbio, controlado, desenvolvido por uma população mista de microrganismos, efetuada em duas fases distintas: a primeira, quando ocorrem as reações bioquímicas de oxidação mais intensas predominantemente termofílicas (45 °C a 65 °C), e a segunda fase ou fase de maturação quando ocorre o processo de humificação, com a produção de composto propriamente dito (PEREIRA NETO *et al.*, 1986a; MATOS *et al.*, 1998; GRAVES *et al.*, 2000).

MUKHTAR *et al.* (2004), baseando-se nos trabalhos de vários pesquisadores, definem a compostagem, tanto de resíduos orgânicos convencionais² quanto de animais mortos, como sendo um processo de decomposição biológica natural com as seguintes propriedades:

- Estabilização de componentes da biomassa com reações predominantemente aeróbias;
- Desenvolvimento de populações de microrganismos termofílicos, gram-positivos, bacilos formadores de esporos, fungos e actinomicetos;
- Conversão de material orgânico complexo em moléculas relativamente menores de proteínas, ligninas, celulosas, hemicelulosas e alguns materiais inorgânicos (água, dióxido de carbono e amônia).

² Resíduos orgânicos convencionais aqui são considerados todos os resíduos orgânicos, exceto animais mortos e partes de animais. Estes últimos exigem cuidados especiais na compostagem, como por exemplo a fase de degradação ativa se apresenta em duas ou mais etapas distintas.

- Geração de um produto final ou “húmus”, que na verdade trata-se apenas de um material humificado, consistente, marrom escuro, parecido com solo e que contém, basicamente, bactérias mesofílicas.

2.2 - A Compostagem de Carcaça de Animais

A compostagem de carcaças de animais é o processo pelo qual se colocam as carcaças em camadas entre materiais palhosos e esterco permitindo sua decomposição natural e a redução de sua massa (EPA, 1999).

A compostagem de animais mortos é relativamente nova, se comparada a compostagem de resíduos orgânicos convencionais, tais como os resíduos sólidos urbanos e resíduos agrícolas. De acordo com MURPHY & HANDWERKER (1988), citados por MUKHTAR *et al.* (2004), ela surgiu na cadeia de produção de carne de aves na década de 80, após uma pesquisa na Universidade de Maryland ter demonstrado que as carcaças de aves eram totalmente biodegradadas em apenas 30 dias. Esse tipo de compostagem surgiu como alternativa às práticas mais comuns de disposição final desses resíduos, que são a queima, o enterrio ou alimentação de animais, por ser uma alternativa segura do ponto de vista sanitário e ambiental, sendo de baixo custo de instalação e operação (GRAVES *et al.*, 2000). Essa técnica tem sido mais usada para compostagem de carcaças de frango de corte, mas pode ser usada para carcaça de animais maiores, tais como suínos, perus, bois, cavalos, entre outros. No caso animais de grande porte, recomenda-se fatiá-los antes de sua disposição nas leiras de compostagem.

Segundo MUKHTAR *et al.* (2004), a compostagem de animais mortos, usando o método da composteira (Bin Method), foi rapidamente adotada pela cadeia produtiva de carne de aves americana, principalmente pelos estados do sul e da costa leste. KASHMANIAN & RYNK (1996), citados pelos mesmos autores, relataram que, em condições de clima frio, a compostagem como um todo não é seriamente afetado, desde que o processo da composteira seja bem dimensionado e conduzido.

A compostagem de animais mortos se diferencia da compostagem de resíduos orgânicos convencionais por apresentar mais de um estágio de degradação ativa. Os materiais que compõe a mistura e que são fontes de carbono e nitrogênio, inicialmente, não se encontram intimamente misturados. Além disso, o processo apresenta um pequeno período de degradação anaeróbia. Segundo KEENER *et al.* (2000) e BAGLEY (2002), citados por MUKHTAR *et al.* (2004), o processo se desenvolve da seguinte maneira:

- No início do primeiro estágio, no entorno das carcaças, o processo de degradação é anaeróbio;
- Depois disso, os líquidos e gases formados, se movem em direção a zona aeróbia, formada pelo material de co-compostagem que está no entorno das carcaças;
- Os gases e líquidos são, então, capturados pelos microrganismos presentes nessa massa de material e convertidos a dióxido de carbono e água;
- O material do entorno das carcaças é fonte de carbono e de bactérias, além de funcionarem como um filtro biológico (biofiltro) para o sistema.

De acordo com esse conceito, acredita-se que as carcaças de animais funcionam como fontes de nitrogênio orgânico, o material do entorno são as fontes de carbono e, a partir da atividade dos microrganismos, se tem, como produto final, um material estável e relativamente homogêneo, composto por biomassa bacteriana e ácidos húmicos, que pode ser usado para melhoramento (fertilização e condicionamento) do solo. Segundo MUKHTAR *et al.* (2004), alguns autores acreditam que, em termos de aplicação no solo, os produtos finais da compostagem de animais mortos são comparáveis aos da compostagem de resíduos orgânicos convencionais como resíduos sólidos urbanos e agrícolas e lodo de esgoto.

Torna-se importante ressaltar que a compostagem de carcaças, mais especificamente pelo método da composteira, é aplicável para animais com morte natural, não sendo indicada para mortalidade catastrófica resultante de calor excessivo, problemas com instalações, perdas por doença, entre outras. (PEDROSO-DE-PAIVA, 2004). Entretanto, segundo relatado pela USEPA (2006),

a compostagem é boa alternativa para o combate a epidemias de gripe aviária, podendo ser executada no campo ou em galpões. Nesse relatório está descrito que um vírus de alta patogenicidade, como o H5N2, pode ser inativado em três horas, sob temperatura de 55 °C, ou em meia hora, a 60 °C, sendo que essas temperaturas estão dentro da faixa em que o processo de compostagem ocorre.

2.3 - Classificação dos Processos de Compostagem

GOLUEKE (1977) classifica os processos de compostagem segundo as três bases gerais, a saber: utilização de oxigênio (aeróbio e anaeróbio), temperatura (mesofílica e termofílica) e tecnologia empregada (sistema aberto ou compostagem em leiras e fechado ou compostagem mecanizada). O mesmo autor complementa que a compostagem aeróbia é caracterizada por altas temperaturas, pela ausência de cheiro e por apresentar uma taxa de decomposição da matéria orgânica mais rápida, quando comparada com a compostagem anaeróbia. As temperaturas altas desenvolvidas durante a compostagem aeróbia favorecem a eliminação de microrganismos patogênicos, geralmente presentes nos resíduos orgânicos (PEREIRA NETO, 1987a).

A compostagem anaeróbia é caracterizada por baixos valores de temperatura, pela produção de produtos intermediários de odores desagradáveis e pelo maior tempo gasto para a decomposição da matéria orgânica. GOLUEKE (1977) considera que estas diferenças nas características do processo de compostagem constituem as principais vantagens da compostagem aeróbia sobre a anaeróbia.

KIEHL (1985) classifica a compostagem mesofílica como o processo no qual a digestão da matéria orgânica ocorre a temperaturas na faixa de 45 °C a 55 °C e termofílica quando a temperatura do processo é superior a 65 °C.

Com relação à tecnologia empregada, tem-se que os sistemas abertos de compostagem são aqueles nos quais todo o processo é realizado em leiras, em pátio a céu aberto, e os sistemas de compostagem fechados ou mecanizados, que são aqueles em que parte da atividade inicial de degradação da matéria orgânica

ocorre em uma unidade fechada denominada de reator, biodigestor ou bioestabilizador. GOLUEKE (1977) considera que a compostagem conduzida na maior parte dos processos mecânicos necessita de continuação em leiras, objetivando a estabilização e maturação adequada do produto final.

2.4 - Vantagens e Limitações do Processo

A compostagem de animais mortos, segundo GRAVES *et al.* (2000), apresenta como vantagens o fato de ser uma alternativa segura do ponto de vista ambiental e relativamente barata, além de ser de fácil implantação e requerer pouco investimento de tempo, trabalho e financeiro, quando comparada com as práticas mais comuns que são a queima e enterro de carcaças. Como principais desvantagens do processo, AUSVETPLAN (1996) e ELLIS (2001), citado por MUKHTAR *et al.* (2004), consideram o fato de ser um processo lento, que demora muitos meses, além de requerer maior cuidado na condução durante todo o processo de decomposição. A duração do processo de compostagem será tanto maior quanto maior forem os animais a serem compostados. Entretanto, esse tempo pode ser reduzido se os grandes animais forem cortados em pedaços, aumentando, assim, a área superficial para a atividade microbiológica (GRAVES *et al.*, 2000).

Segundo PEREIRA NETO (1987a) os sistemas de compostagem, especialmente o processo por Leiras Estáticas Aeradas, oferecem inúmeras vantagens, tais como:

- Rápida decomposição microbiana da matéria orgânica a um estado "estável", com a mínima produção de odor;
- Produção de calor durante a decomposição, que favorece a eliminação de microrganismos patogênicos;
- Pequeno uso de energia externa, quando comparado com outros sistemas de tratamento;
- Emprego de equipamento simples e grande flexibilidade operacional.

GOLUEKE (1980), citado por PEREIRA NETO (1987a), afirma que a compostagem em Leiras Estáticas Aeradas é o processo de tratamento de resíduos que apresenta menor custo em relação a outros métodos de tratamento. O mesmo autor cita vários estudos que mostraram que a compostagem é o único processo que combina adequada eliminação de patógenos com alto grau de estabilização do material orgânico.

2.5. *Microrganismos Associados a Compostagem*

A compostagem é um processo de decomposição essencialmente biológico onde, geralmente, os microrganismos que realizarão a estabilização do material orgânico estão presentes nos próprios materiais a ser compostado (MUKHTAR *et al.*, 2004). RYNK (1992), MORRIS *et al.* (1997) e LANGSTON *et al.* (2002), citados por MUKHTAR *et al.* (2004), referindo-se a compostagem de animais mortos, consideram-na um processo de conversão bioquímica realizado, principalmente, por bactérias e enzimas catalisadoras presentes nas carcaças. Além dos organismos principais que atuam nesse processo, (bactérias, fungos, actinomicetos e protozoários). RYNK (1992), citado pelos mesmos autores, observou que vermes e insetos também participam, porém com menor intensidade, da compostagem, quando a temperatura do material está próxima à do ambiente.

Essa população variada de microrganismos se desenvolve em resposta às diferentes faixas de temperatura, pH, umidade e concentração de oxigênio dentro da pilha ou leira de compostagem. Esta diversidade microbiana possibilita que a compostagem continue, apesar das constantes mudanças nas condições ambientais e nutricionais no material em decomposição (GRAVES *et al.*, 2000, MUKHTAR *et al.*, 2004).

Os microrganismos são responsáveis pela degradação de grande variedade de substratos, desde aminoácidos e açúcares simples até proteínas complexas e carboidratos. Além disso, a faixa de temperatura, bem como o tipo de substrato disponível, tem grande influência sobre a população predominante em

determinado período da compostagem (GRAVES *et al.*, 2000, MUKHTAR *et al.*, 2004).

Uma vez que a compostagem é, fundamentalmente, um processo biológico, o conhecimento dos vários grupos de microrganismos e suas funções no processo de bio-oxidação são essenciais (BERTOLDI *et al.*, 1983, citado por AZEVEDO, 1993).

AZEVEDO (1993) apresenta, em sua revisão bibliográfica, uma série de pesquisas realizadas com os mais diferentes tipos de resíduos sólidos, que enfocaram a identificação e quantificação dos microrganismos presentes durante os processos de compostagem. SCHULZE, (1961); KANE e MULLINS, (1973); FINSTEIN e MORRIS, (1975), pesquisaram resíduos sólidos urbanos e (GOLUEKE *et al.*, 1954; GRAY e BIDDLESTONE, 1971a e SAVAGE *et al.*, 1973) pesquisaram resíduos agrícolas e esterco de animais. Em todos estes trabalhos, por meio de isolamento e incubação em laboratório, foram observadas sucessões de microrganismos específicos relacionados a vários estágios do processo, em função dos fatores temperatura e tempo.

GOLUEKE (1977) alerta para o cuidado que se deve ter ao se concluir a respeito de análises relacionadas a microrganismos feitas em laboratório. Nesse sentido, o autor ressalta que a identificação e quantificação dos microrganismos atuantes no processo de compostagem, em laboratório, são feitas a partir do isolamento e incubação destes, sob condições ótimas, o que nem sempre correspondem às condições reais na massa de compostagem. O autor observa que o fato de se isolar determinado grupo de microrganismo em maior número que outros, não significa que este grupo seja, realmente mais numeroso e nem prova que ele seja o mais ativo, sob condições reais na massa de compostagem. Além disso, o autor ressalta que em condições de laboratório a falta de interação e competição entre espécies, bem como a utilização de um meio de cultura específico favorece o crescimento de determinado microrganismo. A diversidade microbiana, bem como a maior predominância de determinada espécie na massa de compostagem é função da diversidade e quantidade de substratos disponíveis, dentre outros fatores. A identificação de uma determinada espécie predominante em uma determinada massa de compostagem, sob determinadas condições

ambientais, não garantirá que essa mesma espécie seja dominante, nas mesmas condições, ambientais, porém com outros substratos.

O isolamento e a identificação de organismos, segundo GOLUEKE (1977), é de grande importância, pois uma vez conhecido o papel desses microrganismos na compostagem, podem ser conhecidas as condições ótimas para o crescimento deles, bem como sua cinética de crescimento e, assim, pode-se projetar um sistema de compostagem de acordo com essas informações. Entretanto, o mesmo autor ressalta que as condições ótimas são aquelas nas quais a decomposição da matéria orgânica se processa mais rapidamente e da forma desejada, representando a interação de todos os fatores "*in situ*", sem a necessidade de se identificar um único organismo.

Algumas pesquisas, citadas por AZEVEDO (1993), procuraram medir a atividade microbiana e os efeitos das variáveis ambientais, incluindo temperatura, umidade e pH, sobre as comunidades microbianas ativas, no processo de compostagem. AZEVEDO (1993) relata que alguns pesquisadores concluíram que os resultados destes estudos são de difícil comparação, devido à variedade dos materiais usados, dos sistemas de compostagem empregados, bem como dos métodos utilizados para estimar a atividade microbiana. Alguns destes métodos, segundo a autora, incluíram a produção de odor (MAC GREGOR *et al.*, 1981), a umidade (SULLER e FINSTEIN, 1977; FINSTEIN *et al.*, 1983), a produção no interior da leira de dióxido de carbono (BACH *et al.*, 1984; KUTER *et al.*, 1985). AZEVEDO (1993) destaca os seguintes resultados destes estudos:

- A maioria das comunidades microbianas são melhor adaptadas às temperaturas mais altas durante a fase intermediária dos processos de compostagem;
- Microrganismos mesofílicos e termofílicos têm importantes funções no processo;
- Microrganismos termofílicos extremos (temperatura ótima acima de 60 °C) não são os mais significantes no processo de decomposição.

A seguir, são descritos os principais microrganismos atuantes nos processos de compostagem.

2.5.1. Bactérias

As bactérias podem ser definidas como sendo organismos microscópicos unicelulares, procariotos, cujo material genético não está envolto por uma membrana e que são capazes de crescimento rápido, sendo encontradas em ambientes tanto aeróbios como anaeróbios (TORTORA *et al.*, 2000).

As bactérias se apresentam de várias formas, tais como bacilos (forma de bastão), cocos (forma esférica ou ovalada) e espirilos (forma de saca-rolhas ou curvada) e se reproduzem por fissão binária (divisão de uma célula em duas) (TORTORA *et al.*, 2000).

A maioria das bactérias, geralmente, necessitam de água para o crescimento, mas alguns tipos, que formam endósporos, são capazes de resistir a condições ambientais desfavoráveis como altas temperaturas e baixa umidade, voltando a crescer quando as condições ambientais forem mais favoráveis (GRAVES *et al.*, 2000, MUKHTAR *et al.*, 2004). Estas características de certas bactérias ajudam a continuar a compostagem na fase de resfriamento, que acontece após a temperatura atingir o pico, na fase termofílica (GRAVES *et al.*, 2000).

As bactérias são encontradas, no processo de compostagem, em maior número e são decompositoras mais rápidas que fungos e actinomicetos, sendo responsáveis pela maior parte da decomposição da matéria orgânica. Inicialmente, sob temperaturas mesofílicas (menores que 40 °C), as bactérias metabolizam carboidratos, açúcares e proteínas; sob temperaturas termofílicas (maiores que 40 °C), decompõem proteínas, lipídios, gorduras e frações de hemicelulose (RYNK, 1992, citado por GRAVES *et al.*, 2000). As bactérias estabilizam a maior parte dos nutrientes disponíveis. Também são capazes de digerir alguns produtos da decomposição de fungos e, alguns tipos, podem, inclusive, degradar celulose (GRAVES *et al.*, 2000).

As bactérias compreendem uma grande variedade de microrganismos com diferentes características. Embora elas sejam menores que fungos e actinomicetos, são encontradas em todos os estágios do processo e em toda parte da massa de compostagem, porém, apresenta maior crescimento na faixa de pH

6 a 7,5 (GOLUEKE, 1977; GRAVES *et al.*, 2000). Aparecem em maior número nos primeiros estágios da compostagem, quando os compostos facilmente degradáveis ainda não foram consumidos (RYNK, 1992, citado por GRAVES *et al.* 2000).

2.5.2. Fungos

Fungos são organismos eucariotos, maiores que bactérias, tendo células individuais com o núcleo cercado por uma membrana, que podem ser conectados, entre si, formando filamentos chamados hifa ou podem ser unicelulares, como as leveduras. São organismos formadores de esporos, heterotróficos e não fotossintetizantes. Têm a capacidade de degradar grande variedade de compostos orgânicos, em condições de baixa umidade e ampla faixa de pH (GRAVES *et al.*, 2000, TORTORA *et al.*, 2000, MUKTHAR *et al.*, 2004). A maioria dos fungos apresenta a taxa de crescimento ótima na faixa de pH entre 5,5 e 8,0 (GOLUEKE, 1977).

Os fungos, em função da natureza dos materiais que eles decompõem como celulose, hemicelulose e lignina, tendem a aprezer nos últimos estágios da compostagem. Os fungos são menos sensíveis a ambientes com baixa umidade e pH que bactérias. A maioria dos fungos são aeróbios estritos e são mais sensíveis a ambientes com pouco oxigênio que bactérias. Os fungos não sobrevivem a temperaturas superiores a 60 °C (GRAVES *et al.* 2000).

BERTOLDI *et al.* (1983), citados por AZEVEDO (1993), trabalhando com compostagem por aeração forçada de lixo urbano (60%) e lodo de esgoto (40%), concluíram que os fungos se beneficiam com as diminuições de temperatura, pH e conteúdo de água no material em compostagem. BIDDLESTONE e GRAY (1981), citados pela mesma autora, baseados em pesquisas anteriores desenvolvidas com fungos termofílicos, afirmaram que estes são capazes de crescer sob temperaturas entre 40 °C e 60 °C, morrendo quando a temperatura ultrapassa esta faixa. Quando a temperatura volta a baixar para valores menores que 60 °C, os fungos reaparecem. Entretanto, eles preferem temperaturas entre 45 °C e 50 °C,

sendo que todos apresentam ótimo crescimento nesta faixa de temperatura. Segundo AZEVEDO (1993), os autores concluíram, que os fungos apresentam duas características importantes: a capacidade de usar fontes complexas de carbono e de se desenvolver sob altas temperaturas. Considerando a faixa ótima de crescimento dos fungos, bem como a sua importância para o processo de compostagem, GRAVES *et al.* (2000), observaram que, embora altas temperaturas são desejáveis para a eliminação de microrganismos patogênicos, elas devem ser controladas para evitar a inativação de microrganismos benéficos e seus efeitos sobre a completa decomposição do material. Além disso, os autores concluem que devido a grande importância dos fungos na decomposição de compostos complexos de carbono, como celulose e hemicelulose, torna essencial a manutenção de condições favoráveis na leira de compostagem, de forma a se possibilitar também o crescimento destes microrganismos.

2.5.3. Actinomicetos

Os actinomicetos são a terceira maior classe de microrganismos que habitam a massa de compostagem. São capazes de degradar grande variedade substratos como ácidos orgânicos, açúcares, amidos, hemiceluloses, proteínas, polipéptidos, além de ligninas e ainda produzem enzimas que podem dissolver o material constituinte de outras bactérias. São mais abundantes na fase final do processo, quando a maior parte dos compostos labéis foram degradados, o conteúdo de água é menor e o pH é menos ácido (GRAVES *et al.*, 2000). Suas colônias são visíveis a olho nú, em razão da cor esbranquiçada conferidas as partículas situadas a aproximadamente 15 cm abaixo da superfície da massa de compostagem (PEREIRA NETO, 2007).

Segundo GRAVES *et al.* (2000) os actinomicetos se beneficiam com a diminuição de temperatura, pH e umidade que ocorre nos processos de compostagem. Os autores afirmam que a atividade metabólica dos actinomicetos é fundamental para a humificação da matéria orgânica e produção de compostos aromáticos, portanto, essencial para a fase de maturação. Além disso, os

actinomicetos formam um dos mais importantes grupos de organismos produtores de antibióticos (WAKSMAN, 1963).

2.5.4. Outros Organismos

Os organismos superiores invadem a massa de compostagem quando ocorre adequado resfriamento. Estes organismos incluem os protozoários, rotíferos e nematóides. Eles consomem a biomassa de bactérias e fungos, além de degradarem ligninas e pectinas. Contribuem na supressão de patógenos e na melhoria da qualidade do composto (GRAVES *et al.*, 2000). Dentre os organismos superiores, os protozoários são considerados os mais importantes no processo e, sendo assim, os mais estudados.

Os protozoários são seres unicelulares, eucarióticos e químio-heterotróficos, ou seja, usam moléculas orgânicas como fonte de carbono e energia (TORTORA *et al.*, 2000; PEREIRA NETO, 2007). A principal característica dos protozoários é sua dependência da matéria orgânica específica como as bactérias e outros microrganismos. Actinomicetos, esporos de *Clostridium*, leveduras e, freqüentemente, esporos de fungos filamentosos são geralmente resistentes ao ataque dos protozoários (ALEXANDER, 1977, citado por AZEVEDO, 1993). Todos os protozoários vivem em meios com grande suprimento de água e, no estágio vegetativo, ou trofozoíto, se alimentam de bactérias e pequenas partículas orgânicas ou nutrientes (TORTORA *et al.*, 2000).

Segundo BIDDLESTONE *et al.* (1981), citado por AZEVEDO (1993), quando as condições ambientais na leira de compostagem se tornam adversas, tais como altas temperaturas, os protozoários criam uma fina cobertura em torno de si, formando um cisto capaz de suportar essas adversidades. Os autores também declararam que os protozoários, normalmente, requerem boas condições de aeração e umidade adequada, preferindo temperaturas na faixa de 7 a 13 °C. Considerando que estes organismos preferem esta faixa de temperatura baixa, acredita-se que eles exerçam pequena influência nos processos de compostagem

atualmente utilizados, especialmente, quando estes são realizados em países de clima tropical, onde praticamente não ocorrem estas temperaturas.

2.6. Mudanças Durante a Compostagem

Devido às mudanças físicas, químicas e biológicas consideráveis que ocorrem durante o processo de compostagem, a degradação natural dos componentes da biomassa não se dá em condições estáveis, mas sim em condições instáveis. Sendo assim, não há um delineamento distinto entre as duas fases ou estágios dos processos de compostagem (MUKHTAR *et al.*, 2004).

Alguns autores, citados por MUKHTAR *et al.* (2004), dividiram o processo de compostagem, como um todo, em duas fases principais. Dentre eles, HAUG (1993) indicou que a primeira fase (também chamada de fase de desenvolvimento, ativa ou aquecimento), que pode durar de três semanas a três meses, é caracterizada pela ocorrência de temperaturas termofílicas, consumo alto de oxigênio e redução de sólidos voláteis. Além disso, há a possibilidade de liberar mais odores desagradáveis que a segunda fase.

Segundo PEREIRA NETO (1987a), o tempo de duração da fase ativa dependerá, principalmente, do processo de compostagem empregado e da composição dos materiais utilizados. O mesmo autor trabalhando com a co-compostagem do lixo urbano e lodo de esgoto pelo sistema de Leiras Estáticas Aeradas, encontrou, no sistema operado sob o modo positivo, com injeção de ar, duração média de 30 dias e, no sistema operado sob o modo negativo, com sucção de ar, duração média de 50 dias do período de estabilização térmica do material. Em compostagem de bagaço de cana-de-açúcar (70%) e esterco bovino (30%) pelo processo "Windrow", VITORINO (1991) verificou a ocorrência de um período médio de 55 dias de fase ativa no processo.

Segundo HENRY (2003), a primeira fase ou fase ativa de compostagem de materiais típicos como esterco e outros materiais orgânicos convencionais, pode durar cerca de 21 a 28 dias. Porém, na compostagem de animais mortos esse tempo é diretamente proporcional ao tamanho do animal. Considerando que a

fase ativa tenha dois estágios, o autor considera que, na compostagem de pequenos animais, seja adequado um tempo de 21 a 28 dias para cada estágio. Entretanto, para grandes animais, esse tempo deve variar de 60 a 90 dias para cada estágio.

BOLLEN *et al.* (1989) e KENNER *et al.* (2000), citados por MUKHTAR *et al.* (2004), consideraram que, na compostagem de carcaça de animais, a primeira fase, fase ativa ou fase de desenvolvimento, pode ser dividida em três sub-fases, assim descritas:

- Inicial, que pode durar de um a três dias, período em que a temperatura do material aumenta, podendo chegar a 43 °C. Nesta sub-fase, os microrganismos mesofílicos degradam açúcares, amidos e proteínas;
- Alta taxa, pode durar de 10 a 100 dias, período em que a temperatura aumenta de 43 °C até aproximadamente 71 °C. Os microrganismos termofílicos degradam gorduras, celulose, hemicelulose e alguns tipos de lignina;
- Estabilização, sub-fase que pode durar de 10 a 100 dias, período em que a temperatura decresce, mas se mantém acima dos 40 °C. Ocorre a degradação de celuloses específicas (provavelmente de cadeia curta), hemiceluloses e ligninas e microrganismos mesofílicos recolonizam a massa de compostagem.

Os autores consideram que as altas temperaturas que ocorrem na primeira e segunda sub-fase são em função da quantidade e do grau de uniformidade da oxigenação, umidade e composição dos materiais necessários.

A segunda fase (também chamada de fase de maturação ou de cura) pode necessitar de um mês ou mais para o seu término. Nessa fase, o oxigênio não é fator determinante para a compostagem adequada, ocorrendo uma série de reações retardadas, como a quebra da lignina, podendo durar muito tempo. De acordo com BOLLEN *et al.* (1989), citados por MUKHTAR *et al.* (2004), essa fase pode durar até cinco meses, devendo a temperatura permanecer inferior a 40 °C. Na compostagem de animais, esse período dura, em média, 90 dias (HENRY, 2003),

Segundo PEREIRA NETO (1987a), a duração da fase de maturação irá depender do tipo do processo empregado e do grau de controle exercido durante a primeira fase biooxidativa de compostagem e das características do material pré-estabilizado. Segundo STENTIFORD (1991), a fase de maturação nada mais é que um período de estocagem, em pilha, do material pré-estabilizado durante a fase ativa.

Segundo KENNER *et al.* (2000), citado por MUKHTAR *et al.* (2004), durante fases equivalentes de compostagem, a temperatura do material nas pilhas de compostagem de carcaças serão menores que em pilhas de resíduos orgânicos vegetais, a menos que condições físicas e químicas sejam otimizadas para proporcionar maior diversidade microbiana e aeração adequada do material nas primeiras. Além disso, a pilha de compostagem de carcaças deve ser grande o suficiente ou possuir material isolante para manter as temperaturas altas.

Pouco se conhece sobre a influência do processo na qualidade química dos compostos produzidos, principalmente no que se refere às diversas fases do processo, alterações de temperatura e atividade microbiana, etc.. Segundo alguns autores, como BIDDLESTONE e GRAY (1981), citados por AZEVEDO (1993), devido à diversidade das matérias-primas utilizadas, tem sido extremamente difícil precisar todas as mudanças bioquímicas que ocorrem durante o processo de compostagem. Entretanto, PEREIRA NETO (1987a; 1989a) considera que a degradação biológica pode ser descrita, em aspectos gerais, segundo um paralelo feito entre a atividade microbiana e a temperatura que governa cada fase do processo (AZEVEDO, 1993).

Na decomposição natural a temperatura se situa na faixa que favorece microrganismos mesofílicos, ou seja, entre 10 °C e 40 °C, o que faz da microbiota mesofílica a mais importante neste processo.

Durante a compostagem de resíduos orgânicos, da forma como hoje se preconiza, essa faixa de temperatura ocorre no início do processo (fase ativa) e no final do processo (fase de maturação). Assim que os resíduos orgânicos são empilhados, inicia-se a atividade biológica de decomposição, em decorrência da ação dos microrganismos mesofílicos presentes no material, degradando os compostos de mais fácil metabolização, como açúcares, proteínas, aminoácidos,

amido e gorduras. Essa atividade libera energia e, esta energia fica parcialmente retida no interior da leira devido às características termoisolante da matéria orgânica. Assim, a temperatura da leira aumenta gradativamente, regulada por fatores ambientais e pela natureza do material (GRAVES *et al.* 2000, MUKHTAR *et al.* 2004). Na faixa de temperaturas elevadas, que favorecem a população microbiana termofílica, esta substitui a população de microrganismos mesofílicos.

Quando a temperatura atinge a faixa entre 55 °C e 60 °C, bactérias termofílicas, fungos e actinomicetos multiplicam-se e iniciam a utilização de polissacarídeos, como hemicelulose e proteína, transformando-os em subprodutos (açúcares simples), que são utilizados por várias outras espécies de microrganismos (SCHULZE, 1961, citado por AZEVEDO, 1993). Nesta faixa de temperatura, dependendo do processo utilizado, ocorrerá, a maior eliminação de organismos patogênicos, bem como de larvas de insetos, ovos de helmintos e sementes de ervas daninhas (PEREIRA NETO 1989a; 2004). Segundo BIDDLESTONE e GRAY (1991), assim que a temperatura da pilha ou leira se eleva até valores próximos a 60 °C, a atividade dos fungos termofílicos é interrompida e a reação de decomposição continua pela ação dos actinomicetos e de bactérias formadoras de esporos. Em processos de compostagem não controlados, a temperatura pode atingir valores superiores à 80 °C e, nesse caso, prejudica o processo (PEREIRA NETO, 2004), por provocar perda de nutrientes contidos no material em compostagem, bem como eliminar microrganismos benéficos.

Assim que as fontes de carbono de mais fácil degradação acabam, a atividade microbiana é reduzida e, com ela, a temperatura também. Sendo assim, o calor gerado pela atividade biológica é dissipado pela massa em compostagem, marcando o fim da fase termofílica. Nesta fase, ocorre a degradação dos compostos de mais fácil decomposição e a maior demanda de oxigênio (AZEVEDO, 1993).

Findo o período de dominância de reações exotérmicas de degradação do material orgânico, passa ocorrer resfriamento do material da leira. Com isso, os microrganismos mesofílicos, principalmente fungos e actinomicetos, situados nas zonas periféricas da leira (de baixa temperatura), reinvadem a massa de

compostagem recomeçando a degradação dos compostos mais resistentes. Esses microrganismos tornam-se predominantes e passarão a ser os principais responsáveis pela continuidade de degradação do material orgânico.

Logo que a temperatura da leira atingir valores inferiores a 40 °C, o material deve ser posto para maturar. Durante a fase de maturação, reações bioquímicas complexas ocorrem entre resíduos de lignina e proteína, provenientes da morte de microrganismos, para formarem ácidos húmicos PEREIRA NETO (1989a; 2004).

Algumas transformações bioquímicas, que ocorre durante o processo de compostagem e relatadas por GRAVES *et al.* (2000) para obtenção de energia e síntese celular, estão descritas a seguir:

Para a síntese de novas células, os microrganismos precisam de quantidade suficiente de energia. Essa energia pode ser obtida por respiração (aeróbia ou anaeróbia) ou por fermentação.

Na respiração aeróbia, os microrganismos utilizam o oxigênio molecular (O₂) para obter a maior parte da energia das fontes de carbono, produzindo dióxido de carbono (CO₂) e água. A reação básica é:



Essa conversão não é obtida completamente por uma simples reação, mas por uma série de reações. Essas reações servem não somente para liberar quantidade significativa de energia, mas também para formar grande quantidade de compostos orgânicos intermediários, que servirão de ponto de partida para outras reações de síntese.

Na respiração anaeróbia, os microrganismos usam outros aceptores de elétrons que não o oxigênio (O₂) para a obtenção de energia. Dentre eles, cita-se nitratos (NO₃⁻), sulfatos (SO₄⁻²) e carbonatos (CO₃⁻²). Com estes aceptores de elétrons, nos processos metabólicos são produzidos compostos com odores desagradáveis, tal como o sulfeto de hidrogênio (H₂S). Além disso, são produzidos ácidos orgânicos intermediários que são prejudiciais aos microrganismos aeróbios. A respiração anaeróbia é menos eficiente para obtenção de energia e, além disso, as temperaturas no processo são menores, o que proporciona uma degradação

mais lenta e prejudica a eliminação de patógenos. Em razão dessas características, a respiração aeróbia é preferida em relação à anaeróbia para a compostagem.

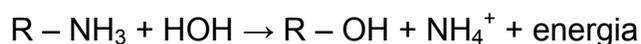
A fermentação é o processo de obtenção de energia mais simples, não usa oxigênio e, é relativamente ineficiente, pois a maior parte do carbono é convertido em produtos finais e não assimilados pelas células.

Todas as proteínas são quebradas para serem assimiladas por microrganismos heterotróficos, para a obtenção de nitrogênio para a síntese de novos materiais celulares. Resíduos orgânicos nitrogenados ou proteínas, por oxidação enzimática (digestão), formam compostos aminados complexos por meio do processo denominado aminização. Nessas reações, dióxido de carbono, energia e outros subprodutos também são obtidos:

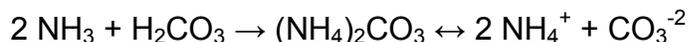
Proteínas + O₂ → compostos aminados complexos + CO₂ + energia + outros produtos

Segundo HANSEN *et al.* (1990), citados por GRAVES *et al.* (2000), os compostos aminados podem ser sintetizados em novos microrganismos ou por decomposição adicional em compostos mais simples. A seqüência da redução da complexidade vai de proteóses para peptonas a até aminoácidos e ácidos amídicos.

Caso haja carbono disponível e energia suficiente, o produto da decomposição de aminoácidos complexos pode ser sintetizado em novos materiais celulares, o nitrogênio presente se acumula no processo, em formas instáveis tais como a amônia (NH₃) ou íon amônio (NH₄⁺), pelo processo de amonificação.

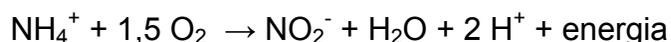


O tipo de composto formado, amônia (NH₃) ou íon amônio (NH₄⁺), dependerá do pH e da temperatura do material em processamento, de acordo com a seguinte reação:



Condições ácidas (pH < 7) favorecem a formação de NH_4^+ . Enquanto condições básicas (pH > 7) favorecem a formação de NH_3 . Além disso, temperaturas elevadas também favorecem a formação de amônia, por causa de sua baixa pressão de vapor, o que, geralmente, resulta na liberação desses gases da pilha em compostagem.

Outra importante transformação química, descrita por GRAVES *et al.* (2000), é a oxidação da amônia ou do amônio a nitrato. Este processo é conhecido como nitrificação e ocorre em duas etapas. Na primeira etapa o NH_4^+ é oxidado a nitrito (NO_2^-), por bactérias autotróficas. Na segunda etapa, que ocorre rapidamente, o nitrito (NO_2^-) é convertido a nitrato (NO_3^-), por um grupo de microrganismos conhecidos como bactérias nitrificantes. Estas reações estão mostradas a seguir:

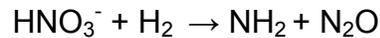


Nos processos de compostagem as reações de nitrificação ocorrem durante o período de cura ou maturação do material orgânico. O nitrogênio, na forma de nitrito, é tóxico para as plantas e o nitrato é a forma mais utilizada no metabolismo da plantas. Assim, no caso de interesse para uso agrícola do composto orgânico, tempo suficiente deve ser dado à cura para que todo o amônio seja convertido a nitrato. Como a nitrificação é uma reação que requer oxigênio, aeração adequada deve ser fornecida nessa fase do processo (GRAVES *et al.*, 2000).

Outra importante transformação do nitrogênio é a desnitrificação. Nesse processo, que ocorre na ausência ou deficiência de oxigênio, bactérias aeróbias ou anaeróbias usam o nitrato como aceptores de hidrogênio. A equação apresentada a seguir descreve essa seqüência:



Quando a desnitrificação é realizada por bactérias anaeróbias, há geração, como produto final, do óxido nitroso. A reação geral, dessa transformação é:



Como o óxido nitroso é um composto de odor desagradável, sendo um produto da transformação do nitrato, que é uma forma benéfica às plantas, esta é uma situação indesejável. Entretanto, ela pode ser evitada mantendo uma aeração adequada na pilha do composto (GRAVES *et al.*, 2000).

2.7. Principais Fatores que Afetam os Processos de Compostagem

A compostagem, por se tratar de um processo essencialmente biológico está condicionada a todas limitações relacionadas à atividade microbiana. Dentre os fatores que afetam a compostagem pode-se destacar a temperatura; o requerimento de oxigênio ou taxa de aeração; o conteúdo de água; os nutrientes; o tamanho da partícula e o pH.

O sucesso de um sistema de compostagem, com a obtenção de um produto final, estável e sanitariamente seguro, irá depender da observação dos princípios e limites de cada fator que afeta o processo (AZEVEDO, 1993). Entretanto, existe uma variação, em termos quantitativos, na mensuração desses fatores. Acredita-se que tal variação seja influenciada, dentre outras coisas, pelas condições do ambiente em que cada fator foi medido e, sendo assim, não existe um único valor para cada fator, mas uma faixa de valores considerados ideais. Na Tabela 2.1 está apresentado um resumo das faixas de valores, considerados ideais, para os principais fatores que afetam os processos de compostagem.

Tabela 2.1: Faixas ótimas de valores para os principais fatores que afetam a compostagem:

Variável	Valores
Relação C/N	25-30:1
Tamanho da partícula	10-35 mm para sistemas com reatores mecânicos e aeração forçada; 50 mm para os processos "windrow" e aeração natural
Conteúdo de água	50-60 dag kg ⁻¹
Fluxo de Ar	0,6 -1,8 m ³ de ar dia ⁻¹ kg ⁻¹ de sólidos voláteis ou manter os níveis de oxigênio entre 10 a 18 m ³ m ⁻³ . Para aeração forçada positiva usar controle de temperatura por "feedback".
Temperatura	55 °C
Controle de pH	Normalmente não é recomendado.
Tamanho da leira	1,5 m de altura e 2,5 m de largura para leiras com aeração natural. Para aeração forçada o tamanho pode ser aumentado. O comprimento pode variar em função da quantidade de material a ser compostado.

Fonte: BIDDLESTONE & GRAY (1991).

Porém, será visto, no decorrer dessa revisão bibliográfica, que essas faixas podem variar de acordo com o tipo resíduo a ser compostado, com o tipo de processo utilizado na compostagem, dentre outros fatores.

2.7.1. Temperatura

Toda atividade biológica de degradação libera calor como um produto do metabolismo. Porém, nos processos de decomposição que ocorrem espontaneamente na natureza, não se observa aumento significativo da temperatura, pois o calor gerado é rapidamente dissipado, já que, na maioria das vezes, a relação entre a superfície e volume do material é grande, além das condições de aeração serem favoráveis (AZEVEDO, 1993). Entretanto, quando os resíduos orgânicos são empilhados, devido à forma do empilhamento e às características térmicas e isolantes destes materiais, observa-se rápido aumento na temperatura do material empilhado. Nesse caso, a elevação da temperatura da massa de compostagem é o resultado da atividade microbiana, durante a

oxidação da matéria orgânica. Logo que a leira de compostagem é montada, a temperatura da leira, inicialmente próxima a ambiente, eleva-se como resultado da retenção do calor gerado por esta atividade. Se as condições ambientais (umidade, aeração, disponibilidade de nutrientes) estão adequadas, a temperatura da leira deverá atingir valores entre 40 °C e 60 °C, do segundo ao quarto dia de compostagem (PEREIRA NETO, 1989b; PEREIRA NETO e AZEVEDO, 1990a).

STENTIFORD et al. (1996a), resumidamente, considera que temperaturas superiores a 55 °C, por no mínimo três dias, são suficientes para sanitizar o composto, enquanto que a degradação máxima ocorre entre 45 °C e 55 °C e máxima diversidade microbiana ocorre para temperaturas entre 35 °C e 40 °C.

Temperaturas na faixa de 65 °C a 80 °C são prejudiciais à atividade da microbiota responsável pela degradação, retardam o período de compostagem, por causar a morte de microrganismos termofílicos benéficos, e interferem na qualidade final do composto.

Temperaturas superiores a 65 °C, associadas a pH maiores que 7,5 a 8 (meio alcalino), favorecem a perda de nitrogênio do sistema pela volatilização da amônia, gerando odores desagradáveis (PEREIRA NETO, 1989b; GRAVES *et al.*, 2000). Portanto, o objetivo dos sistemas de compostagem tal como se preconiza atualmente é a manutenção da temperatura média no interior da leira abaixo de 65 °C (FIALHO *et al.*, 2005).

O controle das temperaturas desenvolvidas ao longo do processo de compostagem poderá ser realizado por meio de reviramentos periódicos, caso o sistema de compostagem empregado seja o Processo "Windrow" ou por meio da passagem forçada de ar na leira de compostagem, quando o processo utilizado é o de Leiras Estáticas Aeradas. Em ambos os processos, a aeração da massa de compostagem passa a ser o principal mecanismo de controle da temperatura na faixa considerada ideal (AZEVEDO, 1993).

Na compostagem de carcaças de animais, a temperatura é considerada o fator mais crítico, principalmente, na fase ativa ou de desenvolvimento (MUKHTAR *et al.* 2004). Segundo HENRY (2003), a temperatura mínima a ser alcançada na compostagem de animais mortos dever ser de 54 °C, sendo a ótima 60 °C e a máxima 71 °C. A faixa de temperatura recomendada, para que o processo

funcione bem, é de 55 °C a 65 °C (RITZ e WORLEY, 2005). MUKHTAR *et al.* (2004), citando HARPER *et al.* (2001), KEENER e ELWELL (2000) e LANGSTON *et al.* (2002) relatou que a decomposição na faixa termofílica (entre 40 °C e 71 °C) é mais rápida que na faixa mesofílica (entre 10 °C e 40 °C). Além disso, o calor gerado pelo processo pode ser mantido, caso a pilha seja construída adequadamente, favorecendo a rápida decomposição. Uma das vantagens de se manter temperaturas elevadas é a inativação de sementes de ervas daninhas, presentes no material estomacal e intestinal de animais compostados. Segundo LOOPER (2002), citado por MUKHTAR *et al.* (2004), ervas daninhas podem ser inativadas quando a temperatura superar 62 °C.

A temperatura pode ser afetada por vários fatores, tais como: tipos de microrganismos presentes, materiais que estão sendo compostados, tamanho das carcaças, umidade, aeração e pH (GRAVES *et al.*, 2000, MUKHTAR *et al.*, 2004).

MUKHTAR *et al.* (2003), compostando carcaças de bois e cavalos, pelo método de leiras estáticas aeradas passivamente³, com ou sem estrados, verificaram que:

- Uma vez que as pilhas foram montadas em diferentes estações do ano, com diferentes índices pluviométricos no período de condução da compostagem de carcaças de cavalos (10 a 25 mm de chuva) e bois (80 a 200 mm de chuva), a ocorrência de temperaturas no interior da pilha (aproximadamente de 55 °C) durou um mês para os primeiros e cinco meses para os últimos;
- Dentro de poucos dias após a montagem das pilhas, as temperaturas, tanto na base quanto no topo das pilhas de compostagem de carcaças de cavalo e boi, montadas sobre estrados excederam 55 °C. As temperaturas da base da pilha se mantiveram 5 °C a 10 °C acima das temperaturas do topo. Fato este explicado pelo ressecamento da pilha;

³ A aeração passiva aqui considerada é aquela que ocorre pela entrada natural do ar na massa de compostagem. O ar entra na massa favorecido pelo uso de materiais de co-compostagem que conferem porosidade à massa. Nesse caso, o ar não entra forçadamente na massa com o uso de ventiladores. Sua entrada na massa é favorecida pelo uso de materiais de co-compostagem que conferem porosidade à massa.

- A pilha de composto de boi e cavalo, sem estrado, foi revirada após três meses. Esta aeração juntamente com uma série de eventos chuvosos que a precederam causou aumento significativo na atividade microbiana e, conseqüentemente, na temperatura na pilha de compostagem de boi, alcançando-se temperaturas superiores a 74 °C, cinco dias após o reviramento;
- Devido a diferentes quantidades de água e de nutrientes entre as carcaças de boi e de cavalo, a temperatura dentro da pilha de compostagem de boi se manteve acima ou próxima a 55 °C, por três meses, após o início da aeração, enquanto que na pilha de compostagem de cavalo continuou a diminuir, com elevações ocasionais, em decorrência de eventos de chuva.

Relatam MUKHTAR *et al.* (2004) que a maioria dos pesquisadores acredita que, quando a temperatura atinge a faixa de 55 °C a 60 °C em todo composto, ela deve permanecer nessa faixa por uma a duas semanas. Além disso, para que seja mais confiável a eliminação de patógenos, a temperatura do centro da pilha deve alcançar e se manter em torno de 65 °C por um ou dois dias. Depois disso, a pilha de composto pode ser revirada ou retirada do local com o mínimo de risco de disseminação de doenças causadas por microrganismos patogênicos. Entretanto, caso a temperatura exceda 65 °C por mais de dois dias, a pilha deve ser revirada ou aerada para prevenir a inativação térmica de microrganismos benéficos (MUKHTAR *et al.*, 2004). O mesmo autor ressaltou que, embora altas temperaturas sejam benéficas, em termos de aceleração da decomposição e maior eficiência na eliminação de patógenos, temperaturas excessivamente altas podem inativar enzimas desejáveis produzidas por microrganismos benéficos, ou até mesmo esses microrganismos. Como o caso dos microrganismos *Aspergillus niger* e *Trichoderma reesei*, que convertem celulose, hemicelulose e lignina em moléculas menores, e que são destruídos quando as temperaturas atingem a faixa de 60 °C a 70 °C, por mais de duas ou três horas. Além disso, nessa faixa de temperatura, muitas enzimas responsáveis pela digestão de carbono são inativadas e muitos compostos de nitrogênio são liberados na forma de gás, gerando odores desagradáveis. MILLER (1993), citado por MUKHTAR *et al.*

(2004), confirmou que fungos assimilam fontes complexas de carbono, como celulose e lignina, mas tem suas atividades muito reduzidas acima de 55 °C. KUBE (2002), citado por MUKHTAR *et al.* (2004), relatou que em compostos nos quais a temperatura ficou acima de 65 °C a atividade microbiana foi reduzida e acima de 71 °C foi interrompida.

Diante das considerações feitas por MUKHTAR *et al.* (2004) objetivando a sanitização do composto, ressalta-se que, em termos práticos, é praticamente impossível, se garantir uma temperatura entre 55 °C a 60 °C em todo o composto. Devido às características do material a ser compostado, dimensões da leira, condições ambientais, dentre outros fatores, o que ocorre é um gradiente de temperatura na leira, partindo de temperaturas mais altas no interior da leira até temperaturas próximas a ambiente nas regiões periféricas. Sendo assim, os tempos definidos por esses autores anteriormente, devem ser vistos com cautela e avaliados para cada situação.

2.7.2. Requerimento de Oxigênio/Taxa de Aeração

A compostagem aeróbia necessita de oxigênio ou ar para suprir a demanda de oxigênio requerida para a atividade microbiana, na primeira e segunda fase do processo, e atuar no controle da umidade e temperatura do material em compostagem (GRAVES *et al.*, 2000, MUKHTAR *et al.*, 2004).

Vários são os processos utilizados para suprimir a demanda de oxigênio da massa de compostagem, tais como: processos artificiais (mecânicos) e naturais (reviramento manual). A eficiência da aeração é dependente do tipo de substrato e do sistema de compostagem. Substratos com granulometria muito fina ou com umidade muito elevada irão dificultar a difusão de oxigênio no interior da leira, favorecendo o surgimento de condições anaeróbias (FIALHO *et al.*, 2005). Para o sistema de compostagem por leiras estáticas aeradas, com aeração forçada, estudos desenvolvidos por SILVA *et al.* (2008) demonstraram que a perda de pressão na massa de compostagem aumenta com vazão específica de ar e o tempo de degradação bioquímica. Sendo assim, acredita-se que a eficiência de aeração desses sistemas tende a diminuir com o tempo de compostagem.

Segundo PINTO (2001), usando a estequiometria, considera-se que a demanda média de oxigênio é de 2 kg de O₂ por kg de sólidos voláteis (SV) presentes no material orgânico. Taxas da ordem de 12 a 30 m³ de ar h⁻¹ kg⁻¹ de mistura seca são suficientes no início da aeração em sistemas por batelada, podendo chegar, no decorrer das reações, a 190 m³ de ar h⁻¹ kg⁻¹ de matéria seca.

Teoricamente, para fins de dimensionamento dos equipamentos de aeração (motor-soprador), a demanda de oxigênio para os resíduos sólidos orgânicos mais comuns é de 0,3 a 0,6 m³ kg⁻¹ de SV dia⁻¹ (PEREIRA NETO, 2007).

A Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) tem sido utilizada por vários pesquisadores para determinar a quantidade de oxigênio ideal a ser fornecida durante cada fase da compostagem. Entretanto, a interrelação de fatores ambientais como temperatura, umidade, tamanho da população microbiana, disponibilidade de nutrientes, consumo de oxigênio, tamanho da partícula, modo de aeração, inviabiliza o uso dessa única variável (GOLUEKE, 1977; PEREIRA NETO e STENTIFORD, 1992, GRAVES, *et al.* 2000).

Segundo GRAVES *et al.* (2000), taxas de aeração estão estabelecidas para compostagem de lodos de esgotos, mas não para resíduos agrícolas, sendo, na compostagem destes resíduos, utilizados valores de taxas baseados nos propostos para lodos de esgoto.

Segundo HAUG (1986), citado por GRAVES *et al.* (2000), o fornecimento de ar para a pilha de compostagem deve satisfazer três requerimentos:

- Demanda de oxigênio para decomposição aeróbia;
- Remoção de água para facilitar a secagem do material;
- Remoção do calor produzido durante a decomposição, possibilitando-se o controle da temperatura do material em processamento e, com isso, impedir a inativação microbiana.

O primeiro requerimento para a aeração forçada é encontrar a DBO. A pilha de composto deve ter oxigênio suficiente para que ocorra a atividade da microbiota desejável que irá decompor a matéria orgânica. Porém, essa variável é difícil de ser alcançada, devido à natureza heterogênea das misturas dos resíduos agrícolas a serem compostados. Além disso, a quantidade de oxigênio fornecida não reflete a quantidade de oxigênio absorvida pelos microrganismos por causa

da difusão diferencial do oxigênio na água e no ar. Uma vez que a demanda bioquímica de oxigênio é significativamente menor que a quantidade necessária para a remoção de água e calor, se a demanda de ar necessária à remoção do excesso de calor e água é encontrada, então a demanda bioquímica de oxigênio também será satisfeita (GRAVES *et al.* 2000).

2.7.3. Conteúdo de Água

A umidade da massa de compostagem é a variável mais importante, do ponto de vista do controle operacional, no processo de compostagem, pois ela é a principal responsável por garantir a atividade microbiana. A composição dos microrganismos é de, aproximadamente, 90 % de água, o que pode explicar isso. Além disso, todo nutriente necessário ao metabolismo celular precisa estar dissolvido em água antes de sua assimilação. Sendo a água, portanto, fundamental para a atividade dos microrganismos (PEREIRA NETO, 2004).

A faixa, considerada Ideal, de conteúdo de água para a atividade micorbiana em compostagem está entre 50 e 60 dag kg⁻¹ (BIDDLESTONE e GRAY, 1991; FIALHO *et al.*, 2005). Segundo GOLUEKE (1977) o valor mínimo de conteúdo de água para a atividade microbiana é de 12 a 15 dag kg⁻¹. O mesmo autor apresenta na Tabela 2.2, uma série de valores de conteúdos de água máximos recomendados para diferentes tipos de resíduos orgânicos convencionais.

Tabela 2.2: Conteúdo máximo de água recomendado para a compostagem de diferentes resíduos:

Tipo de Resíduo ^a	Conteúdo de água (dag kg ⁻¹)
Teórico	100
Palha	75-85
Madeira (serragem, pequenas lascas)	75-90
Resíduos úmidos (vegetais, resíduos de grama, lixo, etc.)	50-55
Lixo municipal	55-65
Esterco	55-65

Fonte: GOLUEKE (1977).

^a - O principal componente do resíduo.

O conteúdo ideal de água para a compostagem varia de acordo com o modo de aeração (se manual ou mecânico) e características físicas do material (capacidade de absorção de água, porosidade, entre outros.). Conteúdos de água superiores a 65 dag kg^{-1} fazem com que a água ocupe os espaços vazios impedindo a livre passagem do oxigênio na massa de compostagem, proporcionando regiões de anaerobiose e favorecendo a lixiviação de nutrientes. Por outro lado, conteúdos inferiores a 35 dag kg^{-1} diminuem a atividade microbiana, retardando o processo de estabilização (PEREIRA NETO, 2004, FIALHO *et al.* 2005).

Segundo HENRY (2003), o conteúdo de água é um fator crítico na compostagem de carcaça de animais, pois depende do tipo e tamanho das carcaças a serem compostadas. Na compostagem de carcaças de animais, GRAVES *et al.* (2000) e HENRY (2003) consideram a faixa de conteúdo ideal de água mais ampla, situando-se entre 40 a 60 dag kg^{-1} . Para a compostagem de aves, pelo método da compostaria, PEDROSO-DE-PAIVA (2004) sugere que o conteúdo de água seja mantido entre 45 e 55 dag kg^{-1} .

2.7.4. Nutrientes

Pode-se afirmar que a compostagem tem sua eficiência estreitamente dependente da atividade dos microrganismos que colonizam a massa de compostagem. Os microrganismos são mais ativos em função da disponibilidade de nutrientes, que servirão de fonte de energia e de material para a síntese de constituintes celulares (AZEVEDO, 1993). Os nutrientes representam importante variável na operação de qualquer processo biológico, já que condicionam o crescimento dos microrganismos. Quanto mais diversificado for o material a ser compostado, tanto mais diversificados serão os nutrientes disponíveis para a população microbiana e, conseqüentemente, mais eficiente o processo de oxidação.

Uma população microbiana diversificada proporciona eficiência no processo de oxidação, sendo que essa diversificação e o seu crescimento estão

diretamente relacionados à concentração de nutrientes na massa de compostagem.

O carbono é usado pelos microrganismos como fonte de energia para a oxidação metabólica e é o elemento importante, isto é abundante, na síntese da parede celular, protoplasma e outras estruturas celulares. A oxidação do carbono a dióxido de carbono é a principal responsável pela perda de massa e geração de calor, característica dos processos de compostagem (GOLUEKE e DIAZ, 1990, GRAVES *et al.*, 2000).

O nitrogênio é usado na síntese de material celular, sendo o principal constituinte do protoplasma. Nenhum crescimento microbiano acontece sem nitrogênio, porém, a atividade microbiana, tal como a síntese de ácidos orgânicos, é possível na ausência de nitrogênio (GOLUEKE e DIAZ, 1990). Qualquer nitrogênio incorporado às células microbianas torna-se disponível quando esses microrganismos morrem (GRAVES *et al.*, 2000).

A relação entre as quantidades de carbono e nitrogênio, na massa de compostagem, é fator determinante para a eficiência do processo. A relação adequada entre esses nutrientes, conhecida como relação C/N, determinará, dentre outras coisas, a velocidade da decomposição, a elevação da temperatura no processo e a perda de nitrogênio por volatilização.

A relação C/N é definida, a princípio, em função da composição da celular dos microrganismos presentes no processo. Segundo STENTIFORD (1991), a relação C/N nos microrganismos, está em torno de 8 a 12:1. ALEXANDER (1977), citado por AZEVEDO (1993), por meio de análises químicas, estabeleceu que os microrganismos contêm, em média, 50 dag kg⁻¹ de carbono, 5 dag kg⁻¹ de nitrogênio e 0,25 a 1,0 dag kg⁻¹ de fósforo. Sendo assim, tanto o carbono quanto o nitrogênio são considerados macronutrientes e são de grande importância no desenvolvimento dos microrganismos, devendo ser a proporção entre eles fator crítico para o processo de compostagem.

Segundo BIDDLESTONE *et al.* (1991), aproximadamente 50 dag kg⁻¹ do carbono orgânico, presente na massa de compostagem, é convertido em dióxido de carbono e assim uma relação C/N inicial maior que a sugerida por STENTIFORD (1991) será necessária para bom desempenho do processo.

AZEVEDO (1993) apresentou faixas de relação C/N, tidas como ideais para diferentes autores, para diferentes resíduos. Tomando-se os extremos, ter-se-ia uma faixa de relação C/N variando de 15 a 40:1. Acredita-se que essa larga faixa seja devido às características particulares dos materiais a serem compostados, clima da região, processo utilizado, dentre outros fatores.

Para autores como SAFLEY *et al.* (1996) e EPA (2007) a faixa ótima para a relação C/N, para iniciar o processo, entre 25 a 40:1. No produto final, a faixa ótima deve estar entre 10 a 20: 1 (EPA, 2007).

A relação C/N pode ser usada também para definir o final de cada fase do processo de compostagem, bem como padrões para o produto final, em caso de comercialização (KIEHL, 1998, citado por MATOS, 2006a). Quanto à comercialização do material produzido, o Ministério da Agricultura do Brasil, determina que um composto orgânico e um fertilizante organo-mineral deverão apresentar relação C/N menor que 18/1, além de mais de 1 dag kg⁻¹ de nitrogênio total, no caso de composto orgânico (MATOS, 2006a).

Na compostagem de carcaça de animais, devido a suas particularidades, a relação C/N inicial no processo deve estar entre 13 e 15:1 (GRAVES *et al.*, 2000) ou de 10 a 20:1 (HENRY 2003).

Segundo GRAVES *et al.* (2000), como grande parte do carbono é continuamente liberada enquanto a maior parte do nitrogênio é reciclado, a relação C/N diminui durante a compostagem, porém, em experimentos que ocorre grande perda de nitrogênio a relação C/N pode aumentar.

É consenso entre os pesquisadores que uma alta relação C/N irá causar diminuição da atividade microbiana, refletida através de valores baixos de temperatura e por um período mais longo de compostagem. Por outro lado, a compostagem de resíduos com baixa relação C/N, poderá provocar a eliminação do excesso de nitrogênio pela volatilização da amônia, principalmente, quando for combinada com altos valores de pH e temperatura (AZEVEDO, 1993).

Para a atividade metabólica, além de carbono e nitrogênio, os microrganismos necessitam de certas quantidades de fósforo, potássio, cálcio, sódio, magnésio, enxofre, ferro e traços de outros elementos, tais como cobalto e zinco. Porém, na maioria dos materiais orgânicos em compostagem, estes

elementos são encontrados de forma adequada, não necessitando, portanto, de correção em suas concentrações iniciais (BIDDLESTONE e GRAY, 1991, GRAVES *et al.*, 2000).

Segundo KIEHL (1998), citado por MATOS (2006a), o final da primeira fase ocorre quando o composto tiver com uma relação C/N em torno de 18/1 e, o final da segunda fase, essa relação deve atingir valores em torno de 10/1. Além disso, para ser considerado composto ou fertilizante orgânico, o material deve necessariamente ter que passar pelas duas fases do processo de compostagem, ou seja, o produto final deve apresentar características como estabilidade e humificação parcial.

2.7.5. Tamanho da Partícula

O tamanho das partículas do material a ser compostado assume papel importante no processo, uma vez que a velocidade de degradação do material é diretamente proporcional à área superficial da partícula e, portanto, inversamente proporcional ao seu tamanho. A redução no tamanho das partículas de resíduos possibilita aceleração da decomposição, pois o material, após a trituração, apresenta-se mais suscetível ao ataque dos microrganismos decompositores, adquire estrutura que facilita o manuseio e aumenta a resposta ao controle de umidade e aeração. Entretanto, reduzir indefinidamente o tamanho das partículas e, portanto, aumentar a área superficial não é vantajoso, em razão da diminuição do espaço poroso do material e, conseqüentemente da aeração da pilha. Além disso, ressalta-se que a altura da leira ou pilha é definida com base nessa variável, com o objetivo de evitar a compactação excessiva do material durante a compostagem.

O tamanho ideal da partícula será aquele, para o qual não ocorrerá a compactação (GOLUEKE, 1977, RYNK, 1992, citado por MUKHTAR *et al.*, 2004). Em se tratando da compostagem do lixo urbano, o tamanho ideal recomendado da partícula deve situar-se na faixa de 20 a 70 mm (PEREIRA NETO, 2004, FIALHO *et al.*, 2005).

Na compostagem de animais mortos, os materiais de co-compostagem devem ter comprimentos de 2,5 a 5,0 cm (MUKHTAR *et al.*, 2004). Nessas compostagens, recomenda-se a incorporação de materiais denominados estruturantes, com o objetivo de facilitar a aeração da pilha de compostagem. Esses materiais devem ser de tamanho tal que proporcionem a formação de uma porosidade em torno de 0,25 a 0,35 m³ m⁻³ na pilha de resíduos, prevenindo-se a compactação do material (MUKHTAR *et al.*, 2004). LOOPER (2002), citado por MUKHTAR *et al.* (2004), recomenda, no entanto, porosidade em torno de 0,35 a 0,40 m³ m⁻³ no material e, para assegurar a aeração adequada às partículas dos materiais de compostagem deve estar na faixa de 3,1 a 12,7 mm de diâmetro. Segundo HENRY (2003), a faixa de tamanho que pode ser considerada adequada para as partículas pode variar de 3,1 a 50 mm de diâmetro.

2.7.6. pH

O pH, não é, usualmente, fator crítico no processo de compostagem, devido ao efeito tampão da pilha de composto (HAUG, 1993, citado por GRAVES *et al.* 2000) que regula seu valor no material em compostagem. FERNANDES e SILVA (1997), usando vinhaça, com pH em torno de 4, para umedecer resíduos em compostagem, verificou que a acidez provocada por ela não afetou a de atividade microbiana presente no material e verificou que valores próximos da neutralidade eram obtidos de dois a três dias após a aplicação daquela água residuária.

Os primeiros dias da fase ativa são caracterizados por apresentar no material em compostagem um pH baixo, entre de 4 e 5. Esse decréscimo no valor do pH pode ser resultado da formação de ácidos orgânicos em zonas anaeróbias ou do acúmulo de ácidos intermediários, formados a partir da grande quantidade de material carbonáceo presente. Condições ácidas, tal como já explicado, são prejudiciais a microrganismos aeróbios, geralmente bactérias, e reduzem a velocidade da compostagem. Nesta fase, é favorecido o crescimento de microrganismos que usam compostos ácidos como substratos, principalmente fungos, o que faz o pH subir novamente (GRAVES *et al.*, 2000).

GRAVES *et al.* (2000) ressaltaram que maior cuidado deve ser tomado com relação ao pH na compostagem de resíduos ricos em nitrogênio. Afinal, um pH básico (pH > 8,5) promove a conversão dos composto de nitrogênio em amônia. Essa conversão, além de ser uma reação alcalina, retarda o processo de compostagem, como também, promove a volatilização da amônia. Em alguns casos, há a necessidade de abaixamento do pH para valores abaixo de 8. Nesse caso, segundo CARR *et al.* (1998), citados por MUKHTAR *et al.* (2004), essa redução pode ser feita por aplicação de sulfato ferroso granular. RYNK (1992), citado por GRAVES *et al.* (2000), relataram que a adição de 2 a 5% de superfosfato em relação à massa seca de esterco de gado de leite ajudou a conservar o nitrogênio na massa em compostagem. No caso da compostagem estar se desenvolvendo em meio ácido, GRAVES *et al.* (2000) sugeriram a adição de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) na pilha de resíduos, ressaltando que isso pode aumentar a volatilização da amônia do material.

Para a maioria das bactérias, a faixa ótima de pH está entre 6 e 7,5 e para os fungos entre 5,5 e 8,0. Ao final do processo de compostagem, o pH tende a ficar na faixa alcalina de 7,5 a 9,0 (PEREIRA NETO, 2004).

Segundo GRAVES *et al.* (2000), a faixa ideal para a atividade microbiana é de 6,5 a 8,0, sendo essa a faixa também sugerida por LANGSTON *et al.* (2002), citados por MUKHTAR *et al.* (2004), para a compostagem de carcaça de suínos. Porém, segundo GRAVES *et al.* (2000), abaixo de 5,0 e acima de 9,0, a compostagem se processa de forma muito lenta. Com relação ao pH do composto produzido, os autores relataram que ele ficará em torno de 7,5 e 8,0, independente do pH inicial dos materiais empilhados.

2.8. Sistemas de Compostagem

2.8.1. Método da Composteira

O método de compostagem de carcaças de animais mortos em composteira é uma alternativa de fácil implantação e requer pouco investimento de

implantação e operação. Este método tem sido utilizado amplamente pela agroindústria de frangos de corte nos Estados Unidos e também no Brasil. Entretanto, ele também pode ser empregado para a compostagem de qualquer tipo e tamanho de animal, sendo que, em caso de animais maiores, como suínos, perus, bois e cavalos, recomenda-se fatiá-los previamente (GRAVES *et al.*, 2000).

O método da composteira pode ter um, dois ou três estágios, dependendo do tamanho e da quantidade de carcaças a serem compostadas (GRAVES *et al.*, 2000).

- Um estágio: utilizado em operações menores, baixa mortalidade de animais e que não necessitam equipamentos. O carregamento e descarregamento são feitos por meio de portas moveis (tipo comporta), na frente e nos fundos da composteira;
- Dois estágios: utilizado onde há grande mortalidade e necessidade de equipamentos;
- Três estágios: utilizado na compostagem de grandes animais como suínos e perus;

Para a compostagem de frangos de corte, são necessários somente os dois primeiros estágios. MUKHTAR *et al.* (2004) consideraram que esse sistema não é adequado para a compostagem de grandes animais (ex. suínos adultos) ou muito grandes (ex. cavalos e bois), sendo sugerido, para esses casos, o método de compostagem “Windrow”.

A construção e operação padrão da composteira devem obedecer alguns critérios técnicos e operacionais. Segundo MUKHTAR *et al.* (2004), para a construção da composteira, os seguintes critérios devem ser observados:

- São necessários 10 m³ de capacidade para cada 1000 kg de carcaças;
- A composteira pode ser feita de madeira, concreto ou outro material adequado, pode ser coberta ou não, porém o ideal é que seja coberta para se evitar a umidade excessiva no material, tal como deverá ocorrer em localidades de climas úmidos ou chuvosos;
- Deve possuir piso de concreto de, aproximadamente, 12 cm. Em caso de uso de maquinários, deve ter fundação devidamente projetada para suportar o peso dos equipamentos. O uso do piso de concreto, entre

outras vantagens, permite a operação do sistema sob qualquer condição climática e previne quanto à contaminação do solo e de águas subterrâneas;

- Em caso de construção em concreto ou alvenaria, recomenda-se a construção de paredes de 15 cm de espessura;
- Para facilitar o acesso em qualquer condição climática, recomenda-se que o piso da região do entorno da composteira deva ser de concreto ou pó de pedra compactado;
- A altura da composteira pode variar de 1,5 a 1,8 m. A largura de ser suficiente para permitir o uso de equipamentos manuais, entretanto, não deve exceder 2,4 m.
- A abertura frontal deve ser projetada de tal forma que as carcaças não precisem ser erguidas a altura superior a 1,5 m. O uso de madeiras (como tábuas de 30 cm de largura) para o fechamento em sistema de comportas pode resolver o problema.

Para iniciar a primeira fase do processo de compostagem de carcaças de aves em uma composteira, autores como GRAVES *et al.* (2000), HENRY (2003), PEDROSO-DE-PAIVA (2004) e MUKHTAR *et al.* (2004) definiram, basicamente, a mesma seqüência de montagem e operação, conforme apresentado a seguir:

- Colocar no fundo da composteira de 30 a 60 cm de cama de frango seca e velha ou serragem, este material não será umedecido;
- Adicionar 15 cm de palha, grimpas de pinus ou outra fonte aceitável de carbono, com o objetivo de servir como fonte de carbono e proporcionar melhor aeração das carcaças das aves.
- Adicionar uma camada de carcaças. Não colocar as carcaças juntas e nem umas sobre as outras, tomando-se o cuidado de deixar um espaço de 15 a 30 cm entre as carcaças e a parede da composteira;
- Cobrir as carcaças com cama de frango ou outro resíduo. Quando houver grande mortalidade de aves, várias camadas de palha, carcaças e esterco deverão ser feitas;
- Adicionar água para umedecer a superfície do material. A quantidade a ser adicionada pode variar de 0 a 50% da massa das carcaças, porém

deve se ter o cuidado de não adicionar uma quantidade de água que prejudique a aeração causando a anaerobiose;

- Após a última camada de aves ser adicionada à composteira, cobrir a pilha com uma camada de cama de frango ou de esterco seco de, aproximadamente, 20 cm de espessura. No caso do uso de serragem de madeira, usar camadas de 60 cm de material. Essa camada final funciona como um biofiltro, evitando a atração de vetores e predadores de carcaças, bem como minimiza a perda de fluido da massa de compostagem.

MUKHTAR *et al.* (2004) recomendaram que, entre as camadas de carcaças deve haver uma camada de, pelo menos, 30 cm de material fonte de carbono. Esse material tem função de isolante, para manter a temperatura na pilha de compostagem.

Para a segunda fase do processo, o material deverá ser removido da câmara primária e disposto em uma câmara secundária. Nessa remoção faz-se a correção do conteúdo de água no material, que deverá estar na faixa de 30 a 40 dag kg⁻¹ (GRAVES *et al.*, 2000) ou de 40 a 60 dag kg⁻¹ (HENRY, 2003), ou ainda, de 45 a 55 dag kg⁻¹ (PEDROSO-DE-PAIVA, 2004). Essa movimentação, juntamente com a correção do conteúdo de água, desfaz as camadas iniciais e reativa a atividade microbiana, permitindo um novo ciclo de aquecimento.

As proporções de cada material, conforme definido anteriormente, são dados práticos e que, em geral, se fundamenta nas proporções apresentadas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Proporção dos materiais necessários ao processo de compostagem, com base na proporção de volume ou massa:

Ingredientes	Volume	Massas
Palha	1	0,1
Aves	1	1
Esterco (ou cama)	2,5 a 4,0	2 a 3
Água	0 a 0,33	0 a 0,5

Fonte: PEDROSO-DE-PAIVA (2004).

Essas proporções estão diretamente relacionadas à relação C/N de cada material que compõe a mistura ou camadas, sendo assim, em caso do uso de

materiais não contemplados nesses estudos, recomenda-se um ajuste em função de suas quantidades de carbono e nitrogênio. A relação C/N da massa de compostagem inicial, considerada ideal, pode variar de autor para autor, conforme mostrado no item específico. Tomando os valores extremos a relação C/N ideal varia de 10:1 até 40:1. Ou ainda poderá ser usada uma relação em massa de, aproximadamente, 2,2 kg de cama úmida por kg de carcaça.

2.8.2. Compostagem em Leiras

Os sistemas em leiras mais difundidos para a compostagem de resíduos orgânicos convencionais são o processo reviramento ou processo “Windrow” e o processo por aeração forçada ou sistema por leiras estáticas aeradas (LEA).

Esses processos são bastante similares, diferindo, contudo, quanto à forma em que o ar é introduzido na massa em compostagem. No processo por reviramento, a oxigenação é feita por meio de reviramentos periódicos. No sistema de LEA, a aeração é efetuada por meio da injeção ou sucção de ar na massa de compostagem, proporcionada por ventiladores ou exaustores, respectivamente (AZEVEDO, 1993). Nas leiras estáticas, com aeração passiva, o processo de aeração é o natural, favorecido pela introdução, na massa de compostagem, de materiais ditos estruturantes que conferem a massa porosidade permitindo que ocorra uma aeração adequada. Aqui não será descrito o processo de Leiras Estáticas, com aeração passiva, muito utilizado na compostagem de animais mortos, uma vez que este não será objeto deste estudo.

As etapas operacionais, para a compostagem de resíduos orgânicos convencionais como os resíduos sólidos urbanos e a maioria dos resíduos agrícolas, em ambos os processos, “Windrow” e LEA, são descritas por AZEVEDO (1993) da seguinte maneira:

- No caso de resíduos sólidos urbanos: a fração orgânica do lixo urbano deve ser previamente separada dos materiais inertes como vidro, plástico, papel, dentre outros materiais não compostáveis. O material orgânico “*in natura*” ou triturado é, então misturado, no caso da co-

compostagem com outro tipo de resíduo orgânico, até que a massa de compostagem adquira característica homogênea;

- A leira é construída seguindo determinadas dimensões pré-fixadas, que, em geral, varia de acordo com o tipo do material, da quantidade e do tipo de aeração, se manual ou mecânica. No caso da aeração forçada, a leira é construída sobre uma tubulação perfurada, previamente instalada e conectada a um sistema de ventilação (moto-ventilador). Durante esta fase, a massa de compostagem terá sua umidade corrigida para valores compatíveis com os da faixa ideal para o processamento;
- A leira de compostagem é aerada, no caso do processo “Windrow”, por reviramentos periódicos, mecânicos ou manuais ou, no caso do sistema por LEA, por aeração forçada, por ventiladores mecânicos. A duração desta etapa é função do tipo do processo empregado, em média, dura 30 dias, no caso de utilização de sistema de aeração forçada (PEREIRA NETO, 1987a e 2007) e 60 a 70 dias no caso de processo “Windrow” (PEREIRA NETO *et al.*, 1989a);
- A leira é desmontada e o material é posto para maturar, em pilhas de forma, geralmente, cônica;

A compostagem de animais mortos, devido às características inerentes aos materiais a serem compostados, apresenta algumas peculiaridades no processo, para que este não venha a trazer consequências danosas ao meio ambiente e à saúde das pessoas que operam os sistemas. Tais peculiaridades serão explicitadas na seqüência desse trabalho.

2.8.2.1. Processo “Windrow”

O Processo “Windrow” é, provavelmente, o de menor custo dentre os sistemas de compostagem disponíveis, embora não haja controle preciso sobre as variáveis operacionais do processo (AZEVEDO, 1993). As dimensões das leiras utilizadas no processo “windrow” deverão levar em conta, dentre outros fatores, as

condições climáticas do local, o tipo e a quantidade de material a ser compostado (GRAVES *et al.* 2000).

Na construção de uma leira para a compostagem de animais mortos, existem algumas características que não se apresentam na compostagem de resíduos orgânicos convencionais. A construção dessas leiras será função do tamanho e da quantidade de carcaças de animais a serem compostados. Nesse sentido, MUKHTAR *et al.* (2004) sugerem que se adote os seguintes critérios, seqüência e dimensões para as leiras:

- A leira deverá ser construída sobre piso impermeável e, caso não se tenha um local nessas condições, antes da construção da leira propriamente dita, deverá ser feita a impermeabilização do piso que poderá ocorrer por meio da compactação do piso com pó de pedra;
- Em seguida, esse piso impermeável deverá receber uma camada de material de co-compostagem (maravalha, pó de serra, cama de frango velha seca, palha, ou outro material similar.), com espessura variando de 30 cm (para animais pequenos (com menos de 23 kg), como frangos), 45 cm (para animais médios (com massa entre 23 a 114 kg), como suínos) e 60 cm (para animais grandes (com massa entre 114 a 227 kg), como suínos adultos e muito grandes (com massa superior a 227 kg), como cavalos ou bois);
- Sobre a camada anterior deve-se colocar uma camada de material estruturante. Esse material apresenta porosidade alta, é resistente à compactação com a finalidade de absorver os líquidos provenientes da decomposição das carcaças e manter a porosidade adequada na massa de compostagem. Esse material pode ser uma cama nova (palha de café, palha de arroz, ou similar.) e sua espessura varia de 15 cm, quando a compostagem for para animais pequenos e 30 cm, para todos os outros;
- Sobre a camada anterior, é colocado, então, uma camada de carcaça de animais, espaçados uniformemente sobre ela, e sobre essa camada é colocada outra camada de material de co-compostagem com 30 cm de espessura;

- Coloca-se, então, outra camada de carcaças e, novamente, outra camada de material de co-compostagem e assim sucessivamente até que se atinja uma altura de 1,8 m, quando da compostagem de animais pequenos e médios;
- Finalmente, deve-se cobrir a leira com uma camada de material estruturante (fonte de carbono), que funcionará como um biofiltro.

Quando se tratar de animais grandes (ex. suínos adultos) e muito grandes (ex. cavalos e bois), MUKHTAR *et al.* (2004) sugerem a colocação de uma única camada de carcaças no interior da leira. Além disso, nunca se deve colocar uma camada de carcaça diretamente sobre a outra, devendo sempre colocar uma camada de material de co-compostagem entre as camadas de carcaças.

Segundo GRAVES *et al.* (2000), o tempo necessário para finalizar a compostagem pelo processo “windrow” pode variar de três a nove semanas. Sendo esse tempo função do material compostado e da frequência de reviramento. Ou seja, quanto menor o intervalo de reviramento menor será o tempo de compostagem. O autor sugere que, para um período de compostagem de dois meses, sejam realizados de cinco a sete reviramentos. Depois disso, o material deve ser posto para curar por, pelo menos, um mês. PEREIRA NETO (1989a; 2007), recomenda que o ciclo de reviramento seja a cada três dias, nos primeiros 30 dias do processo, seguindo-se um reviramento feito a cada seis dias, até que sejam registradas temperaturas máximas inferiores a 40 °C. Após isso, o material é posto para maturar, por um período médio de 30 a 50 dias.

A configuração geométrica da leira ou pilha de materiais a serem compostados é um fator importante no controle da temperatura, pois permite um balanço térmico entre o calor produzido pela massa de compostagem e o calor perdido para o ambiente, de forma que a temperatura máxima permaneça na faixa de 60 °C. A configuração geométrica é definida, basicamente, em função da quantidade de resíduos a serem compostados. Para menores quantidades a compostagem é feita em pilhas e, para maiores quantidades, a compostagem é feita em leiras.

O reviramento da leira ou pilha é feito removendo-se a camada superficial, aproximadamente 15 cm, que geralmente apresenta temperatura próxima à

ambiente e umidade diretamente influenciada pelas condições climáticas. Então, esse material passa para o interior da nova leira montada, após o reviramento. Tal procedimento permite que o material anteriormente exposto a baixas temperaturas, passe, após o reviramento, a ficar sujeito a altas temperaturas e, nesse sentido, contribuindo para melhorar a eficiência do processo, como um todo, em relação à eliminação de microrganismos patogênicos e no controle de atração de vetores. Após o reviramento, deve-se procurar proporcionar a mesma configuração inicial.

2.8.2.2. Sistema de Compostagem por Leiras Estáticas Aeradas

Os sistemas de compostagem por leiras estáticas aeradas (LEA) surgiram da necessidade de se obter um grau de controle satisfatório sobre o processo, porém com baixo custo. Até então, os processos se encontravam basicamente concentrados em dois pontos extremos, de um lado, os processos de compostagem em reatores mecanizados, de alto custo e que geralmente apresentam alto grau de controle, e, de outro, os sistemas “Windrow” - leiras reviradas manual ou mecanicamente, que são sistemas de baixo custo, porém com menor grau de controle. Para estabelecer e manter temperaturas termofílicas nas camadas externas da massa de compostagem (evitando-se o contato direto com as condições ambientais), as LEA devem ser cobertas com uma camada de composto maturado (15-30 cm), que funciona como material isolante e também como filtro biológico para os odores produzidos durante o processo. Após a fase de maturação, realizada sem aeração, o composto deve ser peneirado, estando pronto para a utilização agrícola ou como material de cobertura para novas leiras.

AZEVEDO (1993) relata que o primeiro sistema de compostagem por LEA foi desenvolvido em Belville. Nesse sistema de compostagem, o lodo era misturado com lascas de madeira, a fim de criar uma estrutura adequada para a construção das leiras, fornecer porosidade necessária à boa eficiência do sistema de aeração, além de ser fonte de carbono para um melhor balanço da relação C/N da mistura. Estes materiais, depois de misturados eram empilhados sobre dois

condutos perfurados os quais eram conectados a um exaustor, que succionava o ar através da massa de compostagem. Devido à umidade contida no ar, após este ter passado pelo material em compostagem, tornava-se necessário usar uma pilha de composto maturado para recolher a condensação do vapor succionado pela tubulação de aeração. A massa dessa pilha de composto maturado, que servia de filtro para os gases expelidos pelo ventilador, correspondia a 1/10 da massa de compostagem. O período de aeração era de 21 dias, onde eram, geralmente, registradas temperaturas da ordem de 80 °C. Após este período, o material era posto para maturar (EPSTEIN *et al.*, 1976, citados por AZEVEDO, 1993).

AZEVEDO (1993), citando FINSTEIN *et al.* (1980), relata o Processo Rutgers de Compostagem, desenvolvido pela Universidade de Rutgers, New Jersey, EUA, em 1980. Este processo seguiu a mesma linha de pesquisa de Beltville e estudou a relação existente entre temperatura, atividade microbiana e a perda relativa de umidade, procurando estabelecer o controle destes parâmetros através da taxa de aeração aplicada. Dentre as principais diferenças deste processo em relação ao processo de Beltville, a autora cita a inversão do sentido de aeração (injeção de ar ao invés de sucção) e a aplicação da aeração como forma de controle da temperatura interna da leira, com utilização do controle em "feedback". O Processo apresenta uma série de vantagens em relação ao Processo de Beltville, dentre estas se encontram uma distribuição mais uniforme do ar na massa de compostagem, associada a uma menor perda de carga desse ar ao passar pela massa (SINGLEY, *et al.* 1982, apud AZEVEDO, 1993). Essas vantagens fazem do Processo Rutgers mais eficiente, em termos de estabilização da matéria orgânica e sanitização do composto, além de mais econômico (AZEVEDO, 1993).

Segundo PEREIRA NETO (1987a), a compostagem de lodos de esgoto, com aeração positiva apresentou algumas vantagens sobre os demais, tais como:

- Maior facilidade de controle, pela temperatura de referência e maior eficiência de todo o processo;
- O ventilador trabalhou em ciclos mais regulares e consumiu menos energia;

- Causou menos ressecamento do material em compostagem, quando utilizado o controle por “*feedback*” de temperatura;
- Causou menos compactação do material, criando condições mais favoráveis, do ponto de vista da porosidade e distribuição de ar;
- Foi mais eficiente na redução da matéria orgânica, com base na redução de sólidos voláteis e lipídios, e
- Foi mais flexível e de mais fácil operação, além de requer menos área para ser operado.

AZEVEDO (1993), em sua revisão bibliográfica, relatou algumas das vantagens da aeração positiva (injeção de ar) sobre a aeração negativa (sucção de ar), comprovadas por vários autores, e que estão descritas a seguir:

- Na aeração positiva a perda de carga é significativamente menor do que na aeração por sucção;
- A distribuição de ar na leira sob aeração positiva é mais uniforme do que na aeração negativa;
- A aeração positiva não necessita de uma pilha - filtro, que é responsável pelo aumento da perda de carga, não exercendo de forma satisfatória o controle de odor, para o qual seu uso foi idealizado;
- A menor resistência ao fluxo de ar aumenta a eficiência da bomba de aeração e conseqüentemente, menor será a manutenção exigida pela bomba;
- A perda de nitrogênio da leira de compostagem é menor na aeração positiva;
- A aeração positiva evita o entupimento da tubulação de aeração por água ou compostos sólidos, o que tem sido observado na aeração negativa;
- A aeração positiva remove de forma mais eficiente o calor produzido na leira de compostagem do que a aeração por sucção;
- A aeração positiva remove mais eficientemente o excesso de água do que a aeração negativa;

- A aeração positiva, aliada ao controle da temperatura em “*feedback*”, mantendo-se a temperatura abaixo 60 °C , promove maior taxa de decomposição do que a obtida pelo Processo de Beltville;
- O modo positivo de aeração permite elevado grau de controle da temperatura interna da leira (o que pode ser utilizado para melhorar a eficiência do processo), menor perda de água, grande atividade microbiana de degradação e eliminação de microrganismos patogênicos;
- Com relação aos aspectos operacionais, o sistema por injeção de ar apresenta as melhores vantagens, visto que: envolve menor mão-de-obra, necessita de menor área para instalação, por não requer espaço para a pilha-filtro e apresenta menor período de compostagem, dispensa aparatos para condensação, não produz chorume nem odor, fatos associados ao sistema negativo de aeração.

AZEVEDO (1993), citando PEREIRA NETO (1987b), relata outra forma de aeração dos processos de compostagem em leiras, denominada aeração híbrida. Esta nova forma de aeração, combina o modo negativo seguido do modo positivo de aeração. Este sistema híbrido apresentou, segundo o autor, as limitações existentes nos dois sistemas, não sendo eficiente na eliminação de microrganismos patogênicos. Entretanto, essa pode ser uma forma de manejo adequada quando se requer melhor homogeneização na distribuição da água no material.

Segundo METCALF & EDDY (1991), no sistema de leiras estáticas aeradas o material é aerado por 21 a 28 dias, que deve ser seguido por um período de cura do material, sem aeração forçada, por 30 ou mais dias.

Em relação a compostagem de animais mortos, não foi encontrado na literatura pesquisada nenhum trabalho que utilizasse o processo de leiras estáticas aeradas com aeração forçada. Segundo GRAVES *et al.* (2000), na maioria das instalações agrícolas não se tem compostagem de carcaça de animais com aeração forçada, sendo assim, as variáveis de projeto de sistemas a serem utilizados com este fim não estão tão bem estudadas e conhecidas, tal

como já estão no caso de lodos de esgotos e outros resíduos orgânicos convencionais.

2.9. O Composto

2.9.1 Aspectos Qualitativos do Composto Orgânico Como Fertilizante

A qualidade do produto final da compostagem, o composto, é definida em função de suas características físicas, químicas e biológicas. A determinação do grau de qualidade é muito subjetiva e não apresenta um único método, variando de acordo com o objetivo final (GRAVES *et al.*, 2000). Dentre as características físicas importantes pode-se citar o tamanho das partículas, textura, aparência, principalmente, se for para venda. Em termos fertilizantes ou como condicionador de solo, as características químicas apresentam-se como as mais importantes. As de maior interesse são o conteúdo de matéria orgânica, especialmente aquela humificada, conteúdo de água, pH, metais, nutrientes e sais solúveis (GRAVES *et al.*, 2000, MATOS, 2006a). Segundo MUKHTAR *et al.* (2004), o composto produzido a partir da compostagem de carcaças de animais apresenta em sua composição, principalmente, nutrientes como o nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), manganês (Mn), zinco (Zn) e cobre (Cu). CARR (1991) citado por MUKHTAR *et al.* (2004), observou que o composto produzido a partir de carcaças de aves apresentou concentrações desses nutrientes comparáveis ao composto feito a partir da cama de aves.

Outra importante variável de qualificação de um composto é a Capacidade de Troca de Cátions (CTC) ou a capacidade de adsorver cátions. A CTC é responsável pela retenção de nutrientes, favorecendo a absorção deste pelas plantas, pela estabilização do pH (efeito tampão), pela fixação (quelação ou complexação) de metais pesados (MATOS 2006a; PEREIRA NETO, 2007). Em resíduos orgânicos a CTC origina-se e tem seu valor aumentado com a decomposição do material e, por essa razão, tem sido considerada uma excelente e confiável variável a ser utilizada para monitoramento e comprovação de

maturação desses resíduos. Esse aumento no valor da CTC dos resíduos orgânicos ocorre devido à formação de substâncias húmicas com a decomposição do material. Tais substâncias são colóides eletronegativos de superfície elevada específica e, essas características conjuntamente, proporcionam a esses materiais uma grande capacidade de adsorção de cátions (nutrientes) em seus sítios de troca. Segundo PEREIRA NETO (2007), a CTC de um adubo orgânico pode variar de 100 a 300 $\text{cmol}_c\text{kg}^{-1}$. Segundo KIEHL (1998), citado por MATOS (2006b), um bom composto deverá apresentar CTC de 60 a 80 $\text{cmol}_c\text{kg}^{-1}$. Na turfa, tem-se encontrado valores de 80 a 120 $\text{cmol}_c\text{kg}^{-1}$, enquanto no linhito os valores estão entre 200 e 220 $\text{cmol}_c\text{kg}^{-1}$. Para a matéria orgânica humificada, a CTC pode ser aumentada pela elevação do pH, podendo atingir valores entre 200 a 400 $\text{cmol}_c\text{kg}^{-1}$, tal característica é denominada como cargas dependente de pH. Os valores de CTC comumente encontrados em solos estão na faixa de 3 a 30 $\text{cmol}_c\text{kg}^{-1}$. Entretanto, em países de clima tropical, como o Brasil, que apresenta solos mais intemperizados, os valores estão, normalmente, na faixa de 3 a 15 $\text{cmol}_c\text{kg}^{-1}$ MATOS (2004).

Considerando que a CTC está diretamente ligada a fertilidade de um solo, ou seja, quanto maior a CTC mais fértil é solo, a adição de material orgânico, com elevada CTC, melhora consideravelmente as características de fertilidade nos solos e, em especial, em solos de países de clima tropical, solos ácidos, que são muito intemperizados e pobres. Para esse tipo de solo, ABREU JUNIOR *et al.* (2001) verificaram que a aplicação de 60 tha^{-1} de composto orgânico, feito a partir da fração orgânica de RSU, promoveu um aumento nos teores de cátions trocáveis como potássio, cálcio, magnésio e sódio, em média, de 195%, 200%, 86% e 1200%, respectivamente, e elevação da CTC em 42%.

A relação CTC/%COT (Carbono Orgânico Total) é, também, considerada como indicativa das condições de maturação do composto e, valores acima de 1,7 indicam bom índice de humificação do material orgânico (HARADA & INOKO, 1980). Segundo esses autores, a relação CTC/%COT, é mais confiável que a relação C/N, uma vez que, a última, pode ser afetada, por exemplo, pela maior presença de N amoniacal, tal como ocorre, por exemplo, no caso de esterco de

galinha ou de lodos ativados. Além disso, essa relação pode ser adulterada pela adição de uréia ao composto cru (KIEHL, 1998, citado por MATOS 2006b).

2.9.2. Aspectos Sanitários do Composto Orgânico

O composto orgânico ou composto final, que é o produto da compostagem de resíduos orgânicos deve atender alguns padrões de ordem sanitária e de valor nutricional como adubo visando-se disposição segura no solo.

Uma vez que os resíduos orgânicos são reservatórios de organismos diversos, dentre os quais estão aqueles patogênicos de origem humana, animal ou vegetal, o controle dos parâmetros temperatura e tempo é de fundamental importância no aspecto sanitário. A exposição de microrganismos a altas temperaturas, associadas ao tempo de exposição é o mecanismo mais eficiente do processo de compostagem na eliminação de patógenos e na garantia sanitária do produto final. Na Tabela 2.4, estão apresentados alguns organismos, geralmente presentes na massa de compostagem, com seus respectivos pontos de morte térmica.

Tabela 2.4. Ponto de morte térmica de alguns patogênicos e parasitas comumente encontrados na compostagem:

Organismo	O que ocorre
<i>Salmonella typhi</i>	nenhum crescimento em torno de 46 °C; morte em 30 min a 55 °C a 60 °C.
<i>Salmonella</i> spp	morte dentro de 1 hora a 56 °C; morte dentro de 15 a 20 min a 60 °C.
<i>Shigella</i> spp	morte dentro de 1 hora a 55 °C.
<i>Escherichia coli</i>	a maioria morre dentro de 1 hora a 55 °C; e dentro de 15 a 20 min a 60 °C.
<i>Endamoeda histolytica</i>	ponto de morte térmica a 68 °C.
<i>Taenia saginata</i>	morte dentro de 5 min a 71°C.
<i>Trichinella spiralis</i> (fase larval)	Infectividade reduzida como resultado de exposição por 1 hora a 50 °C. ponto de morte térmica é de 62 °C a 73 °C.
<i>Necator americanus</i>	morte dentro de 5 min a 45 °C.
<i>Brucella abortus ou suis</i>	morte dentro de 3 min a 61 °C.
<i>Micrococcus pyogenes</i>	morte dentro de 10 min a 54 °C.
<i>Mycobacterium tuberculosis</i> (var. <i>hominis</i>)	morte dentro de 15 a 20 min a 60 °C, ou calor momentâneo a 67 °C.
<i>Mycobacterium diptherial</i>	morte dentro de 45 min a 55 °C.

Fonte: GOLUEKE (1977).

Conforme pode ser observado nos dados apresentados na Tabela 2.4, temperaturas na faixa de 55 °C a 60 °C, se mantidas por um tempo médio de 1 hora, é suficiente para eliminar qualquer agente patogênico.

Na Tabela 2.5, estão relacionados o tempo de exposição e a temperatura de inativação para alguns patógenos. Observa-se que o tempo de inativação ou morte do microrganismo, apresentado na Tabela 2.5 é muito superior aos citados na Tabela 2.4, para certos tipos de microrganismos. Isso ocorre porque alguns resultados apresentados na Tabela 2.5 referem-se a ensaios efetuados em condições de reais, enquanto os resultados da Tabela 2.4 se referem a ensaios de laboratório. Nesse sentido, conforme já discutido anteriormente, manter a temperatura média em torno de 55 °C a 60 °C, “em toda a massa de compostagem” e, pelo maior tempo possível, e nunca inferiores aos tempos referentes ao ambiente real sugeridos na Tabela 2.5, é o ideal para garantir a eliminação desses microrganismos.

Tabela 2.5. Temperatura e tempo requeridos para a inativação de patógenos:

Organismo	Tempo de exposição (minutos)					Ambiente
	50 °C	55 °C	60°C	65°C	70 °C	
<i>Salmonella</i>	10.080		2.880			Real
<i>Salmonella</i>			30		4	Laboratório
<i>Shigella</i>	60					Laboratório
<i>Escherichia coli</i>			60		5	Laboratório
<i>Entamoeda histolytica</i>	5					Laboratório
<i>Poliovirus tipo 1</i>			60			Real
<i>Ascaris lumbricoides</i>			240	60		Real
<i>Necator americanus</i>	50					Laboratório
Ovos de <i>Ascaris</i>	60	7				Laboratório
Coliformes Fecais					60	Laboratório
<i>Mycobacteria tuberculosis</i>				20.160	20	Real
Vírus					25	Laboratório

Fonte: PINTO (2001).

GOLUEKE (1975), citado por CORREA *et al.* (2007), mostrou que patógenos humanos sobrevivem mais tempo quando expostos somente a temperaturas entre 55 °C a 80 °C do que quando colocados em contato com microrganismos da compostagem. Sendo assim, os valores apresentados nas Tabelas 2.5 e 2.6 não devem ser tomados indiscriminadamente como referência, pois outros fatores como a competição entre as espécies e a predação tem papel fundamental na eliminação de microrganismos patogênicos. Além disso, fatores como a heterogeneidade do material, o tamanho das partículas, as zonas “mortas” nas leiras de compostagem e a possibilidade real de recontaminação, não permitirão que a eliminação de patógenos ocorra em períodos tão curtos (PEREIRA NETO e LELIS, 2001).

PEREIRA NETO (1988) verificou a necessidade de manutenção de temperaturas termofílicas pelo período mínimo de 16 e 18 dias, para eliminação de *E. coli* e *Salmonella*, respectivamente, no processo de compostagem do lixo urbano e lodo de esgoto por LEA. Resultados diferentes foram encontrados por MERCEDES *et al.* (1991) que observaram ação eficiente da temperatura na eliminação de *Salmonella*, quando da compostagem de lixo urbano por LEA. Os autores ressaltaram que ocorreu a imediata inibição do crescimento desse

patógeno nas zonas da leira onde as temperaturas eram mais elevadas. Por outro lado, esses autores observaram baixa eficiência do processo “Windrow” na eliminação desse microrganismo, creditando às baixas temperaturas obtidas nas camadas superficiais, possibilitando posterior contaminação de todo o material da leira, a razão para a sobrevivência da *Salmonella*.

Outros autores têm citado que não só altas temperaturas são capazes de eliminar os microrganismos patogênicos, mas fatores, tais como condições de pH, umidade, existência de substrato, competição entre microrganismos antagônicos e fatores antibióticos (STENTIFORD, 1992, MERCEDES e PEREIRA NETO, 1993). STENTIFORD *et al.* (1985), verificaram o potencial de sanitização da compostagem, com base na contagem de microrganismos indicadores, observou que, na co-compostagem de lixo urbano e lodo de esgoto, pelo processo de LEA, o critério de sanitização do composto, sugerido por GOTAAS (1956) que é o de manter a temperatura do material em 55 °C por, pelo menos três dias, pode ser facilmente alcançado e, com o mínimo de energia externa. Também na compostagem de animais mortos, tal como já discutido, é recomendável que a temperatura do material na fase termofílica permaneça na faixa de 55 °C a 65 °C, por pelo menos três dias (KENNER e ELWELL, 2003; RITZ e WORLEY, 2005).

Segundo o NATIONAL RESEARCH COUNCIL (2002), o binômio tempo/temperatura, para a redução de patógenos em compostagem de lodos de esgoto, varia segundo o processo. Nesse sentido, NATIONAL RESEARCH COUNCIL (2002) considera que para compostagem em LEA a temperatura de 55 °C deve ser mantida por um mínimo de três dias, enquanto na compostagem em leiras “Windrow” essa mesma temperatura deve ser mantida por, no mínimo, 15 dias.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram conduzidos em duas etapas. A primeira etapa foi conduzida na Área de Armazenamento e no Laboratório de Solo e Resíduos Sólidos do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa e buscou-se definir as proporções adequadas dos materiais da mistura, com exceção da carcaça de frango, em função da menor perda de carga. A segunda etapa contemplou os experimentos de compostagem, a qual foi conduzida na Área Experimental da Hidráulica, Irrigação e Drenagem e Laboratório de Solo e Resíduos Sólidos do Departamento da Engenharia Agrícola e Laboratório de Microbiologia de Alimentos do Departamento de Microbiologia, ambos da Universidade Federal de Viçosa.

Os materiais utilizados nas leiras de compostagem foram cama de frango, bagaço de cana-de-açúcar, palha de café e carcaças de frango. A escolha desses materiais foi em função de sua grande disponibilidade na região. Além disso, a palha de café e cama de frango são utilizadas nas composteiras das granjas de frango visitadas.

As camas de frango foram obtidas de criatórios dos municípios de Canaã e São Miguel do Anta, de granjas integradas à agroindústria localizada na região da zona da mata mineira. Essas camas de frango foram obtidas após ser a palha de café utilizada na cobertura do piso de criatórios das aves. As carcaças de frango vieram de granja localizada na Comunidade do Paraíso, Município de Viçosa, Minas Gerais. O bagaço de cana-de-açúcar foi proveniente de fazenda localizada no Município de Paula Cândido – MG, sendo o resíduo gerado na produção de aguardente.

3.1. Primeira Etapa

Para determinação da proporção entre cama de frango e bagaço de cana-de-açúcar, pelo critério de menor perda de carga para o ar a ser insuflado no material, o primeiro passo foi a obtenção da curva característica dos ventiladores. A curva obtida relaciona a vazão de ar com a pressão exercida pelo ventilador.

Em seguida, utilizou-se um equipamento para a determinação do gradiente de pressão de pressão estática, conforme apresentado na Figura 3.1.



Figura 3.1. Equipamento utilizado na determinação do gradiente de pressão estática.

Na Figura 3.2 está esquematizado o equipamento utilizado na determinação do gradiente de pressão. O equipamento é constituído dos seguintes componentes: (1) coluna de chapa galvanizada, medindo 1,0 m de altura, com seção circular de 0,30 m de diâmetro; (2) tomadas para medição da pressão estática, representadas por sete tubos de cobre (5 mm de diâmetro) distanciados em 0,20 m no sentido vertical, em torno da coluna; (3) piso perfurado, constituído

por chapa com furos circulares; (4) câmara *plenum*, em madeira, de seção quadrada (0,55 x 0,55 m), com 0,33 m de altura; (5) tubo de chapa galvanizada, medindo 1,20 m de comprimento por 0,10 m de diâmetro, responsável pela condução do ar insuflado pelo ventilador até o *plenum*; (6) homogeneizador, para uniformização do fluxo de ar (não usado no presente trabalho); (7) ventilador centrífugo de pás retas, acionado por motor elétrico, com potência de ¼ HP; (7); (8) diafragma fixo à entrada de ar, para possibilitar a variação na vazão.

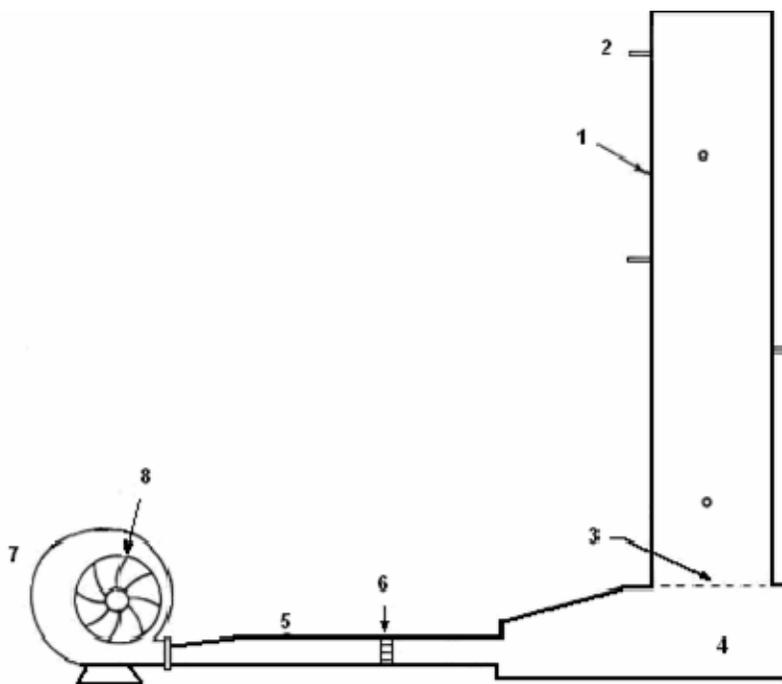


Figura 3.2. Esquema de protótipo utilizado na determinação do gradiente de pressão estática sob diferentes fluxos de ar. Adaptado de Astoni, *et al.* (2007).

O enchimento da coluna de chapa galvanizada foi realizado colocando-se os materiais pré-misturados, até a altura de 1 m, sendo realizadas as medidas de pressão estática nas posições verticais de 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 e 1,0 m, utilizando-se um manômetro digital.

As medições de queda na pressão estática do ar forçado nas pilhas de material foram realizadas com duas repetições, para cada proporção de material, cama de frango e bagaço de cana-de-açúcar. As proporções, volume/volume, avaliadas foram: 20% de bagaço de cana-de-açúcar e 80% de cama de frango, 30% de

bagaço de cana-de-açúcar e 70% de cama de frango e 40% de bagaço de cana-de-açúcar e 60% de cama de frango. Foi analisada a perda de carga somente para a posição de abertura total do diafragma.

Em geral, as medições de queda na pressão estática do ar forçado nas pilhas de material são realizadas utilizando-se vazões de ar proporcionadas por diferentes aberturas do diafragma. Este procedimento permite, a partir de um mesmo ventilador, testar diferentes vazões de ar (diferentes potências de motor) associadas a diferentes perdas de carga. Isto permite uma otimização, eficiência e custo, do sistema de ventilação. Entretanto, no presente trabalho, como já se possuíam os equipamentos (motores e ventiladores) as potências dos motores já estavam definidas e, portanto não justificava variar as vazões.

3.2. Segunda Etapa

Como os processos de compostagem avaliados foram o da composteira e de LEA, com aeração forçada positiva, estruturas específicas tiveram de ser construídas para a condução de cada ensaio.

A composteira foi construída com 1,5 m x 1,5 m de área e 2,10 m de altura. Para a realização dos experimentos com leiras estáticas aeradas foi construída uma área coberta e fechada de aproximadamente 72 m². Além disso, foi construído um pátio a céu aberto com, aproximadamente, 60 m², para a fase de maturação do composto.

Composteira

A composteira foi construída com uma área e altura útil de 1,5 x 1,5 m² de 1,5 m, respectivamente.

As proporções dos materiais (cama de frango, bagaço de cana-de-açúcar, carcaça de frango e água) utilizados na montagem da composteira seguiram as recomendações de PEDROSO-DE-PAIVA (2004) e HENRY (2003), tendo sido

utilizados 0,3 kg de bagaço de cana-de-açúcar ou palha de café para cada 1 kg de carcaça de frango e 2 kg de cama-de-frango.

A composteira foi montada com 3 camadas de carcaças de frango assim distribuídas: 1ª 28 kg de carcaça; 2ª 28 kg de carcaça e 3ª 27 kg de carcaça, totalizando 83 kg de carcaças.

Na Figura 3.3 está apresentado detalhe da montagem da 1ª camada.



Figura 3.3. Aspecto visual da primeira camada de carcaças na composteira.

A seqüência de montagem está esquematizada na Figura 3.4, pode ser assim descrita:

- 1 – camada de 30 cm de cama de frango seca foi colocada no fundo da composteira, não tendo sido este material umedecido;
- 2 – camada de 15 cm de palha de café foi sobreposta à anterior, com o objetivo de servir como fonte de carbono e proporcionar melhor aeração das carcaças das aves;
- 3 – adicionou-se uma camada de carcaças. As aves foram dispostas num espaçamento de, aproximadamente, 10 cm umas das outras, além disso, foi

deixado um espaço de, aproximadamente, 20 cm entre as carcaças e a parede da composteira;

- 4 – cama de frango foi colocada em cobertura às carcaças, tomando-se o cuidado de haver a formação de uma camada de, pelo menos, 5 cm de material sobre as carcaças;
- 5 – adicionou-se água (o equivalente a 20% do massa das carcaças) sobre o material, para umedecê-lo;
- 6 – repetiu-se essa sequência até ser colocada a última camada de aves. Cobriu-se, então, a pilha de material com uma camada dupla de cama de frango seca.

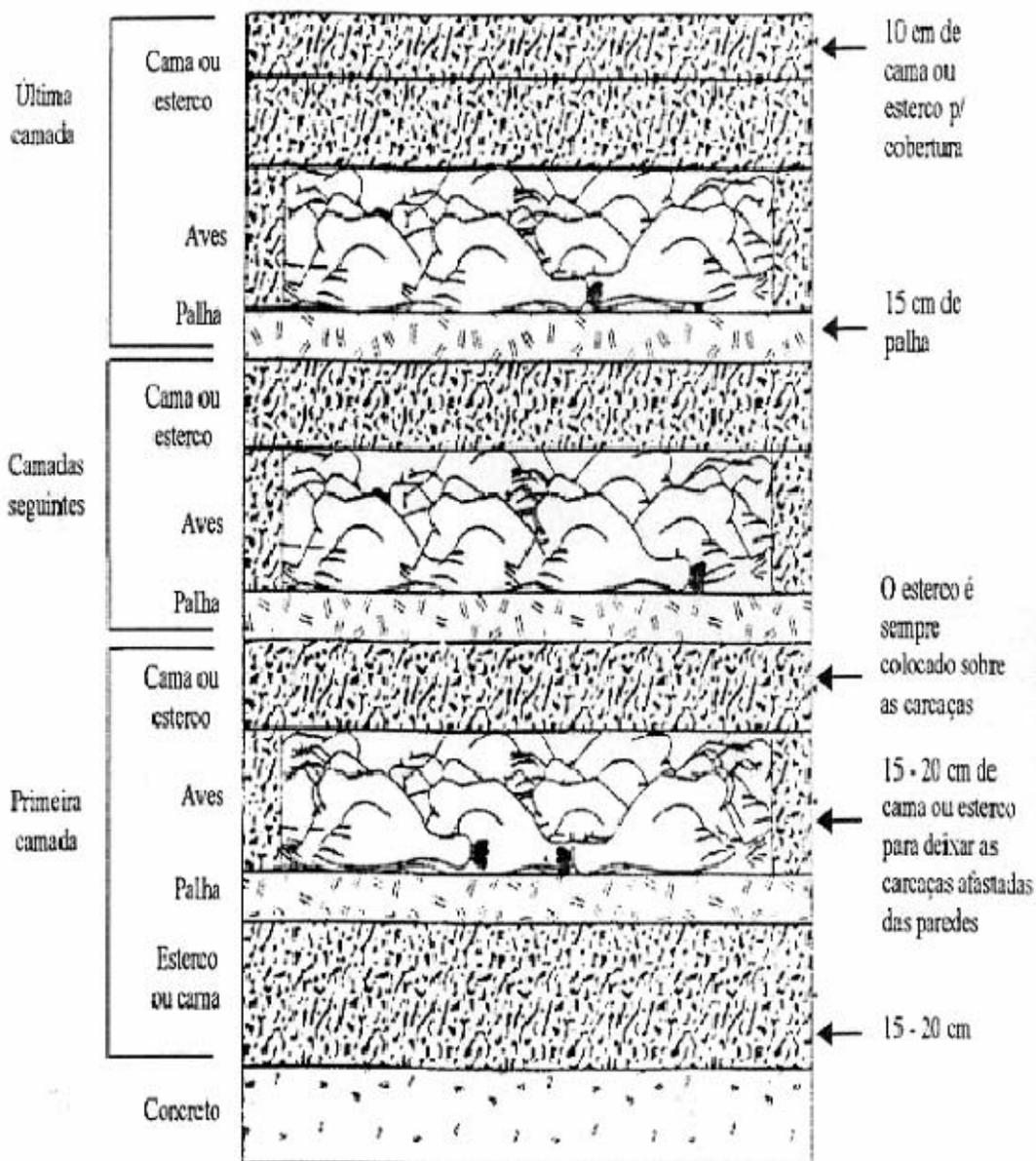


Figura 3.4. Seqüência de montagem e formação da estrutura da composteira.

O método de processamento do material mantido na composteira seguiu o que tem sido recomendado pela agroindústria da região e executados pelos produtores integrados visitados. O material permaneceu da forma como foi colocado na composteira, por um período de 60 dias após a confecção da última camada de material e feito o “fechamento” da composteira, não sendo submetido a qualquer intervenção. Após este período, o material foi considerado pronto, sendo retiradas amostras para serem submetidas às análises laboratoriais, visando-se à caracterização do material produzido.

Leiras estáticas aeradas

Três Leiras Estáticas Aeradas (LEA), sendo que cada LEA contou com um ventilador centrífugo (motor elétrico de $\frac{1}{4}$ HP de potência) de funcionamento controlado por timer analógico (precisão de 15 minutos) e termostato digital (precisão de $0,1$ °C). As leiras foram montadas com seção transversal trapezoidal (LEA 01) e triangular (LEA 02 e 03) com medidas aproximadas de 2 m de base maior, 1,5 m de base menor (LEA 01) e 1 metro de altura e comprimento de 3 m. Ligado ao ventiladore, foi instalada uma tubulação modulada, em aço galvanizado, e cuja parte responsável pela aeração das leiras possui um formato triangular (com base = 10 cm e altura = 10 cm) e furos de $\frac{1}{8}$ " de diâmetro, uniformemente distribuídos (Figura 3.5).



Figura 3.5. Conjunto utilizado para aeração das leiras.

Para evitar entupimento dos furos dos dutos de aeração e melhorar a distribuição do ar na massa em compostagem, colocou-se com uma camada de cobertura, de 10 cm, de brita 1 sobre os dutos (Figura 3.6).



Figura 3.6. Detalhamento da camada de brita colocada sobre o duto de aeração e, ao fundo observa-se o duto interligado ao ventilador.

A LEA 01 foi composta por carcaças de frango inteiras, cama de frango e bagaço de cana-de-açúcar, na proporção definida nos experimentos conduzidos na primeira etapa (40% de bagaço e 60% de cama-de-frango, em volume) e tal como o definido para preenchimento da composteira (Figuras 3.7 e 3.8), exceto que a cama de frango e o bagaço de cana-de-açúcar foram pré-misturados. Essa leira foi montada com cerca de 193 kg de carcaça de frango, totalizando cerca de 635 kg de material a ser compostado.



Figura 3.7. Aspecto visual da disposição das carcaças de frango na Leira 01, durante a sua montagem.



Figura 3.8. Aspecto visual da leira 01, depois de concluída a sua montagem.

A LEA 02 foi composta por carcaças de frango trituradas, cama de frango e bagaço de cana-de-açúcar e a LEA 03 foi composta por carcaças de frango trituradas, cama de frango e palha de café, nas proporções já definidas, sendo que a proporção de palha de café foi à mesma definida para o bagaço de cana-de-açúcar. A trituração das carcaças foi feita colocando cerca de 10 a 15 carcaças inteiras em um equipamento apropriado para esse fim denominado “Cutter”. Após colocadas as carcaças o equipamento era ligado e, então, através do giro simultâneo da hélice e da bacia, as carcaças eram trituradas. O procedimento era interrompido quando o material apresentava uma consistência pastosa, com aparência uniforme de carne moída. O “Cutter” utilizado é constituído de uma bacia giratória e uma hélice fixa, movido por motor trifásico. A Figura 3.9 mostra o equipamento utilizado na trituração das carcaças, bem como o aspecto visual pastoso das carcaças de frango trituradas.



Figura 3.9. Detalhe das carcaças de frango, ao serem trituradas em moedor industrial, para serem adicionadas ao material a ser compostado nas leiras 02 e 03.

A LEA 02 foi montada com cerca de 145 kg de carcaça de frango triturado, totalizando cerca de 480 kg de material a ser compostado (Figura 3.10). e a LEA 03 foi montada com cerca de 167 kg de carcaça de frango, totalizando cerca de 550 kg de material a ser compostado (Figura 3.11).



Figura 3.10. Detalhe da Leira 02, posicionada ao centro, depois de concluída a sua montagem.



Figura 3.11. Detalhe da Leira 03, em primeiro plano, depois de concluída a sua montagem.

De forma sucinta e genérica, a montagem das leiras foi conduzida da seguinte forma:

Leira 01:

- 1 – Colocou-se 45 cm da mistura de cama-de-frango e bagaço de cana-de-açúcar no na base da leira, para que cobrisse completamente os dutos de aeração, sendo que este material não foi umedecido;
- 2 – Sobre essa camada foi adicionada uma camada de carcaças de frango. Procurou-se colocar as aves uma ao lado da outra, sem que houvesse sobreposição, além de deixar um espaço de aproximadamente 20 cm entre as carcaças e a parte externa da leira;
- 3 – Cobriu-se as carcaças com a mistura de cama de frango e bagaço-de-cana. Procurou-se deixar uma camada de pelo menos 15 cm dessa mistura sobre as carcaças;

- 5 – Adicionou-se água para umedecer a superfície na quantidade equivalente a 20% da massa das carcaças;
- 6 – Após ser colocada a última camada de aves na leira esta foi coberta com uma camada de 15 cm da mistura de cama de frango e bagaço de cana-de-açúcar.

Leira 02 e 03:

As leiras 02 e 03, compostadas com frango triturado, foram montadas segundo os critérios utilizados para resíduos sólidos orgânicos convencionais. Os materiais da mistura a ser compostada foram previamente misturados, segundo proporções pré-definidas. Depois de pré-misturados foram construídas as leiras de forma a se obter a seção transversal com as dimensões já descritas. A quantidade de água utilizada foi correspondente a 20% do peso das carcaças.

Após a montagem das leiras, nos primeiros 35 dias, as leiras foram cobertas com tela de mosquiteiro, com a finalidade de evitar o contato de moscas com o material, evitando assim a ovoposição e a proliferação desses insetos.

Neste trabalho inicialmente, seguiram-se as recomendações de PINTO (2001) citado por ASTONI *et al.* (2007), que considera ventiladores de 0,5 a 2 HP com potência suficiente para atender as necessidades de ar de $1200 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ t}^{-1}$ seca de material orgânico em compostagem. Com base nestes valores, concluiu-se que, para uma massa de 0,5 t de material e, funcionando com intermitência de 15 minutos do sistema de aeração teria que ser fornecida uma vazão de 150 m^3 de ar.

Segundo dados obtidos na curva do ventilador, conforme descrito no item anterior, a máxima vazão fornecida pelo ventilador é de $450 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, com isso, para aeração de leiras de 0,5 t de material, a cada 15 minutos, a volume de ar a ser fornecido deveria ser de 112 m^3 .

O equipamento de controle de aeração foi constituído de um temporizador ("timer") e um sistema em "feedback" (para o controle da temperatura). O equipamento funcionou da seguinte maneira: no centro da leira, foi colocado uma sonda-controle ligada a um timer digital. Este aparelho comandou o funcionamento

do ventilador, por meio do estabelecimento de uma temperatura máxima de controle, no caso do funcionamento em "feedback". A sonda controle registrava, instantaneamente, qualquer alteração de temperatura no interior da leira. Dependendo da temperatura registrada, o ventilador entrava em funcionamento se até que a temperatura se tornasse menor que a temperatura máxima pré-estabelecida. A faixa de trabalho do termostato é $T \pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$, onde T é a temperatura pré-estabelecida.

A temperatura de controle (temperatura máxima), inicialmente utilizada em todos os experimentos, foi de $65 \text{ }^\circ\text{C}$. Entretanto, devido a problemas operacionais, verificou-se que a temperatura do material em compostagem não atingia esse valor, então a temperatura de controle foi aumentada gradualmente, da seguinte forma: 1º dia – $30 \text{ }^\circ\text{C}$, 2º dia – $40 \text{ }^\circ\text{C}$, 3º dia – $50 \text{ }^\circ\text{C}$, 4º dia – $60 \text{ }^\circ\text{C}$ e, a partir do 5º Dia, $65 \text{ }^\circ\text{C}$. Estes valores foram definidos com base em experiências de AZEVEDO (1993). Além disso, estes valores se enquadram na faixa de $40 \text{ }^\circ\text{C}$ a $60 \text{ }^\circ\text{C}$ para os três primeiros dias, indicativo de equilíbrio do sistema (PEREIRA NETO, 2004).

Ainda com relação ao controle de aeração do sistema, tomando-se por base a temperatura de controle, um terceiro método de controle foi avaliado. Este método consistiu em: depois de feita a correção do conteúdo de água no material, deixar que a temperatura da leira se elevasse ao máximo que esta conseguisse, sem, contudo deixar que se excedesse os $65 \text{ }^\circ\text{C}$. Este método, juntamente com o sistema de umedecimento do ar implantado (Figura 3.12), evitou o ressecamento da leira e permitiu a manutenção de temperaturas na faixa termofílica por maior período de tempo.

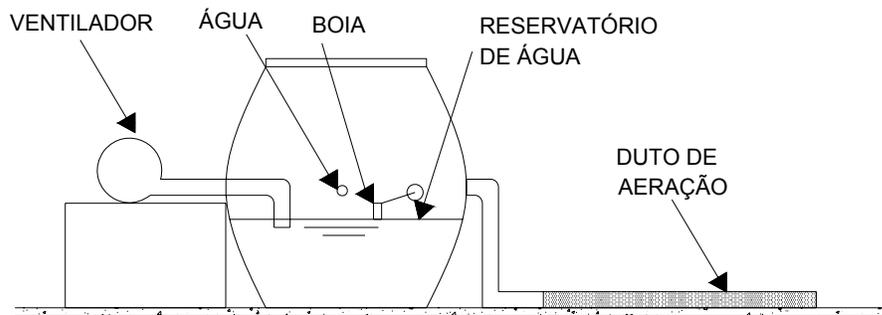


Figura 3.12. Esquema do sistema de umedecimento das leiras.

Considerou-se findada a fase ativa de degradação do material orgânico, quando a relação C/N do material alcançou valores inferiores a 18/1 e/ou a temperatura das pilhas fiquem menor que 40°C. Depois de findada a fase ativa de degradação do material, as leiras aeradas foram desmontadas, tendo sido o material transportado para pátio de estabilização de material orgânico do Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental do Departamento de Engenharia Civil. Nesse local, o material recebia água, nas quantidades adequadas e quando necessário, e era semanalmente revirado. Considerou-se a relação C/N em torno de 10/1, como indicativo de estabilização do material, conforme sugerido por KIEHL (1985) e ou a relação CTC/%COT > 1,7 (HARADA & INOKO, 1980).

Os experimentos da composteira e LEA foram montados de uma só vez utilizando, utilizando-se o total de aves mortas em um único dia, de granja integrada a agroindústria da região da zona da mata mineira.

O período de realização das duas etapas da pesquisa foi de julho de 2007 a janeiro de 2008.

As amostras de material para serem executadas as análises físicas, físico-químicas, químicas e bacteriológicas foram coletadas da seguinte maneira:

Na matéria-prima

As amostras retiradas da cama de frango, bagaço de cana-de-açúcar e palha de café foram coletadas aleatoriamente, em vários pontos de uma

determinada massa do material, a fim de que fosse obtida uma amostra representativa do mesmo. As amostras pesavam, aproximadamente, 1kg.

Na amostragem de frango, foram utilizados dois critérios. Para a composteira e LEA 01, que utilizaram frangos inteiros, foram tomados frangos, em diferentes estágios de crescimento, e retiradas as tripas desses animais. Essas tripas foram compostas com uma proporção de cama-de-frango para se ter uma amostra composta. Para as LEA 02 e 03, após os frangos serem triturados, foram coletadas amostras desse material e misturado com cama de frango. Da massa produzida, foram retiradas amostras. Para serem realizadas as análises bacteriológicas, foram obtidas amostras compostas a partir de amostras de cama de frango e de carcaças de frango (tripas). Esta amostragem se fundamentou na afirmação de TORTORA *et al.* (2000), que diz que as fontes de bactérias são os tratos intestinais de muitos animais, dentre estes os frangos.

Na massa em compostagem

Nas LEA foram retiradas amostras, em diferentes pontos da leira, e depois misturadas a fim de se obter amostras compostas representativas, sendo que estas amostras foram coletadas durante a fase ativa, em cerca de oito pontos, ao longo do comprimento de toda leira. Nessa amostragem, tomou-se o cuidado de se obter amostras de material da base, centro e topo das leiras. A Figura 3.13 apresenta, de maneira esquemática, os pontos de coleta das amostras.

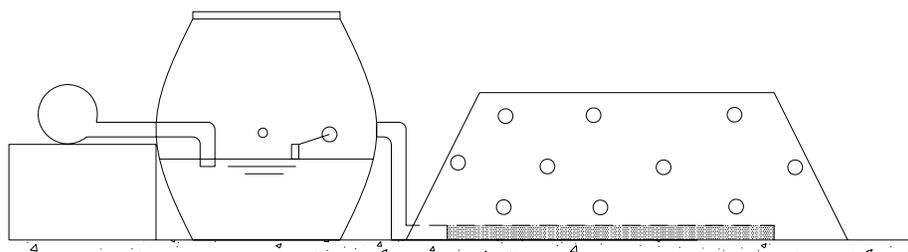


Figura 3.13. Vista longitudinal, em elevação – Esquema de amostragem das leiras.

Na composteira, foram definidos doze pontos de amostragem, distribuídos ao longo da altura das camadas (Figura 3.14.).



Figura 3.14. Pontos de amostragem e de determinação de temperatura na composteira.

A partir daí, com o uso de um amostrador feito de um tubo de PVC de $\frac{3}{4}$ " de diâmetro foram coletadas amostras compostas, em períodos pré-definidos. A Figura 3.15 apresenta um detalhe do amostrador de PVC, com ponta biselada, juntamente com uma amostra já coletada e acondicionada em saco plástico, hermeticamente fechado, para análise.



Figura 3.15. Detalhe do amostrador, em tubo de PVC de $\frac{3}{4}$ ", utilizado para a coletar amostras na composteira, juntamente com uma amostra já coletada e acondicionada para análise.

Monitoramento

O monitoramento dos experimentos foi realizado por meio de análises físicas; físico-químicas, químicas e bacteriológicas, além de observações de cor, odor e atração de vetores, realizadas durante todo o período de compostagem.

O monitoramento teve início no dia em que a leira foi montada, denominado como o dia zero, prosseguido durante a primeira fase do processo (fase ativa) e a fase posterior de maturação. Para a composteira, todas as análises foram feitas a cada 20 dias (1º estágio) e a cada 30 dias (2º estágio). Para as leiras todas as análises foram feitas a cada 15 dias (fase ativa) e 30 dias (fase de maturação). O monitoramento da umidade foi programado para ser semanal, mas teve que ser realizado levando em consideração o ressecamento ou encharcamento das leiras.

A temperatura foi medida diariamente, em três pontos situados na base, centro e topo das leiras e da composteira, durante todo o período de compostagem (fase ativa). Na Figura 3.16 está mostrado o posicionamento das sondas de temperatura na seção longitudinal das leiras de compostagem por aeração forçada, bem como na composteira.

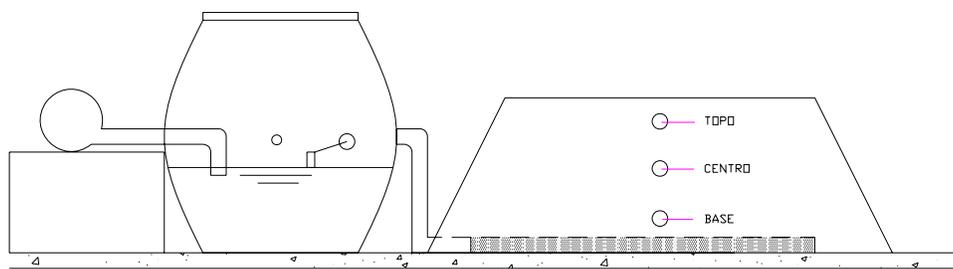


Figura 3.16. Posicionamento das sondas de temperatura – Perfil longitudinal.

As medições de temperatura foram realizadas com a utilização de sondas (tipo termopar), constituídas de bambu ou aço inoxidável. A leitura das temperaturas foi feita com o auxílio de um termômetro digital, no período de 16:30 às 17:30 de cada dia.

A quantificação do conteúdo de água foi realizada segundo as recomendações de KIEHL (1985), sendo a amostra levada à estufa, sob temperatura entre 60 e 65 °C, por 24 horas. Retirada, colocada em dessecador para resfriar e depois pesada. Posteriormente, essa amostra foi levada à estufa a 105 °C por 1 hora e depois retirada colocada em dessecador para resfriar e pesada. O procedimento de levar a estufa a 105 °C por 1 hora e depois pesar foi executado até a constância da massa.

O teor de sólidos voláteis foi obtido a partir da queima do material em mufla, sob temperatura de 550 °C, por 2 h (KIEHL, 1985). O carbono orgânico facilmente oxidável foi quantificado utilizando-se metodologia adaptada do processo Walkley-Black (DEFELIPO, 1997). O pH das amostras foi determinado em suspensão aquosa e também em CaCl₂, tal como descritos por MATOS (2006b). A análises de nitrogênio total foram feitas utilizando-se o método Kjeldahl (STANDARD

METHODS 1998). Para análise do fósforo disponível, utilizou-se o método colorimétrico (EMBRAPA, 1997). O potássio e o sódio foram quantificados por fotometria de chama, (STANDARD METHODS, 1995).

As análises bacteriológicas foram realizadas no Laboratório de Microbiologia de Alimentos da UFV e as análises consistiram na verificação de presença ou ausência de Salmonella e Coliformes termotolerantes em quantidades inferiores a 10^3 , com base no NMP por grama de Sólidos Totais, de acordo com a IN62 de 26 de agosto de 2003, Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Método da Composteira

4.1.1. Requerimento de Oxigênio/Taxa de Aeração

O suprimento de oxigênio foi feito, nas camadas do material da composteira, por aeração passiva ou natural, possibilitada pela presença, na massa de compostagem, de materiais estruturantes como a palha de café, utilizada neste trabalho com a finalidade de conferir maior porosidade, à massa em compostagem. Em razão da ocorrência apenas de aeração natural, a oxigenação do material é, geralmente, deficiente, principalmente à medida que o processo avança e vai ocorrendo a compactação natural do material. No caso da compostagem de animais mortos, caracterizada por apresentar uma zona de anaerobiose no entorno das carcaças, a demanda de oxigênio é muito superior àquela proporcionada pela aeração natural.

4.1.2. Temperatura

A temperatura do material mantido na composteira aumentou, rapidamente, na fase inicial do processo, atingindo 60 °C já no segundo dia após o fechamento da composteira. Atingiu o pico de 82 °C, no centro da pilha no 4º dia e se manteve acima de 55 °C, em todos os pontos monitorados, por quatro dias. As temperaturas da base (1ª camada de carcaça de frango) e centro (2ª camada de carcaça de frango) se mantiveram acima de 55 °C por, aproximadamente, sete dias, enquanto a temperatura do topo (3ª camada de carcaça de frango) por

quatro dias. Como pode ser observado, a partir do 4º dia, quando a temperatura atingiu o seu pico nos três pontos monitorados, ela foi decrescendo gradativamente até atingir a temperatura próxima da ambiente. Esse comportamento está apresentado na Figura 4.1, e pode ser explicado conforme descrito a seguir:

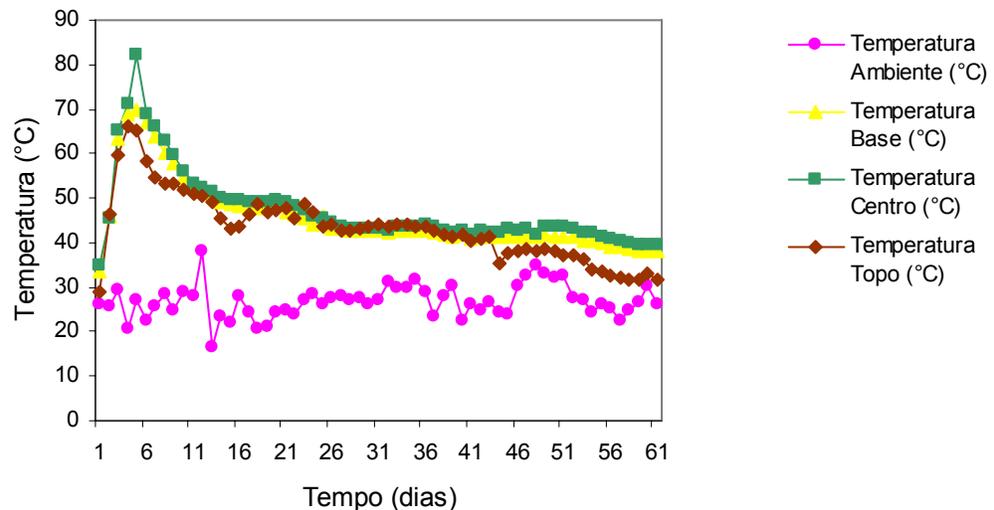


Figura 4.1. Variação da temperatura em função do tempo de compostagem. (1º estágio).

- A elevação inicial da temperatura no processo se deve às condições favoráveis (conteúdo de água adequado e grande disponibilidade de substratos de fácil degradação) para a ação dos microrganismos.
- Após o pico de temperatura, ocorrido no 4º dia de compostagem, observou-se decréscimo na temperatura do material, nos três pontos monitorados, porém de maneira diferenciada. A temperatura do topo pode ter sido afetada pela proximidade com a atmosfera e, portanto, com a temperatura ambiente favorecendo um gradiente de temperatura no sentido de dentro para fora e o fato de estar esta camada de material mais sujeita à perda de água.
- As temperaturas no interior da massa (centro e base) tiveram decréscimo menos acentuado, provavelmente devido às condições isolantes do material associadas à distância destes pontos em relação à

superfície da massa, que possui temperatura ambiente. Além disso, devido ao conteúdo de água ter se mantido em valores adequados por maior período de tempo;

- Ao final dos 60 dias, fim do 1º estágio, observou-se que a temperatura da massa, nas três profundidades monitoradas, se manteve praticamente, uniforme. Observou-se tendência da temperatura da massa do material em compostagem em entrar em equilíbrio com a temperatura ambiente.

A temperatura máxima citada pela literatura para esse processo é em torno, de 71 °C (HENRY, 2003, MUKHTAR *et al.* 2004), podendo alcançar 76 °C (PEDROSO-DE-PAIVA, 2004). KUBE (2002), citado por MUKHTAR *et al.* (2004), relatou que, em compostos nos quais a temperatura ficou acima de 65 °C, a atividade microbiana foi diminuída e acima de 71 °C foi interrompida. Esse fato pode explicar a queda brusca na temperatura, após ser atingido o pico de 82 °C. COSTA *et al.* (2005; 2006), avaliando quatro sistemas de compostagem, observou temperaturas máximas em torno de 60 °C, no primeiro estágio.

A temperatura do material mantido na composteira, em todos os pontos monitorados, ficou acima de 55 °C por apenas quatro dias, enquanto que MUKHTAR *et al.* (2004) relataram que a maioria dos pesquisadores acredita que essa temperatura deva permanecer na faixa de 55 °C a 60 °C, em todo composto, por uma a duas semanas. A permanência da temperatura nessa faixa, por tão pouco tempo, pode ser devido ao baixo conteúdo de água do material, durante o processo, uma vez que, procurando-se repetir os mesmos procedimentos recomendados aos avicultores, pela agroindústria da região, não houve verificação se o conteúdo inicial de água encontrava-se dentro da faixa recomendada pela literatura, que varia entre 40 e 60 dag kg⁻¹ (HENRY, 2003, MUKHTAR *et al.*, 2004, PEDROSO-DE-PAIVA, 2004). Entretanto, para eliminação adequada de patógenos, a literatura consultada recomenda que a temperatura do centro da pilha deva alcançar e se manter em torno de 65 °C por um período de um a três dias apenas (KEENER & ELWELL, 2003, MUKHTAR *et al.*, 2004). O fato de a temperatura no centro ter permanecido superior a 65 °C por cinco dias (Figura

4.1), pode ter contribuído para uma adequada eliminação dos patógenos monitorados no 1º estágio de degradação.

O comportamento da temperatura no segundo estágio está apresentado na Figura 4.2. Foi observado que a temperatura no segundo estágio alcançou picos de 71 °C. COSTA *et al.* (2005; 2006) obtiveram temperaturas máximas de, aproximadamente, 66 °C no segundo estágio (reviramento) de compostagem. A diferença nas temperaturas observadas neste trabalho em relação a esses autores pode ter várias explicações, dentre as quais, cita-se a manutenção do conteúdo de água na faixa adequada por um maior período de tempo, a relação C/N e a degradabilidade dos materiais compostados.

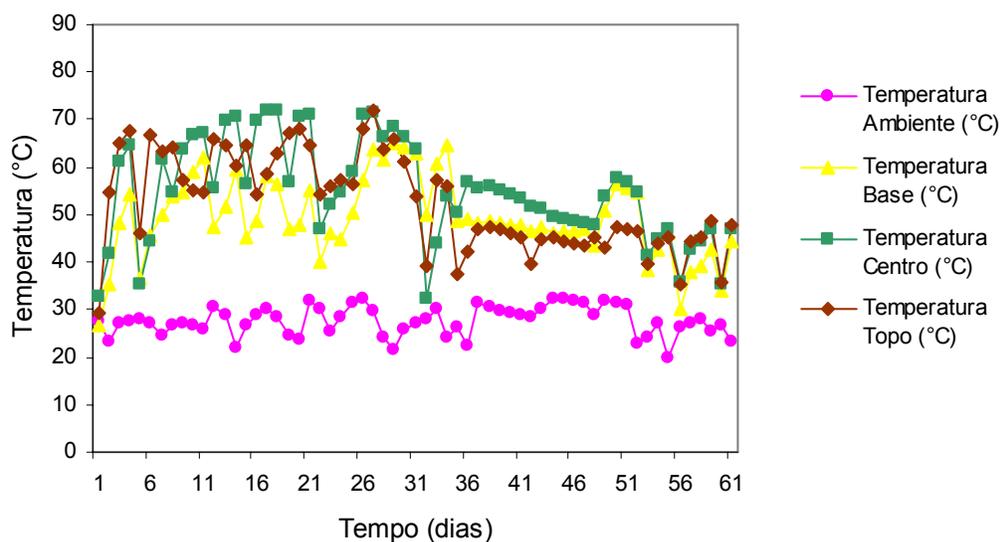


Figura 4.2. Variação da temperatura em função do tempo de compostagem. (2º estágio – “Windrow”).

O novo aumento na temperatura do material observado no 2º estágio da compostagem indica que fatores ambientais (notadamente o conteúdo de água e a oxigenação) estariam condicionando o processo de degradação do material dentro da composteira. A remoção do material da composteira, a adição de água e o reviramento periódico permitiram que substratos de fácil degradabilidade fossem transformados com geração de energia, retomando-se, de certa forma, a fase termofílica.

Se no 1º estágio de degradação o período de altas temperaturas no material pode ser considerado curto, as altas temperaturas alcançadas pelo material no 2º estágio podem ter complementado o período necessário de altas temperaturas, indispensável para que se alcançasse a eliminação dos patógenos presentes no material.

4.1.3. Conteúdo de Água

O conteúdo de água inicial, calculado por balanço de massa, em relação à massa total da composteira, foi de 24 dag kg⁻¹, em base úmida (b.u.), ou 39 dag kg⁻¹, em base seca (b.s.). Esse conteúdo de água está abaixo do que é considerado crítico, na qual a atividade microbiana fica prejudicada, que é em torno de 35 dag kg⁻¹ (b.u.) (PEREIRA NETO, 2004; FIALHO *et al.*, 2005) e, muito aquém da considerada ideal, 40 a 60 dag kg⁻¹ (HENRY, 2003, MUKHTAR *et al.*, 2004, PEDROSO-DE-PAIVA, 2004). Entretanto, esse conteúdo corresponde ao valor médio obtido de amostra coletada de toda a leira colocada na composteira. Como o material da composteira ficou estratificado, um valor global não faz sentido.

Verificou-se que, nessa primeira fase, a degradação do material ocorreu, basicamente, no entorno das carcaças de frango, numa faixa de, aproximadamente 30 cm, onde o conteúdo de água foi de 52 dag kg⁻¹ e, portanto, dentro da faixa ideal. Após 40 dias de compostagem, o conteúdo de água na região das carcaças estava em 18,12 dag kg⁻¹, próximo aos valores considerados mínimos para atividade microbiológica que, segundo GOLUEKE (1977), está entre 12 a 15 dag kg⁻¹. Como o conteúdo de água não foi corrigido, no primeiro estágio, que durou 60 dias, houve decréscimo na atividade microbiológica e, por conseqüência, na temperatura bem antes do período recomendado pela literatura para eliminação de patógenos. Este fato mostra a necessidade da correção do teor de água do material ao longo do processo para que este se mantenha em níveis satisfatórios, não dependendo tanto do 2º estágio para a continuidade da degradação da matéria orgânica mais lábil.

No 2º estágio, os reviramentos periódicos e adequação do conteúdo de água do material (a cada três dias nos primeiros 30 dias e a cada cinco dias nos dias seguintes), buscando-se mantê-lo em torno de 55 dag kg^{-1} , foram decisivos para que se alcançasse degradação adequada do material.

4.1.4. pH

Os valores de pH encontrados no experimento da composteira estão apresentados na Tabela 4.1, estando o comportamento dessa variável, em função do tempo de compostagem, apresentado na Figura 4.3. Segundo relatado pela literatura consultada e, descrito anteriormente, o pH é uma variável indicativa do grau de estabilização e maturação do material compostado.

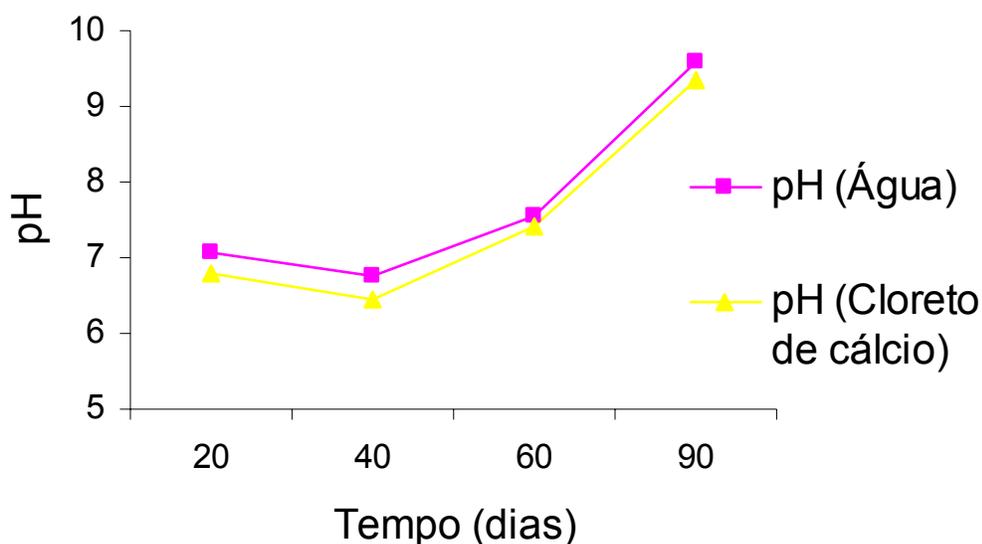


Figura 4.3. Variação do pH no material em função do tempo de compostagem – Composteira.

O pH em água indica a acidez ativa ou a atividade de íons H^+ na solução do composto e o pH em cloreto de cálcio (CaCl_2) a acidez trocável. Esse último, além de quantificar os íons H^+ na solução, quantifica também aqueles adsorvidos no complexo de troca, o que muitas vezes é mais importante e significativo que a

medição apenas em solução. O pH em CaCl_2 , apesar de pouco utilizado nas pesquisas e monitoramento de experimentos de compostagem de resíduos sólidos, é o método oficial, adotado pelo Ministério da Agricultura, para caracterização de material orgânico, incluindo-se entre eles compostos orgânicos, a serem comercializados como fertilizantes agrícolas (MATOS, 2006a).

O valor encontrado para pH em CaCl_2 , já na primeira medição, efetuada aos 20 dias de compostagem do material, atenderia a exigência do Ministério da Agricultura quanto ao valor mínimo de pH CaCl_2 de 6, para comercialização de um composto orgânico. Além disso, pode ser observado que, com o passar do tempo de compostagem do material, o valor do pH CaCl_2 se manteve inferior ao do pH H_2O . Isto ocorre porque o pH em CaCl_2 pode ser considerado como o pH H_2O + ΔpH função dos íons H^+ adsorvidos no complexo de troca da matéria orgânica.

Conforme, descrito anteriormente, a faixa de pH em que ocorre maior degradação do material orgânico é a de 5,5 a 8,0 e a faixa do composto final é de 7,5 a 9,0. De acordo com a literatura, o valor de pH H_2O de 9,58, obtido na última medição (90 dias), se encontra próximo ao limite superior considerado adequado para um produto final estabilizado.

Os valores do pH H_2O de 9,58 e do pH CaCl_2 de 9,35 podem ser considerados altos, devendo ter contribuído para retardar o processo de degradação do material orgânico, favorecendo a formação de gás amônia, o qual pode ser perdido por volatilização. KUMAR *et al.* (2007) encontram no composto final, em experimentos semelhantes, valores de pH H_2O na faixa de 8,20 a 9,34. Os autores atribuíram esse fato à grande formação de sais de amônio provenientes da cama de frango. COSTA *et al.* (2005 e 2006) encontrou no seu composto final valor de pH H_2O de 7,9 e 7,63, respectivamente. Enquanto SILVA *et al.* (1998), citados pelos mesmos autores, encontraram pH CaCl_2 de 7,1.

Tabela 4.1. Parâmetros Avaliados:

Experimento	Dias	C/N	CFO	N	P	K	Na	SV	pH		CTC	COT	CTC/C
			-----dag kg ⁻¹ -----						%	H ₂ O	CaCl ₂	cmolc kg ⁻¹	dag kg ⁻¹
COMPOSTEIRA	0	19.16	69.03	3.60	1.47	2.20	0.47	82.72	-	-	-	45.96	-
	20	9.6	28.41	2.95				81.86	7.06	6.80	-	45.48	-
	40	13.3	29.90	2.33				83.78	6.77	6.44	-	46.54	-
	60	27.56	33.07	1.2				74.73	7.55	7.42	175	41.52	4.22
	90	22.71	29.26	1.3				65.46	9.58	9.35	209	36.37	5.75
LEA 01	0	13.79	67.74	4.91	1.98	1.71	0.58	86.04	-	-		47.80	
	15	5.8	29.26	5.08				82.86	6.32	6.00		46.03	
	30	8.9	30.59	3.46				74.73	8.59	8.39		41.52	
	45	9.3	29.00	3.11				65.46	9.31	8.12	192	36.37	5.28
	60	17.9	26.87	1.5				61.76	8.59	8.39	180	34.31	5.25
	90	18.1	25.44	1.4				60.68	9.15	9.04		33.71	
LEA 02	0	13.79	67.74	4.91	2.39	2.42	0.77	86.04	-	-		47.80	
	15	9.0	16.47	1.84				75.50	7.45	7.32		41.94	
	30	8.9	27.71	3.07				67.90	9.15	8.64	196	37.72	5.20
	45	8.4	26.59	3.15				67.30	9.01	8.32	192	37.39	5.14
	60	15.13	23.53-	1.61				55.60	8.57	8.53	215	30.89	6.96
	90	14.62	25.40	1.68				61.21	9.25	9.17	197	34.01	5.79
LEA 03	0	13.55	68.30	5.04	2.12	2.63	0.67	86.06	-	-		47.81	
	15	8.4	20.52	2.45				80.92	7.04	6.84		44.96	
	30	7.5	28.09	3.75				72.91	9.04	8.58	183	40.51	4.52
	45	8.0	28.59	3.57				61.27	9.27	8.75	198	34.04	5.82
	60	17.77	30.36	1.72				63.16	9.14	8.98		35.09	
	90	17.38	27.8	1.6				39.17	8.94	8.75	212	21.76	9.74

1 – As relações C/N iniciais foram calculados através de balanço de massas, sendo os demais valores calculados por amostragem. . Esses valores foram determinados com base no CFO (Carbono Facilmente Oxidável).

2 – Os parâmetros P, K e Na são teores totais médios obtidos de amostras de 90 dias.

3 – COT determinado pelo método da ignição (KIEHL, 1985) e CTC/COT é o parâmetro proposto por HARADA & INOKO (1980).

4.1.5. Sólidos Voláteis (SV)

Esta variável é indicativa do teor de matéria orgânica nos materiais da mistura. A forma como ocorre a sua evolução ao longo do processo de compostagem permite inferir sobre o grau de estabilização do material, pois sua redução gradativa indica a transformação da matéria orgânica compostável em matéria mineralizada, conhecida como sólidos fixos e, principalmente, a transformação da matéria orgânica em dióxido de carbono e água.

Os valores de SV estão diretamente ligados às variações nas concentrações de COT, bem como à redução de massa ao longo do processo de compostagem. Na revisão de literatura feita, não foi encontrado o uso dessa variável na compostagem de carcaças de aves. Sendo assim, para efeito de comparação serão utilizados os valores de compostagem de resíduos orgânicos convencionais.

Os valores de sólidos voláteis (SV) estão apresentados na Tabela 4.1 e variação ao longo do processo na Figura 4.4.

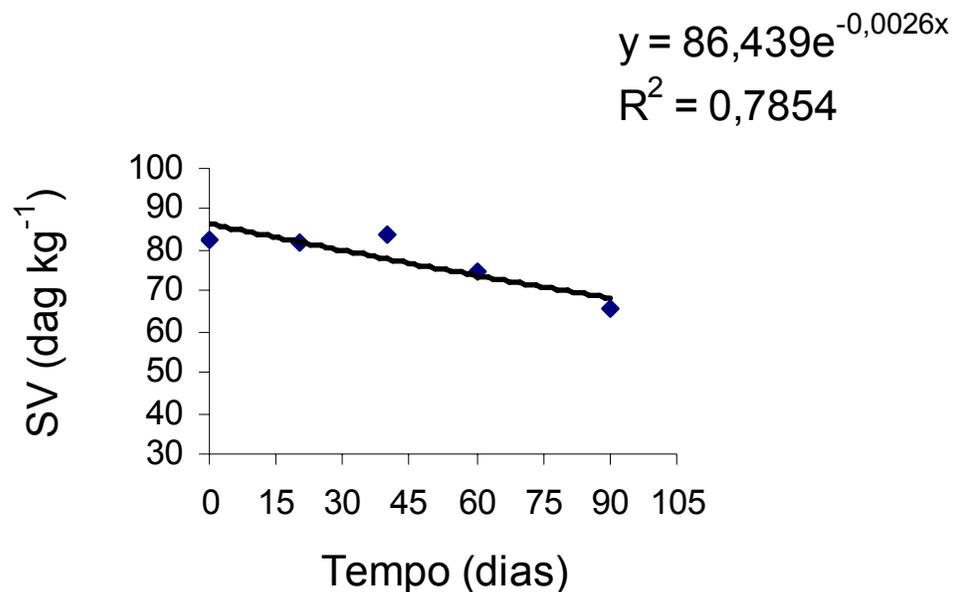


Figura 4.4. Variação na concentração de sólidos voláteis no material em função do tempo de Compostagem – Composteira.

Comparando-se os valores de SV obtidos no 1º estágio com os calculados por balanço de massa observa-se que os primeiros estão maiores. Isso pode ser explicado pelo fato do valor inicial SV ter sido obtido em amostra retirada por ocasião da montagem da leira, mas não nas proporções em que se encontravam nela e, assim, havia maior quantidade de pedaços de frango na amostra.

Como pode ser observado na Figura 4.4, nas quatro primeiras determinações, que correspondem aos 60 primeiros dias (1º estágio), praticamente não houve redução no valor de SV. Acredita-se que esses resultados sejam devidos ao fato da decomposição quase que exclusiva das carcaças de frango, nesse período. Como as carcaças corresponderam a cerca de 4% da massa total, conclui-se que apenas pequena parte do SV da mistura foi removido. Isso fica evidenciado quando se compara o valor de SV obtido ao final do 1º estágio com os obtidos no 2º estágio, ou seja, na etapa em que o composto foi revirado. Entre o primeiro valor de SV, que foi de 82,72 dag kg⁻¹ e o quarto valor, obtido aos 60 dias, de 74,73 dag kg⁻¹, a redução foi de 9,65%. Na fase de reviramento, nos primeiros 30 dias, a redução foi 74,73 dag kg⁻¹ para 65,46 dag kg⁻¹, correspondendo a uma redução de 12,4% no valor de SV. AZEVEDO (1993), compostando a fração orgânica de resíduos sólidos urbanos (RSU) pelo método das LEA, com aeração positiva, e pelo processo Windrow (reviramento), encontrou redução de SV da ordem de 36%. A mesma autora, trabalhando com compostagem em LEA, sob sucção, encontrou redução média de 9%.

A redução da massa de compostagem, durante os 90 dias de compostagem foi de 42,28% e a redução acumulada de SV foi de 22,06%.

4.1.6. Nutrientes

Neste experimento, a relação C/N foi um dos fatores que nortearam o preparo da pilha e a condução do processo. Essa relação ficou, inicialmente, em torno de 19,2:1. Este valor está dentro da faixa de valores sugeridos por HENRY (2003), que é 10 a 20:1 e próximo a 20:1, que foi o valor usado por KUMAR *et al.*

(2007), em trabalho semelhante. Os valores de C, N, P, K e Na estão apresentados na Tabela 4.1, bem como da relação C/N ao longo do processo de compostagem. A variação na concentração de nitrogênio está apresentada na Figuras 4.5.

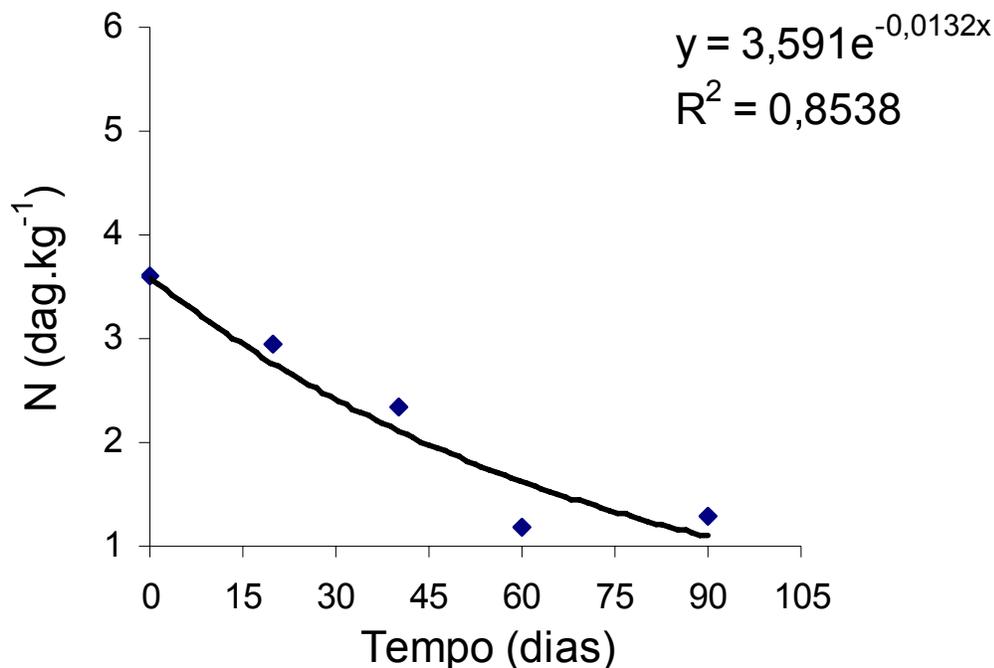


Figura 4.5. Variação na concentração de nitrogênio em função do tempo de compostagem.

Como pode ser observado na Tabela 4.1 e Figura 4.5, a concentração de nitrogênio decresceu exponencialmente com o tempo, inicialmente sendo de 3,6 dag kg⁻¹, passando a ser, 60 dias depois (final do 1º estágio), de 1,2 dag kg⁻¹ chegando a 1,3 dag kg⁻¹, 90 dias depois, 30 dias depois de iniciada a compostagem por reviramento (2º estágio). Sendo essa redução de 66,67% no 1º Estágio e aumento de 8,33% no 2º estágio. Esta grande perda de N está relacionada às altas temperaturas alcançadas no processo e o alto valor de pH, alcançado pelo material da leira, especialmente no 2º estágio. KUMAR *et al.* (2007), trabalhando com compostagem de carcaças de animais mortos, onde a fonte de carbono era palha de arroz ou feno de sorgo (com 2 experimentos, sendo o 2º com controle de água e sem carcaças) encontrou redução de 18,05, 19,12 e 22,91%, respectivamente na concentração de N no material. DAS *et al.* (2002), citados por KUMAR *et al.* (2007), trabalhando com compostagem de resíduos de

incubadora, encontrou reduções de 55,2 e 63,2%. MATOS *et al.* (1998), trabalhando com vários resíduos agrícolas, pelo processo “Windrow”, nos quais a fonte de N era águas residuárias de suinocultura, encontrou, não um decréscimo, mas um aumento na concentração de nitrogênio ao longo do tempo. Os autores consideram que esse aumento foi devido à concentração relativa, proporcionada pela remoção de outros constituintes na forma de gases, principalmente, e pela fixação desse nutriente na massa de material em compostagem, por bactérias capazes de efetuarem esse tipo de atividade. Além disso, essa diferença no comportamento pode estar associada à relação C/N inicial da mistura que, no caso desses autores foi de cerca de 30:1, enquanto neste experimento foi de, aproximadamente 19,2:1. Acredita-se que a relação C/N baixa e, portanto, a concentração de nitrogênio em excesso para o metabolismo microbiano, associada a altas temperaturas e pH básico, acima de 8,5, tenha favorecido o comportamento observado neste e outros experimentos com resíduos similares.

O comportamento do carbono no processo seguiu a mesma tendência apresentada pelo nitrogênio, com reduções em escala exponencial, conforme apresentado na Figura 4.6. Esse comportamento também foi observado por MATOS *et al.* (1998), trabalhando com diferentes fontes de carbono para compostagem em conjunto com águas residuárias da suinocultura.

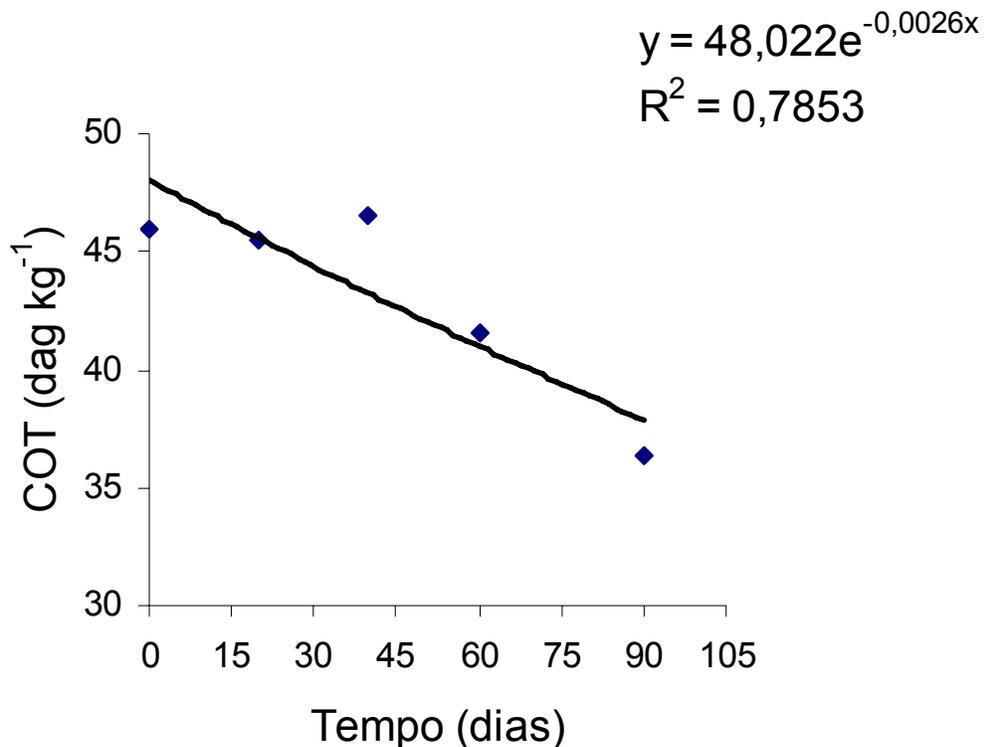


Figura 4.6. Variação na concentração de Carbono Orgânico Total em função do tempo de compostagem – Composteira.

Conforme pode ser observado na Tabela 4.1 e Figura 4.6, a redução na concentração de COT no material, nos primeiros 60 dias de compostagem (1º estágio), foi muito pequena, sendo mais significativa nos primeiros 30 dias da etapa de reviramento do material (2º estágio). Isto pode ser explicado pelo fato de que, no 1º estágio, como a aeração e o conteúdo de água não foram mantidos em níveis adequados, a degradação se processou de forma muito lenta, tendo ocorrido, basicamente, no entorno das carcaças de frango. Essa afirmação pode ser comprovada avaliando-se os dados apresentados na Tabela 4.1 na coluna de CFO, cujos dados foram obtidos em amostras que foram coletadas na região das carcaças. Porém, como o COT indica a concentração, em termos globais, do material, como um todo, pode-se dizer, com base nos dados obtidos para esta variável, que o primeiro estágio foi ineficiente na degradação do material. Enquanto que no primeiro estágio, que durou 60 dias, a redução do COT foi de 9,7%, nos primeiros 30 dias do segundo estágio ela foi de 12%.

KUMAR *et al.* (2007), analisando os experimentos com base nas fontes de carbono palha de arroz e feno, verificaram redução de 29,02 e 31,02%, respectivamente, na concentração desse nutriente no material. A diferença entre os valores deste trabalho e os obtidos pelos autores citados, pode ser devido ao conteúdo de água e da proporção de fonte de carbono de cada experimento. No presente trabalho foi adotada a relação de 0,2 kg de água e 0,26 kg de palha de café para cada kg de carcaça, enquanto nos experimentos de KUMAR *et al.* (2007) essa relação foi de 1,7 kg de água e 1,75 kg de palha de arroz para kg de carcaça e 1,60 kg de água e 1,75 kg de feno para cada kg de carcaça. A adição de maior quantidade de água pode ser um fator importante para explicar o favorecimento da atividade microbológica e, portanto a degradação do material, pois possibilitou a manutenção da umidade em níveis adequados, por maior período de tempo.

A relação C/N inicial, calculada por balanço de massas e, como citado anteriormente, foi de, aproximadamente, 19:2, sendo as demais determinadas por amostragem. No primeiro estágio, as amostras foram coletadas na região das carcaças (na composteira). No segundo estágio, as amostras foram coletadas de maneira aleatória em toda a massa de compostagem. Na Tabela 4.1 estão apresentados todos os valores obtidos no primeiro e segundo estágios e na Figura 4.7, está apresentado o comportamento da relação C/N no primeiro estágio do processo.

Como pode ser observado, os valores de relação C/N no material não apresentaram tendência clara de comportamento exponencial durante o período de compostagem. Nos primeiros 20 dias do processo, houve degradação acelerada no entorno das carcaças, o que pode ser evidenciado pelos decréscimos acentuados nos valores de concentração de CFO e N (Tabela 4.1), o que, conforme já discutido, pode ser debitado à presença de umidade e aeração adequadas no material. Depois disso, passou a ocorrer estabilização na concentração de CFO e grande perda de N, provavelmente na forma de gás amônia, em decorrência das condições alcalinas do material (Figura 4.3). Com isso, a relação C/N no material voltou a aumentar. Devido a questões de amostragem, associada à grande perda de N no processo, os valores da relação

C/N, correspondente a 60 e 90 dias, respectivamente, foram superiores aos obtidos no balanço de massas inicial (Tabela 4.1).

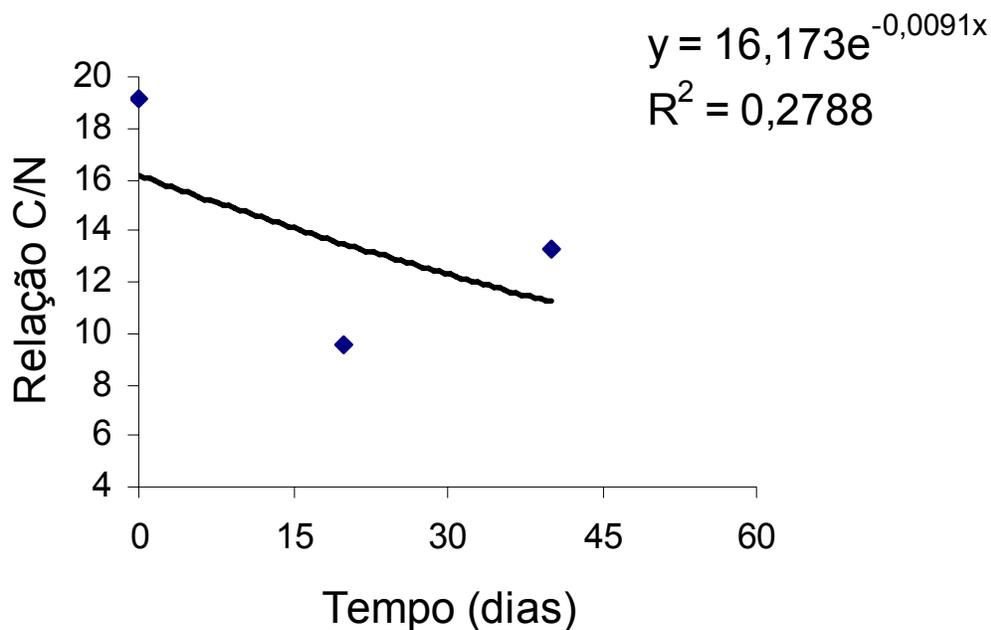


Figura 4.7. Variação na relação C/N em função do tempo de compostagem (1º estágio).

KUMAR *et al.* (2007) também observaram aumento no valor da relação C/N no composto final, em comparação com a inicial. Esses autores obtiveram valores finais de relação C/N de 15,94 ($\pm 0,76$) a 23,09 ($\pm 4,62$), no tratamento com palha de arroz e de 16,25 ($\pm 1,06$) a 18,00 ($\pm 1,64$) no tratamento com feno de sorgo. Os autores atribuíram esse fato à grande perda de N do material, ocorrida durante o período de verão.

Há de se ressaltar que, os valores obtidos neste experimento, voltaram a apresentar tendência de decréscimo no segundo estágio (Tabela 4.1), que, caso as condições sejam favoráveis, provavelmente, conduzirão a valores em torno de 10:1 no composto final.

4.2. Leiras Estáticas Aeradas (LEAs)

Nos experimentos envolvendo as LEAs, variáveis como conteúdo de água e aeração são determinantes para que se tenha eficiência na compostagem. Nas três leiras avaliadas, os critérios adotados para estas duas variáveis foram os mesmos. Sempre que o conteúdo de água no material baixava no processo, caracterizada pela queda brusca na temperatura, era efetuada uma intervenção, objetivando o restabelecimento das condições ambientais ótimas para a degradação do material. No início do experimento, nas leiras 02 e 03, o restabelecimento do conteúdo de água no material era feito praticamente a cada três dias, o mesmo ocorrendo com leira 01, a partir do 17º dia. Após a instalação dos sistemas de umedecimento do material, esses períodos foram ampliados, o que permitiu a manutenção de temperaturas elevadas por maior período de tempo.

4.2.1 - Requerimento de Oxigênio/Taxa de Aeração

A taxa de aeração das leiras seguiu, inicialmente, as recomendações de ASTONI *et al.* (2007), que citaram PINTO (2001), que considera ventiladores de 0,5 a 2 HP suficientes para atendimento das necessidades de ar de $1200 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ t}^{-1}$ seca de material orgânico em compostagem. Com base nestes valores, concluiu-se que, para um volume de 0,5 t e, funcionando intermitentemente a cada 15 minutos, teria que ser fornecida uma vazão de 150 m^3 de ar.

Segundo dados obtidos na curva do ventilador (Figura 4.8), verificou-se que a máxima vazão fornecida pelo ventilador utilizado neste trabalho era de $450 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Partindo desse valor e de que, em média, cada leira tinha 0,5 t de mistura, programaram-se os sistemas para funcionarem intermitentemente a cada 15 minutos, de acordo com a precisão do timer. Nestas condições, seria fornecida uma vazão máxima de $112 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Entretanto esta taxa de aeração foi muito elevada para esses experimentos, causando o resfriamento da leira e retardamento no processo de compostagem. Ao se perceber isso e não se

dispondo de valores específicos de vazão específica para compostagem do tipo de material em estudo, optou-se por seguir as recomendações de AZEVEDO (1993), usando o dispositivo de “feedback”, em função da temperatura de controle. Nesse sentido, adotaram-se as seguintes temperaturas para o controle da aeração por “feedback”, 30 °C (1º dia), 40 °C (2º dia), 50 °C (3º dia) 60 °C (4º dia) e 65 °C (a partir do 5º dia). Além disso, estes valores se enquadraram na faixa de 40 °C a 60 °C nos três primeiros dias, valores indicativos de equilíbrio do sistema (PEREIRA NETO, 2004).

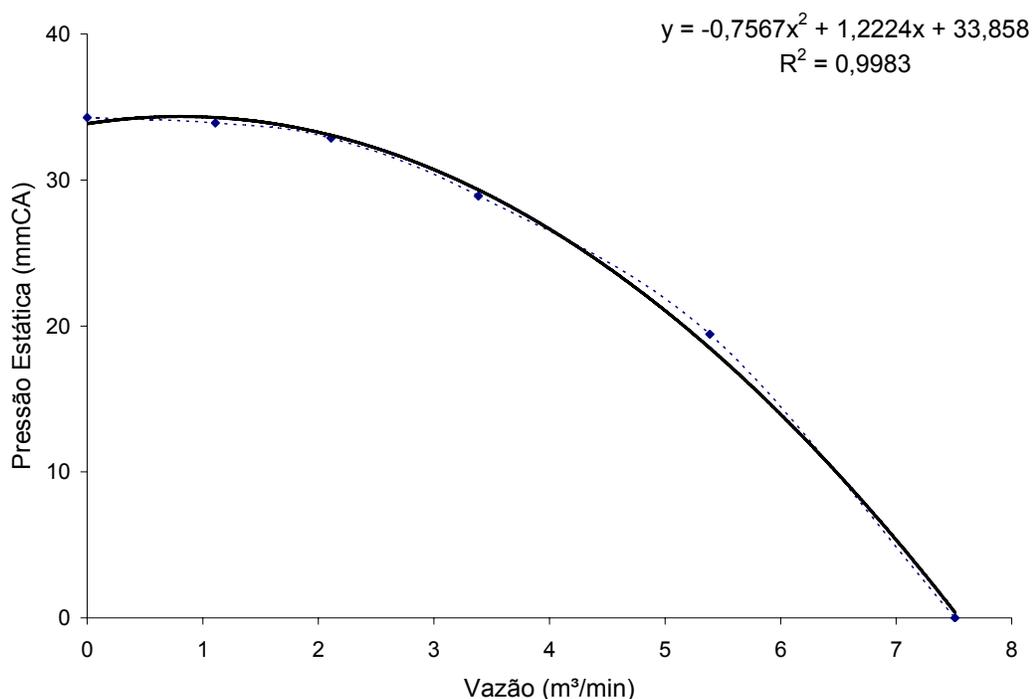


Figura 4.8. Curva característica dos ventiladores.

Como a massa em compostagem ressecava muito rapidamente, as temperaturas não atingiam ou não permaneciam nos níveis desejados. Então, optou-se por trabalhar considerando a recomendação de GRAVES *et al.* (2000) de que a taxa de aeração fornecida para o controle da temperatura devia ser também suficiente para atender a demanda de oxigênio para os microrganismos. A partir daí, após ser feita a correção do conteúdo de água no material, a taxa de aeração foi controlada por “feedback”, com a temperatura de controle em 65 °C. Quando essa temperatura não era atingida ou reduzia-se a temperatura de controle ou ligava-se, manualmente, os ventiladores, por um período de 1 a 2 minutos.

Quando essa temperatura atingia níveis críticos, fazia-se a intervenção nas leiras, ou seja, corrigia-se o conteúdo de água e, então, as temperaturas voltavam a subir. Quando foi observado que, mesmo corrigindo-se o conteúdo de água a temperatura não atingia níveis satisfatórios, considerou-se o fim da “Fase ativa”, sendo as leiras desmontadas e o material conduzido para pátio de compostagem, onde foi submetido à “Fase de Maturação”.

4.2.2. LEA 01

4.2.2.1. Temperatura

As temperaturas monitoradas, nos primeiros 17 dias de experimento, foram, basicamente, da região onde se encontravam as carcaças em decomposição. A partir daí houve a destruição das camadas, a correção do conteúdo de água e a homogeneização do material, mas manteve-se a localização geométrica das sondas de temperatura.

O comportamento da temperatura do material da leira 01, durante o seu período de compostagem, está apresentado na Figura 4.9.

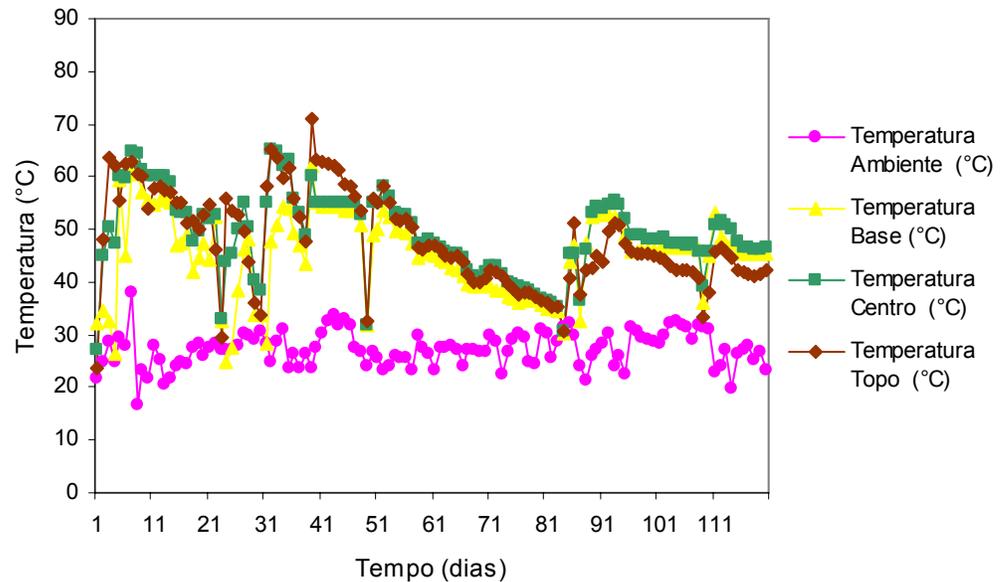


Figura 4.9. Variação da temperatura em função do tempo de compostagem – LEA01.

A temperatura do material subiu gradativamente, no início do processo, atingindo 60 °C no sexto dia após a montagem da leira. Manteve-se próxima ou acima de 55 °C, em todos os pontos monitorados, por 8 dias, enquanto as condições de umidade e aeração eram adequadas. Conforme pode ser observado, a temperatura da base (1ª camada de carcaça de frango) das leiras se manteve sempre inferior às demais. Isto se deve ao fato da sua proximidade com o duto de aeração, locais em que a perda de água foi mais rápida que a dos demais pontos da leira.

No 17º dia, quando a temperatura apresentou decréscimo contínuo, a leira foi desmontada, tendo sido as camadas, formadas no início do experimento, destruídas. O material foi misturado de maneira uniforme, corrigindo-se o conteúdo de água até valores próximos a 55 dag kg⁻¹.

Como pode ser observado, após o 54º dia de compostagem a temperatura reduziu e, a partir daí, não alcançou valores tais como os anteriores.

Observou-se que nos pontos mais próximos ao sistema de aeração ou da superfície externa, em contato com a atmosfera, o material sofria resfriamento mais rápido, o que decorre das trocas de energia entre eles e o ar.

No 29º dia, a LEA 01 foi novamente aberta para a correção do conteúdo de água e implantação de um sistema de umedecimento, já que se concluiu ser indispensável sua instalação para o bom desempenho do sistema de compostagem. A partir daí, observou-se novo período de elevação das temperaturas do material, com um pico de 63,1 °C, no 34º dia, quando então a temperatura começou cair.

A intervenção feita para correção do conteúdo de água no 37º dia, resultou em um aumento imediato de temperatura que alcançou a temperatura máxima de 71 °C, no 38º dia, no topo da leira. Nesse momento a leira operava com uma temperatura de “feedback” de 60 °C, com medição feita no centro da leira. Com isso, observou-se que nem sempre, em sistema de compostagem por leiras estáticas aeradas, a mais alta temperatura ocorrerá no centro geométrico da massa. Por esta razão, a partir disso, a temperatura de “feedback”, tomada no centro da leira, passou a ser de 55 °C.

Conforme observado na Figura 4.9, após a instalação do sistema de umedecimento, a intervenção ocorreu em intervalos de, aproximadamente, 10 dias, sendo que nesses intervalos a temperatura se manteve na faixa favorável à degradação acelerada. Após 65 dias de experimento, quando as temperaturas atingiram a casa de 40 °C, o material foi colocado para maturar, sendo interrompida a aeração forçada. Entretanto, tal como observado por AZEVEDO (1993), o material ao ser levado para um pátio aberto e, portanto submetido a aeração mais uniforme, voltou a atingir temperaturas em torno de 50 °C, mostrando que, nesse tipo de processo, a compostagem não ocorre de forma uniforme.

4.2.2.2. Conteúdo de Água

O conteúdo inicial de água, calculado por meio de balanço de massa, foi de 86,0 dag kg⁻¹ (b.s.) e 43,6 dag kg⁻¹ (b.u.). O valor de conteúdo inicial de água estava próximo ao limite inferior da faixa considerada ideal para a atividade microbiana, que está entre 40 a 60 dag kg⁻¹ (HENRY, 2003, MUKHTAR *et al.*,

2004, PEDROSO-DE-PAIVA, 2004). Certamente, esse fato, tornou o processo mais lento. Entretanto, esse conteúdo inicial de água correspondeu ao valor médio de todo o material utilizado na montagem da leira. Como o material da leira é estratificado, tal como na composteira, esse conteúdo médio de água não é fator importante, uma vez que a degradação do material se dá, inicialmente e principalmente, no entorno das carcaças de frango, onde conteúdo de água estava, provavelmente, dentro da faixa ideal.

No decorrer do processo, com decomposição das carcaças, a água liberada nas reações, em decorrência das elevadas temperaturas do meio, tendeu a migrar para a superfície junto com o ar quente. O ar quente e úmido, quando em contato com a atmosfera mais fria, especialmente à noite, provocou a condensação da água. Este fenômeno, denominado de “migração de água”, é muito comum na secagem e aeração de cereais (BROOKER *et al.*, 1974, HALL, 1980), proporcionando o umedecimento da camada de topo, mais fria.

Esse fenômeno da migração da água foi responsável pela distribuição diferencial da água no material da leira e que se tornou ainda mais drástico em virtude do ressecamento da massa junto aos dutos de aeração. Isto pode ser observado pelas diferentes zonas de temperaturas que, certamente, está associado com as diferentes condições de umidade locais.

Na Figura 4.10 estão mostradas regiões de ressecamento (regiões periféricas inferiores e próximas aos dutos de aeração), condensação (superfície da leira) e conteúdo de água adequado (imediatamente abaixo da zona de condensação e acima do duto de aeração) e na Figura 4.11 apresenta-se um esquema do que ocorre na leira, em termos de distribuição de água e temperatura.



Figura 4.10: Detalhe do perfil de distribuição de água no material constituinte da Leira Estática Aerada 01.

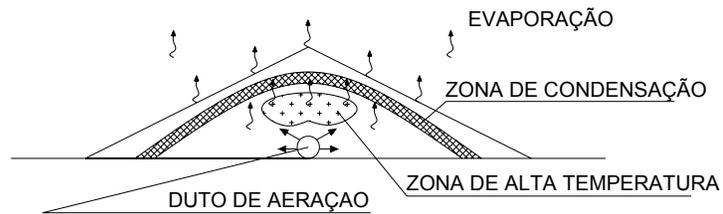


Figura 4.11: Esquema das zonas de alta temperatura e formação de zonas de condensação de água no topo das leiras – LEA 01 (Fonte: STENTIFORD, 1992).

4.2.2.3. pH

Os valores pH estão apresentados na Tabela 4.1 e a variação ao longo do período de compostagem mostrado na Figura 4.12.

Conforme pode ser observado na Figura 4.12, após 15 dias de compostagem, o pH (H_2O) está baixo, 6,32, indicando a degradação acelerada das carcaças de frango, que promove a formação de ácidos orgânicos pela microbiota. A partir dos 30 dias o pH (H_2O) ultrapassou o valor de 8,5, isto associado a altas temperaturas (Figura 4.9), favoreceu a perda de nitrogênio por volatilização.

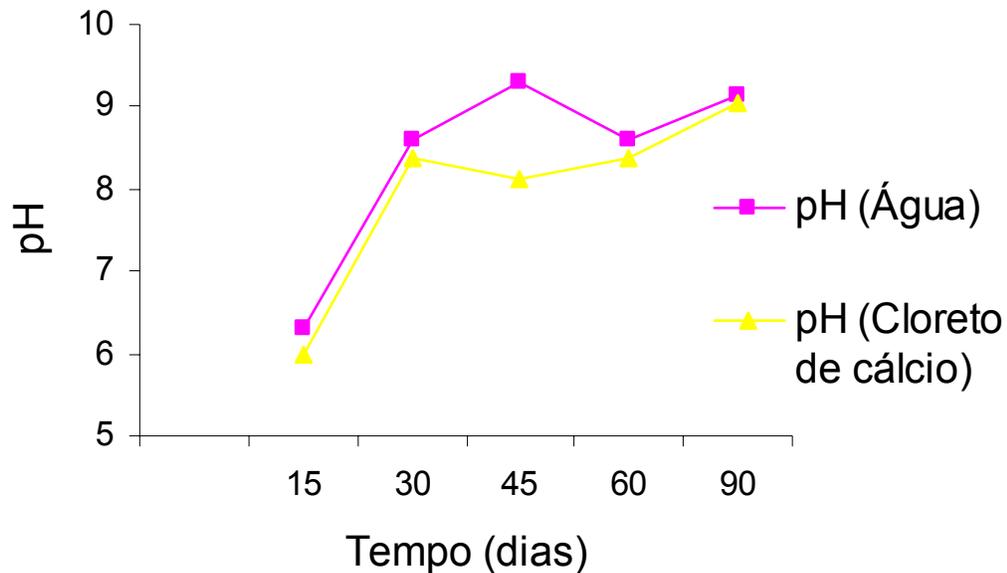


Figura 4.12 : Variação do pH em função do tempo de compostagem – LEA 01.

Apesar de aos 60 dias o pH (H_2O) se manter superior a 8,5, a temperatura já tinha baixado e, sendo assim, não favoreceu a volatilização do nitrogênio em forma de amônia.

4.2.2.4. Sólidos Voláteis

Os valores de Sólidos Voláteis da LEA 01 estão apresentados na Tabela 4.1 e variação ao longo do tempo na Figura 4.13.

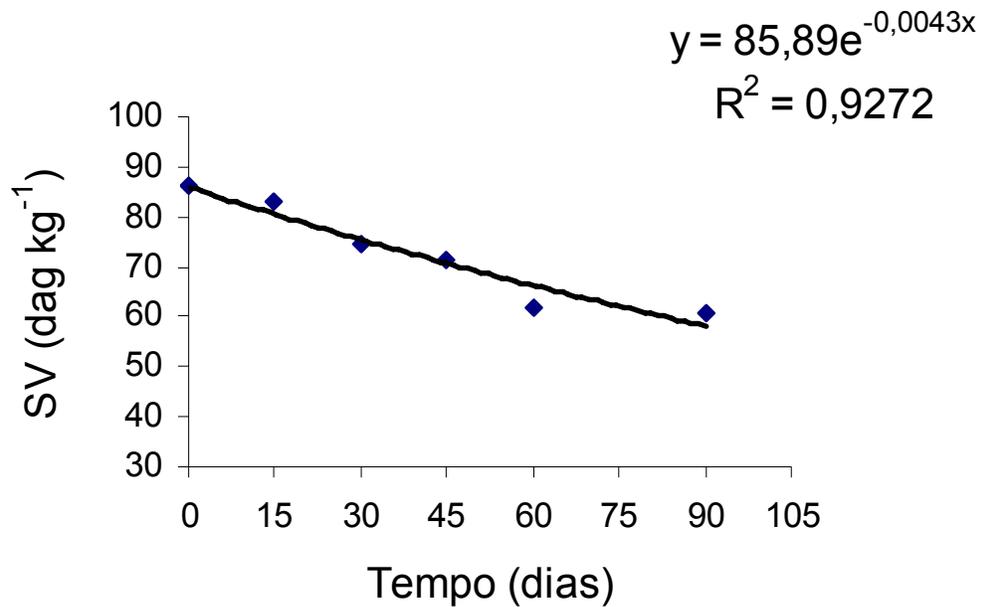


Figura 4.13. Variação na concentração de sólidos voláteis em função do tempo de compostagem – LEA 01.

Conforme pode ser observado na Figura 4.13 os SV apresentam uma redução exponencial ao longo do tempo. Isso coincide com a redução do COT, que estão relacionados. A redução em 90 dias de compostagem foi de 29.47 dag kg⁻¹, sendo que nos primeiros 30 dias foi de 13.15 dag kg⁻¹. AZEVEDO (1993) encontrou redução de variando de 33 a 43 dag kg⁻¹. Essa grande diferença é devido ao fato de que nos primeiros 15 dias de compostagem da LEA 01 houve, basicamente, a degradação das carcaças de frango. A redução de SV da Composteira foi de 22 dag kg⁻¹.

4.2.2.5. Nutrientes

A relação C/N foi um dos fatores que nortearam a montagem das leiras estáticas aeradas. Na leira 01, essa relação ficou, inicialmente, em 13,8:1. Este valor está dentro da faixa de valores sugeridos por HENRY (2003), que é 10 a 20:1.

Os valores de concentração de C, N, P, K e Na no material, quantificados no composto produzido, estão apresentados na Tabela 4.1, onde também estão

apresentados os valores de relação C/N ao longo do processo de compostagem. A variação da concentração de N está apresentada na Figura 4.14.

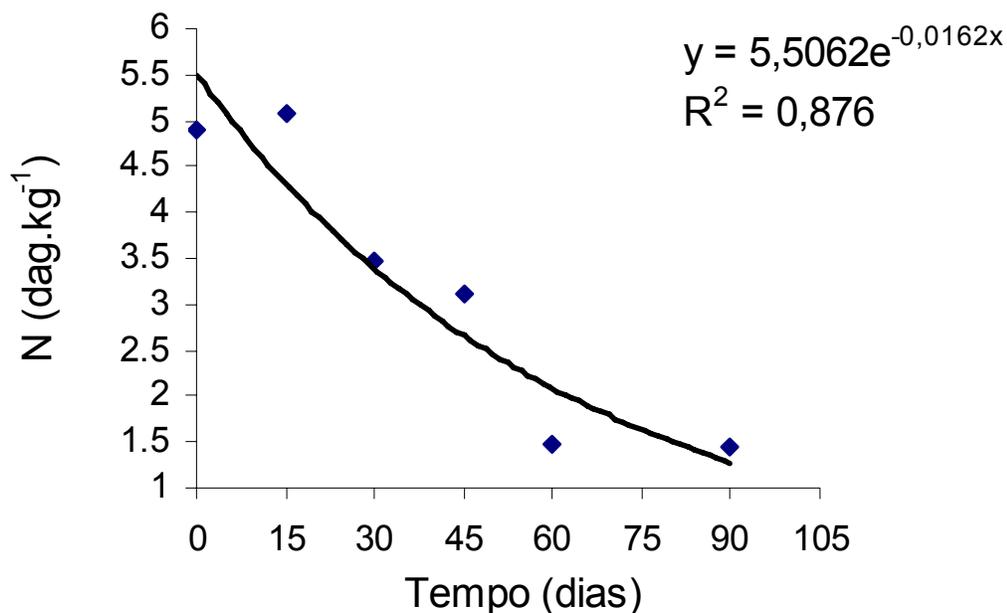


Figura 4.14. Variação da concentração de Nitrogênio em função do tempo de compostagem – LEA 01.

O decréscimo na concentração de N de forma exponencial com o tempo (Figura 4.14) é comum na compostagem desse tipo de resíduo, em razão da baixa relação C/N inicial da mistura e, portanto, da grande concentração desse nutriente no início do processo. Esse fato, associado às altas temperaturas e, principalmente, altos valores de pH, proporcionaram grande perda de N, na forma de gás amônia.

Neste experimento, as amostras que foram coletadas nos 15 primeiros dias se referem àquelas do interior da leira, regiões onde foram dispostas as carcaças de frango, razão porque os valores estão mais altos. Como depois de 30 dias as amostras coletadas foram obtidas de material já submetido ao reviramento e homogeneização, a concentração de N detectada foi mais baixa, tendo em vista que as carcaças eram, dentre os materiais componentes da mistura, o mais rico nesse nutriente.

Os valores de 4,91 e 5,08 dag.kg⁻¹ são referentes à concentração de N calculado por balanço de massas e no material coletado nas zonas da leira onde havia grande quantidade de carcaças de frango, respectivamente. Os demais valores, que variam de 3,46 a 1,40 dag kg⁻¹ referem-se às amostras retiradas após a leira ter sido revirada e homogeneizada. Como dito anteriormente, essa redução de, aproximadamente, 71% na concentração de N no material está relacionada, principalmente, às perdas por volatilização. AZEVEDO (1993), relatou em compostagem por aeração forçada de resíduos sólidos urbanos (RSU), relatou grande variação nas concentrações de N no material, ao longo da fase ativa de degradação. A autora encontrou, porém, aumento de cerca de 70% na concentração de N, ao final da fase ativa. Este fato pode ser devido ao aumento da concentração relativa de N, em decorrência da remoção de SV (MARA e STENTFORD, 1983, citados por AZEVEDO, 1993) e, também, da fixação desse nutriente por bactérias (MATOS *et al.* 1998).

A variação na concentração de C no processo de compostagem ocorre devido à ação de microrganismos. Na respiração aeróbia, os microrganismos utilizam o oxigênio molecular (O₂) para obter a maior parte da energia das fontes de carbono, produzindo dióxido de carbono (CO₂) e água. Segundo BIDDLESTONE *et al.* (1981), citados por AZEVEDO (1993), cerca de 50 a 60% do carbono orgânico presente na massa em compostagem é convertido em dióxido de carbono. Essa redução pode ser verificada pela redução dos sólidos voláteis durante o processo e é uma das grandes responsáveis pela perda de massa durante o processo.

Na Figura 4.15 está apresentada a variação da concentração de carbono em função do tempo de compostagem e na Tabela 4.1 os dados obtidos nesse período. Conforme pode ser observado na Figura 4.15, o COT apresentou tendência de redução exponencial com o tempo de compostagem. A redução apresentada no valor de COT, nesta leira aerada, foi de 29,48% enquanto que na composteira, ao final de 90 dias, foi de cerca de 22%. AZEVEDO (1993), na compostagem de RSU e lodo de esgoto, observou redução de 12,47% na concentração de C no material.

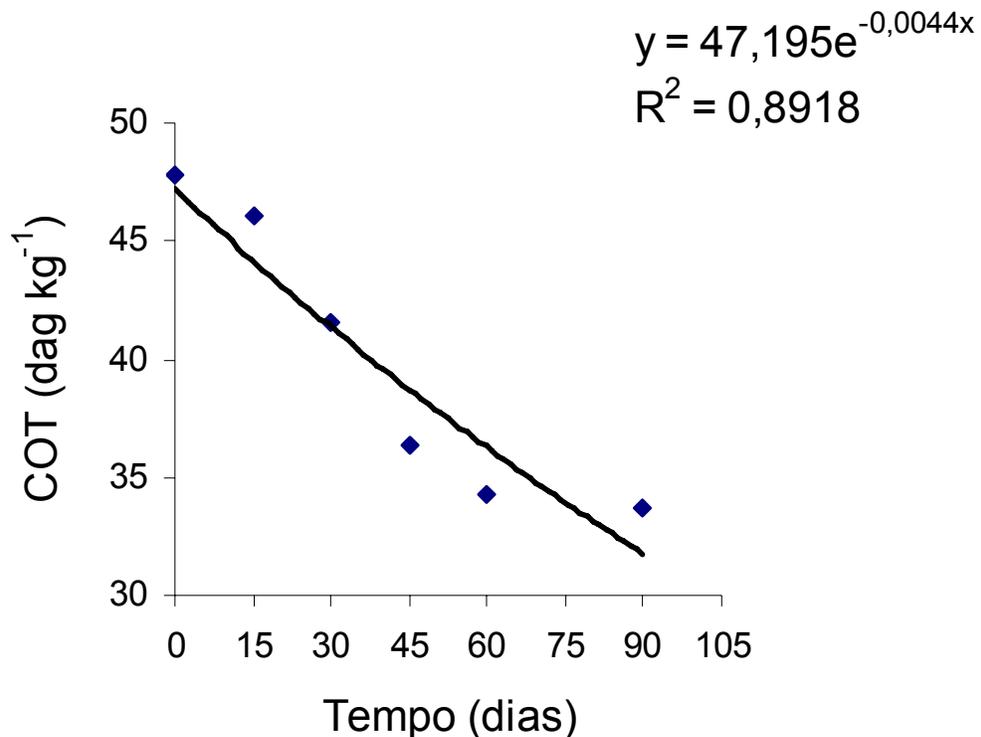


Figura 4.15. Variação na concentração de Carbono Orgânico Total em função do tempo de compostagem – LEA 01.

A relação C/N, tal como analisada no processo, apresentou duas fases distintas. Na primeira fase ocorreu, basicamente, decomposição das carcaças de frango. Nos 30 primeiros dias dessa fase, conforme apresentado na Figura 4.16, a relação C/N baixou de 13,79 para 8,9. Na segunda fase, que se refere ao comportamento global da mistura, a relação C/N partiu de 8,9 chegando a 18,1, conforme apresentado na Tabela 4.1. Acredita-se que a medição efetuada nos primeiros 30 dias não represente o todo, tendo em vista que o valor de relação C/N obtido após a mistura do material é que retrata de forma mais fiel a real condição da massa em compostagem.

Na primeira fase, a redução na concentração de N ficou em torno de 30%, enquanto que a redução de C ficou em torno de 55%; na segunda fase, ficou em torno de 60%, enquanto que a do C ficou em torno de 17%.

Nos primeiros 30 dias, a disponibilização de grande quantidade de N associada às fontes de C mais facilmente degradáveis favoreceu uma maior

atividade microbiana e, portanto, maior degradação da matéria orgânica. Nos dias seguintes, como parte da matéria orgânica facilmente degradável já tinha sido decomposta e parte do N se perdeu por volatilização, a decomposição da matéria orgânica se processou de maneira mais lenta.

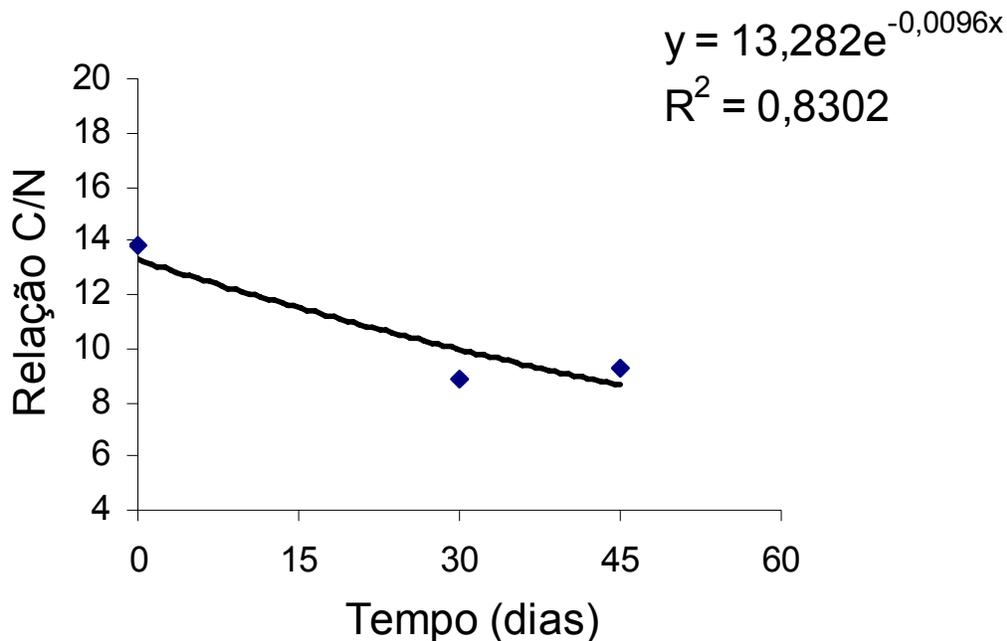


Figura 4.16. Variação na relação C/N em função do tempo de compostagem – LEA 01.

4.2.3. LEA 02

4.2.3.1. Temperatura

Na Figura 4.17 está apresentado o comportamento da temperatura do material da LEA 02 em função do tempo. Conforme pode ser observado, houve aumento gradativo da temperatura do material, a partir da montagem da leira (dia zero (0)), atingindo-se o valor de 50 °C no 3º dia após a montagem da leira, embora a temperatura da base não tenha se elevado de forma satisfatória. Isso foi atribuído ao fato do efeito resfriador do duto de aeração, associado ao baixo

conteúdo de água no material, no início do processo, que foi de $43,6 \text{ dag kg}^{-1}$ (b.u.).

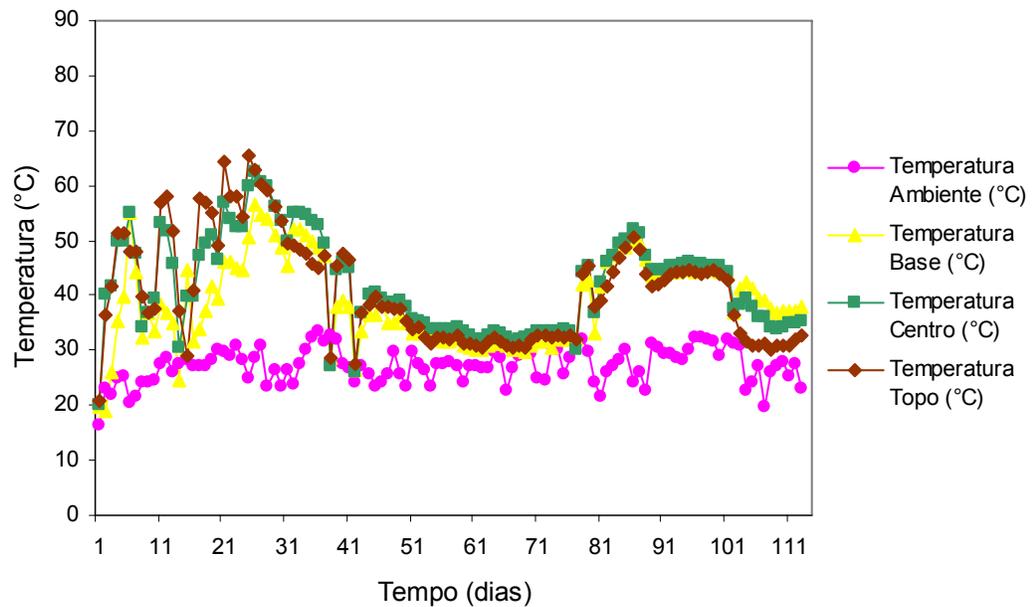


Figura 4.17. Variação da temperatura em função do tempo de compostagem – LEA 02.

A taxa de aeração inadequada, associada à falta de um sistema eficiente de umedecimento fez com o material apresentasse, em grande parte do tempo, temperaturas próximas a $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$, valor insuficiente para se conseguir controle sanitário do composto. Entretanto, conforme pode ser observado, a partir do 23º dia, quando foi instalado o sistema de umedecimento, as temperaturas alcançaram valores próximos dos ideais ($55 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

A fase ativa foi considerada encerrada a partir 45º dia, quando a temperatura do material passou a ser inferior a $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Antes disso e alguns dias depois, foram feitas tentativas de correção do conteúdo de água, mas as temperaturas não se elevaram.

4.2.3.2. Conteúdo de Água

O conteúdo inicial de água, calculado por balanço de massa, foi de 86,0 dag kg⁻¹ (b.s.) e 43,6 dag kg⁻¹ (b.u.). Esse conteúdo de água é a mesmo obtido na LEA 01, afinal trata-se dos mesmos materiais e das mesmas proporções no preparo das leiras. Após o início da compostagem e, conseqüentemente da aeração, o conteúdo de água foi decrescendo até alcançar valores inferiores a 30 dag kg⁻¹ (b.u.). O conteúdo de água foi, então, corrigido para valores próximos a 55 dag kg⁻¹ (b.u.).

Conforme pode ser verificado na Figura 4.17, as temperaturas, oscilaram para mais ou para menos em função dos conteúdos de água no material, em cada região monitorada. O conteúdo de água no material passou a ser corrigido periodicamente, para garantir valores próximos do ideal, ou seja, 55 dag kg⁻¹ (b.u.). Porém, ainda assim, em algumas ocasiões, a leira teve que ser aberta por motivo de excesso de água no material, devido às chuvas e a ocorrência de goteiras no telhado, quando, em determinados pontos, o material atingiu conteúdo de água de 66 dag kg⁻¹ a 70 dag kg⁻¹ (b.u.). Essas situações extremas, de ressecamento e conteúdo excessivo de água certamente prejudicaram o processo de compostagem.

Na Figura 4.18 está mostrada a leira sendo aberta para a remoção do excesso de água do material.



Figura 4.18. Detalhe do perfil de distribuição de água no material constituinte da LEA 02.

4.2.3.3. pH

Os valores de pH estão apresentados na Tabela 4.1 e o seu comportamento mostrado na Figura 4.19.

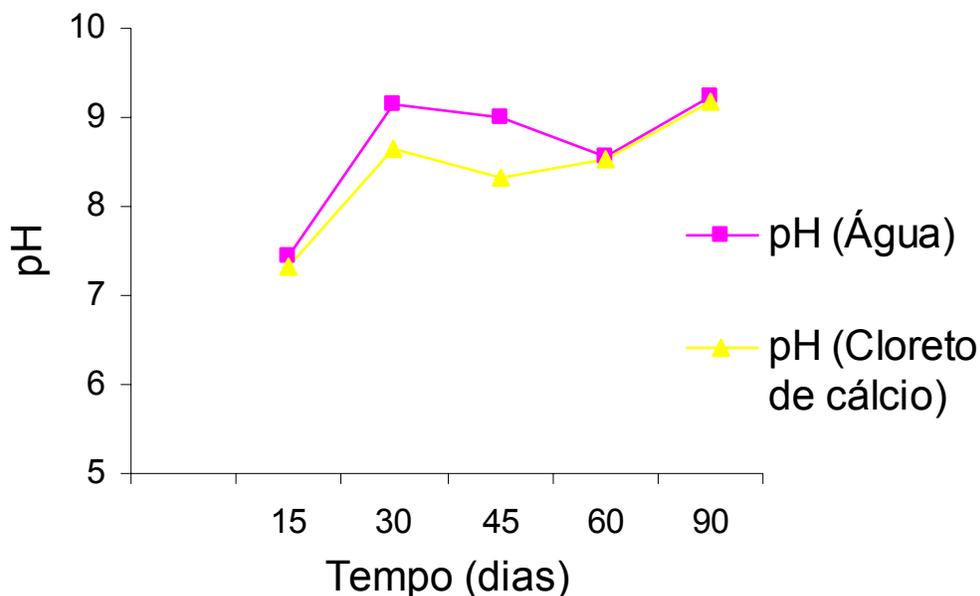


Figura 4.19. Variação do pH em função do tempo de compostagem – LEA 02.

Conforme pode ser observado na Figura 4.19, o pH H_2O , obtido aos 15 dias de compostagem, foi de 7,45, próximo da neutralidade. Segundo PEREIRA NETO (2004), esse valor de pH se encontraria dentro da faixa considerada ótima para desenvolvimento da maioria das bactérias, o que pode indicar uma fase de degradação acelerada do material orgânico.

Aos 30 dias de compostagem, o pH H_2O do material ficou em torno de 9, o que pode indicar, segundo KUMAR *et al.* (2007), a formação de sais de amônio. O pH se manteve nesse patamar até os 90 dias. Este valor está dentro da faixa indicada por PEREIRA NETO (2004), para o final do período de compostagem, que vai de 7,5 a 9,0.

4.2.3.4. Sólidos Voláteis

Os valores de SV do material constituinte da LEA 02 estão apresentados na Tabela 4.1 e a variação ao longo do tempo de compostagem na Figura 4.20.

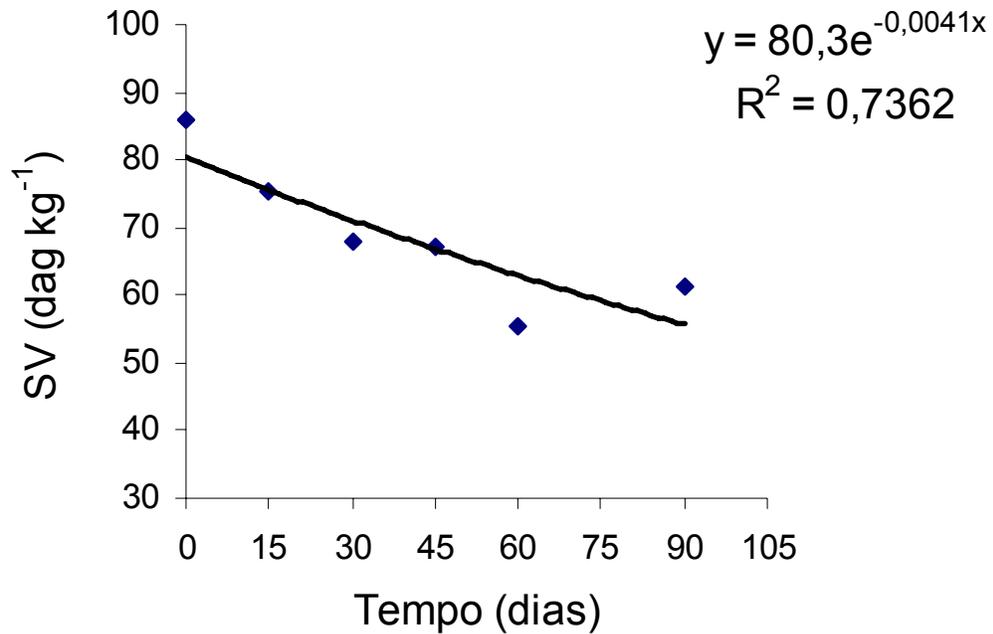


Figura 4.20. Variação na concentração de sólidos voláteis em função do tempo de compostagem – LEA 02.

Conforme pode ser observado na Figura 4.20, os sólidos voláteis apresentam redução exponencial ao longo do tempo de compostagem. A redução no valor de SV, em 90 dias de compostagem, foi de 28,86%, sendo que nos primeiros 30 dias (fase ativa) foi de 21,1%. A LEA 01, que foi constituída pelos mesmos materiais, apresentou redução de 29,47% no valor de SV, nos mesmos 90 dias de compostagem, sendo que, nos primeiros 30 dias, foi de 13,15%.

A degradação da matéria orgânica foi, nos primeiros 30 dias, mais acelerada na LEA 02 que na LEA 01. Entretanto, aos 90 dias de compostagem, os valores de SV do material, em ambas as leiras, se igualaram.

4.2.3.5 Nutrientes

Na LEA 02, a relação C/N foi, inicialmente, de 13,8:1, tal como a adotada para a LEA 01, por se tratar dos mesmos materiais. Este valor está dentro da faixa de valores sugeridos por HENRY (2003), que é 10 a 20:1. As concentrações de N e C, bem como os valores da relação C/N, ao longo do processo de

compostagem, estão apresentados na Tabela 4.1. A variação na concentração de N está apresentada na Figura 4.21.

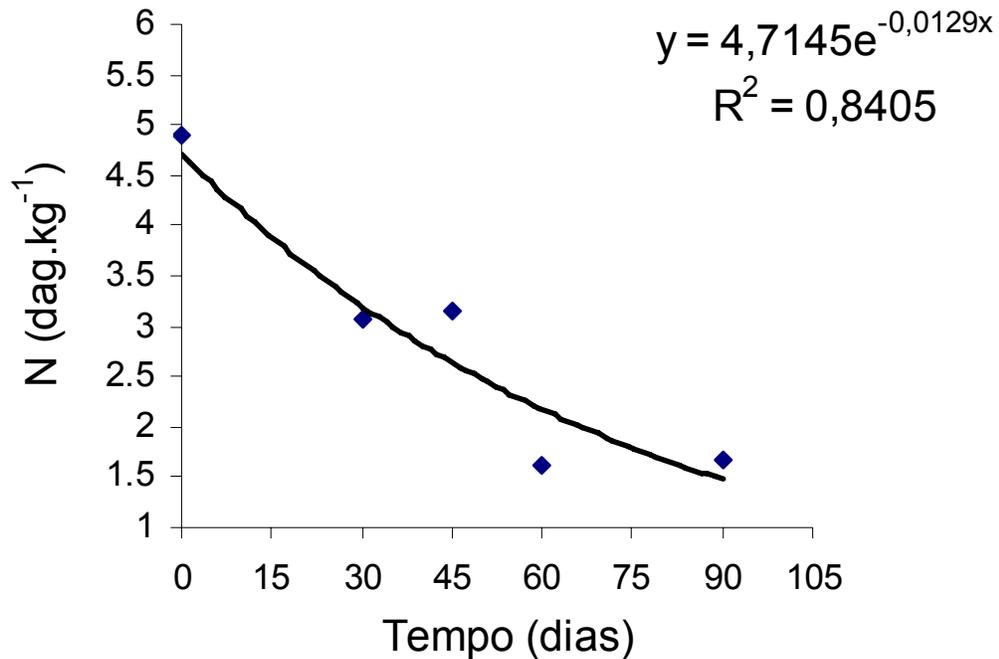


Figura 4.21. Variação na concentração de Nitrogênio em função do tempo de compostagem – LEA 02.

Conforme pode ser observado na Figura 4.21, a concentração de N decresceu, de forma exponencial, com o tempo de compostagem, tal como ocorrido na LEA 01 e na composteira. Isto se deve à baixa relação C/N e, portanto, à grande concentração desse nutriente no material, no início do processo. Segundo a literatura consultada, a combinação de elevada concentração de N, alto pH e alta temperatura proporciona perda de N na forma de amônia.

A variação na concentração de C no material, em função do tempo de compostagem, está apresentada na Figura 4.22.

Conforme pode ser observado na Figura 4.22 e na Tabela 4.1, a redução na concentração de COT, aos 90 dias, foi de 28,8%, enquanto na LEA 01 a redução de 29,5% e na composteira de 22%. Conclui-se a partir desses resultados que a compostagem pelo método da leira estática aerada foi um pouco mais rápida que a obtida pelo método da composteira. A redução da concentração de N ao longo do processo foi de 65%, e essa redução certamente está relacionada à

perda desse elemento por volatilização. STENTFORD *et al.* (1996b), trabalhando com RSU e lodo de esgoto, observaram aumento na concentração de N no material em compostagem, que variou de 25%, em leira que partiu de uma relação C/N 41:1, a até 65%, em leira que tinha a relação C/N inicial de 46:1.

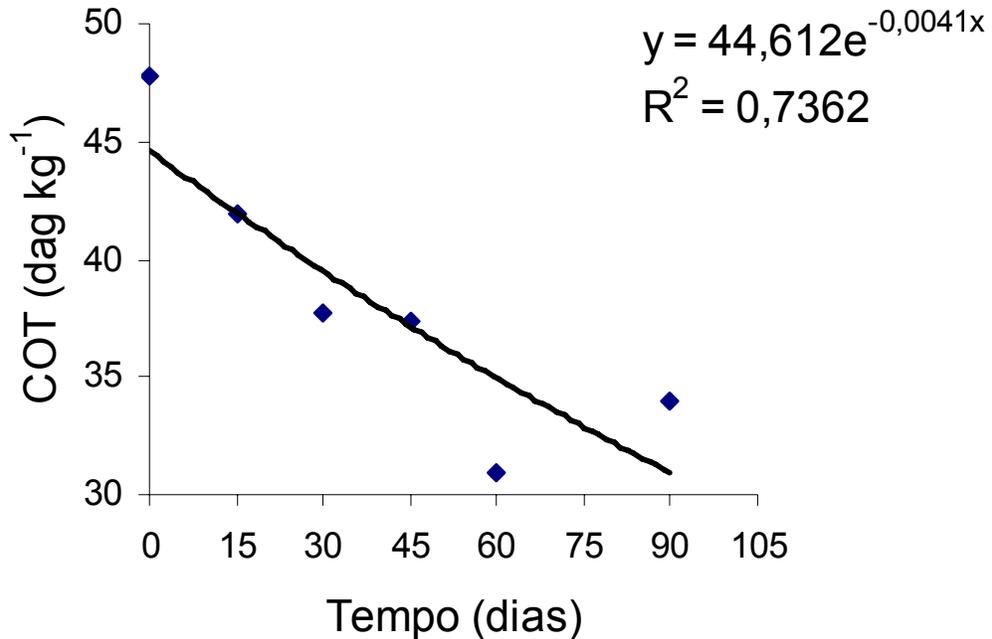


Figura 4.22. Variação na concentração de Carbono Orgânico Total em função do tempo de compostagem – LEA 02.

Esse aumento na concentração de N pode ser devido à redução na concentração de SV (MARA & STENTIFORD, 1983, citados por AZEVEDO, 1993) e, ou, a fixação desse nutriente por bactérias (MATOS *et al.* 1998).

Na Figura 4.23 está apresentada a variação da relação C/N em função do tempo de compostagem. A relação C/N apresentou duas fases distintas. Na primeira, correspondente à fase ativa, primeiros 45 dias de compostagem, se caracterizou pela redução acentuada na concentração de C e redução menos acentuada na concentração de N. Nesta fase, a relação C/N baixou de 13,8 para 8,9. A redução na concentração de N ficou em torno de 36%, enquanto que na de C ficou em torno de 61%.

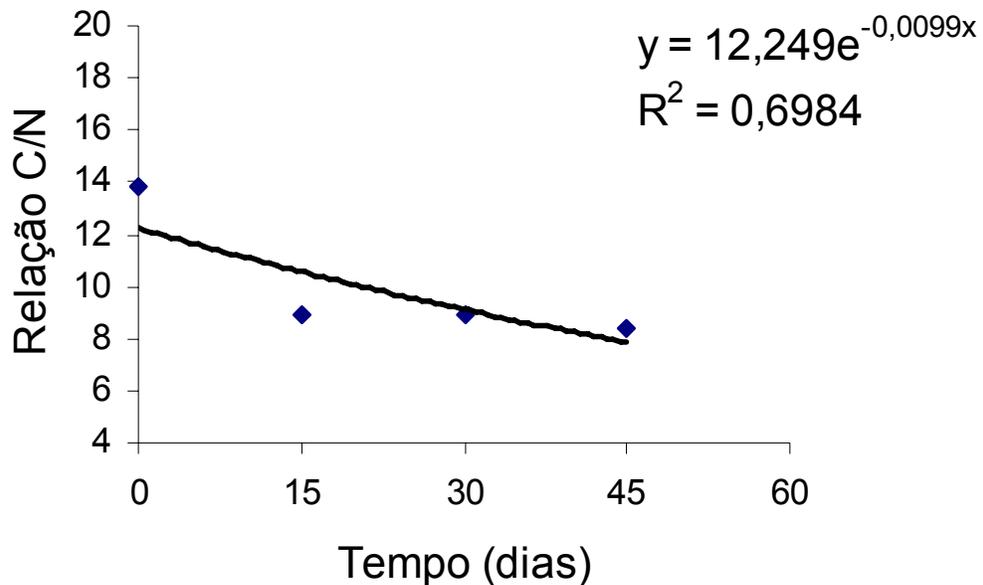


Figura 4.23. Variação na relação C/N em função do tempo de compostagem – LEA 02.

Na segunda fase, que se refere ao material já na fase de maturação, a relação C/N passou de 8,9 para 14,6, conforme apresentado na Tabela 4.1. Essa segunda fase se caracterizou por apresentar baixa redução na concentração de C e grande na de N, provavelmente por lixiviação, devido às chuvas. Nesta fase, a redução na concentração de N ficou em torno de 47%, enquanto que na do C ficou em torno de 4,5%.

4.2.4. LEA 03

4.2.4.1. Temperatura

Na Figura 4.24 está apresentada a variação da temperatura do material em compostagem na LEA 03. Conforme pode ser observado, houve aumento gradativo na temperatura do material, por ocasião da montagem (dia zero (0)), a 60 °C (no topo), já no 3º dia após a montagem da leira. Entretanto, tal como

ocorreu com a LEA 02, a temperatura da base não se elevou até os níveis recomendáveis. Atribui-se isso ao fato dessa região se encontrar próxima do duto de aeração, associada ao baixo conteúdo de água no material, no início do processo, que foi de $43,7 \text{ dag kg}^{-1}$ (b.u.).

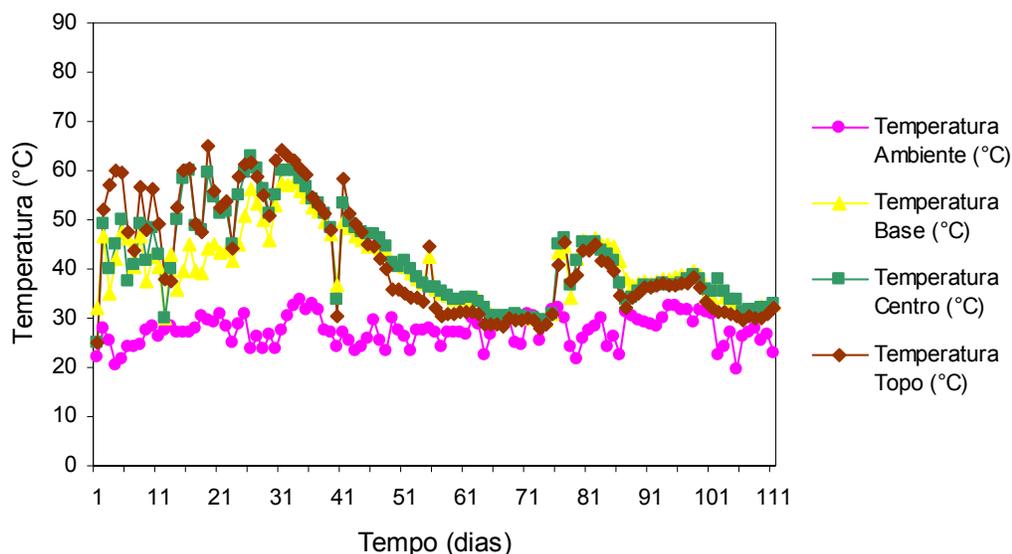


Figura 4.24. Variação da temperatura em função do tempo de compostagem – LEA 03.

Em termos gerais, as LEA 02 e 03 tiveram, nos primeiros 15 dias, comportamento muito semelhante, denotado por baixas temperaturas no material, ocorrendo alguns picos, depois de efetuada a correção no conteúdo de água do material, conforme pode ser observado a partir do 23º dia de compostagem, quando foi instalado o sistema de umedecimento do material. Nessa ocasião, as temperaturas alcançaram valores dentro da faixa ideal para eliminação de patógenos, que esta entre $55 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$, mantendo-se nessa faixa por maior período de tempo, enquanto que, antes da instalação do sistema de umedecimento, a temperatura se manteve acima de $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ por um período de apenas três a cinco dias.

Conforme pode ser observado na Figura 4.24 as temperaturas, oscilaram para mais ou para menos em função do conteúdo de água no material.

Depois da instalação do sistema, esse período chegou a 12 dias. Este fato, não só reduziu as intervenções para a correção de conteúdo de água no material como acelerou o processo de degradação e a eliminação dos microrganismos.

A fase ativa foi considerada encerrada aos 50 dias de compostagem, quando as temperaturas se tornaram inferiores a 40 °C. Depois de 74 dias de compostagem, 24 dias de maturação do material no pátio as temperaturas voltaram a atingir 45 °C, o que se deve, provavelmente, em razão da maior oxigenação da massa e homogeneização do material.

4.2.4.2. Conteúdo de Água

O conteúdo inicial de água, calculado por balanço de massa, foi de 86,0 dag kg⁻¹ (b.s.) e 43,7 dag kg⁻¹ (b.u.). Esses valores de conteúdo de água são os mesmos encontrados no material constituinte da LEA 01 e LEA 02, afinal, quando da montagem das leiras, buscou-se garantir as mesmas condições iniciais para que se pudesse avaliar a eficiência de cada processo.

Como ocorreu com a LEA 02, após o início da compostagem e, conseqüentemente da aeração, conteúdo de água do material da LEA 03 foi decrescendo até valores inferiores a 30 dag kg⁻¹ (b.u.), quando, então, o conteúdo de água foi corrigido para valores próximos a 55 dag kg⁻¹ (b.u.). Isto aconteceu ao longo de todo o processo, com o objetivo de garantir as condições ideais para compostagem.

Na Figura 4.25 mostra-se aspecto visual da LEA 03, depois de aberta, apresentando condições de umidade no material, denotadas pela coloração esbranquiçada, que indicam a presença de actinomicetos. Nesta figura mostra-se uma situação semelhante a ocorrida com a LEA 01.



Figura 4.25. Detalhe do perfil de distribuição de água no material constituinte da LEA 03.

4.2.4.3. pH

Os valores de pH estão apresentados na Tabela 4.1 e o seu comportamento mostrado na Figura 4.26.

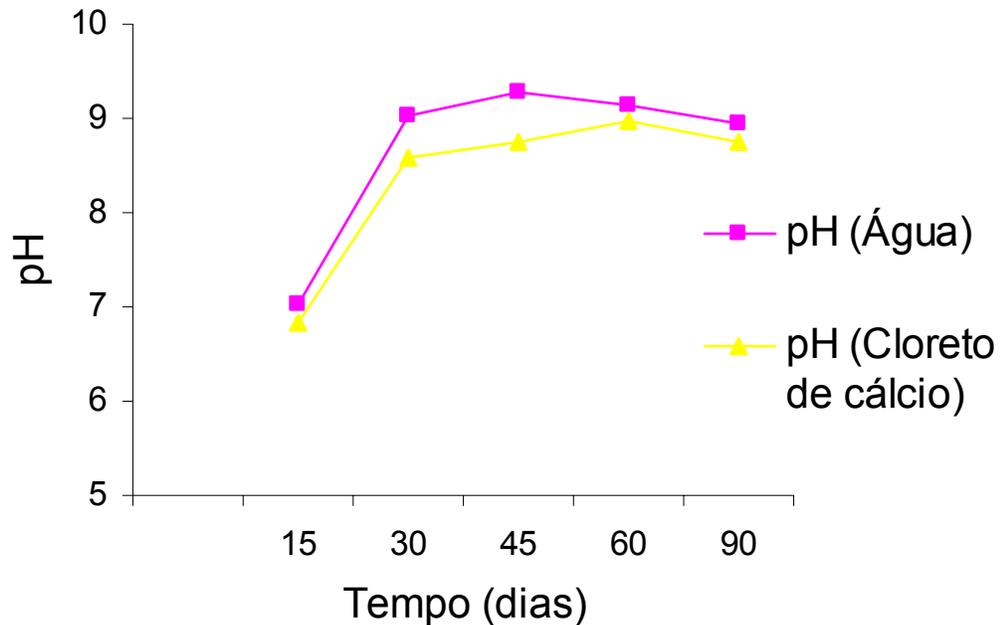


Figura 4.26. Variação do pH em função do tempo de compostagem – LEA 03.

Conforme pode ser observado na Figura 4.26, o pH H₂O, obtido aos 15 dias de compostagem, foi de 7,04, próximo da neutralidade. Segundo PEREIRA NETO (2004), esse pH se encontra na faixa ótima para maioria das bactérias (6 a 7,5) e fungos (5,5 a 8,0) se desenvolverem, o que pode indicar fase de acelerada degradação do material.

Analisando-se as Figuras 4.19 e 4.26, observa-se que o comportamento das LEA 02 e 03, em termos de pH, foi bastante semelhante.

O pH H₂O em torno de 9, obtido aos 30 dias de compostagem, pode indicar, tal como já discutido, a formação de amônia. O pH H₂O se manteve nesse patamar até os 90 dias, na faixa de valores considerados normais (7,5 a 9,0) do material apresentar ao final do período de compostagem.

4.2.4.4. Sólidos Voláteis

Os valores de SV no material constituinte da LEA 03 estão apresentados na Tabela 4.1 e a variação ao longo do tempo de compostagem na Figura 4.27.

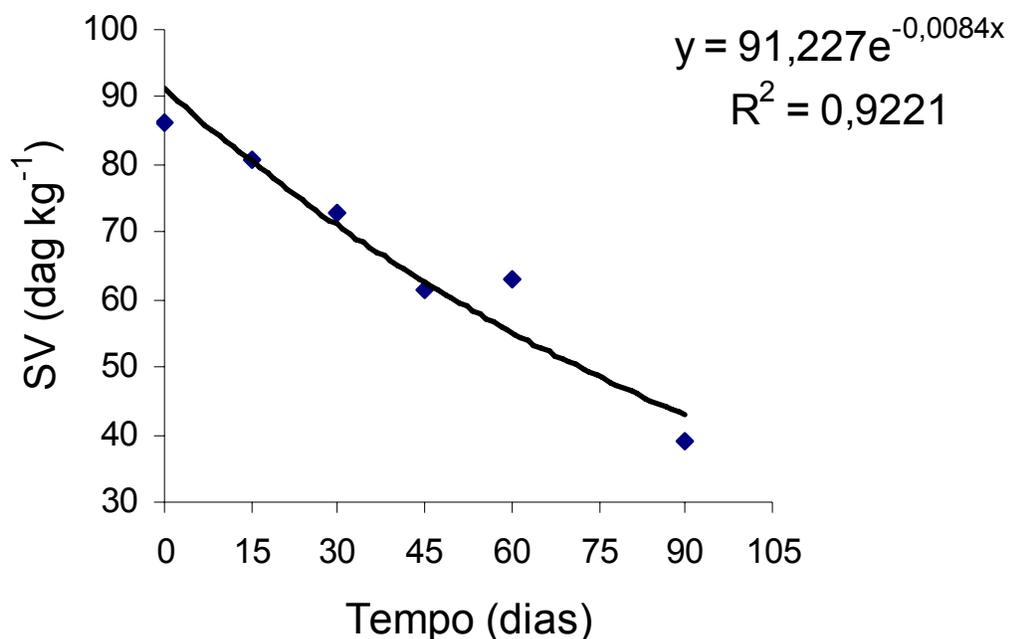


Figura 4.27. Variação na concentração de sólidos voláteis em função do tempo de compostagem – LEA 03.

Conforme pode ser observado na Tabela 4.1 e na Figura 4.27, os valores de SV da LEA 03 apresentaram redução exponencial ao longo do período de compostagem. A redução no valor de SV, em 90 dias de compostagem, foi de 54,5%, sendo que nos primeiros 45 dias (fase ativa) foi de 28,8%. A LEA 01, que foi compostada com bagaço de cana-de-açúcar e carcaças de frango inteiras, apresentou redução de 29,5%, em 90 dias de compostagem; na LEA 02, constituída pelos mesmos materiais da LEA 01, porém com frango triturado, a redução foi de 28,9%, nos primeiros 45 dias.

Na Figura 4.28 estão apresentadas as variações de SV em função do tempo de compostagem em todos os experimentos.

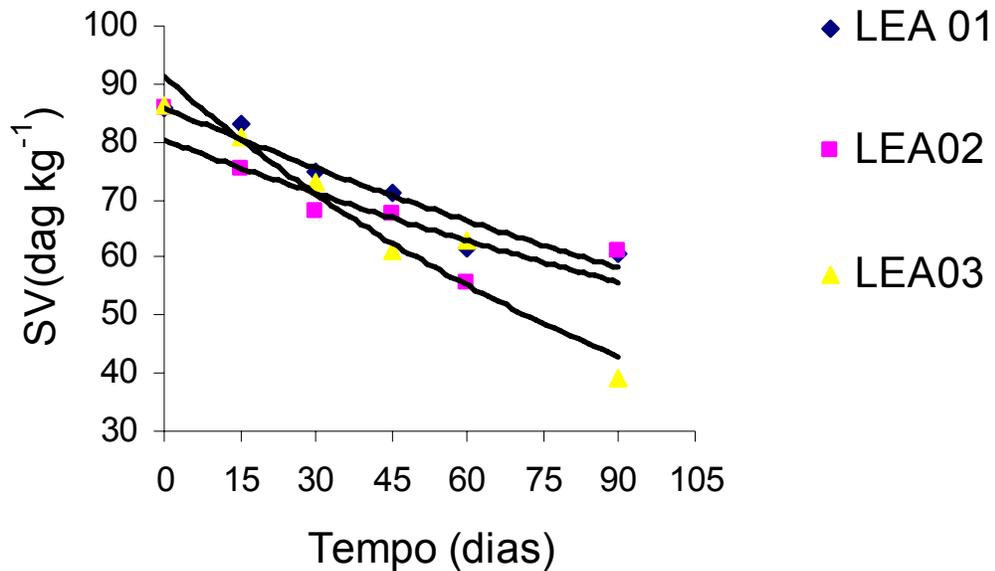


Figura 4.28. Variação na concentração de sólidos voláteis em função do tempo de compostagem – Todos os experimentos.

Como pode ser observado, na Figura 4.28, as leiras que receberam frango triturado (LEA 02 e 03), nos primeiros 45 dias do processo de compostagem, apresentaram um decréscimo mais rápido no valor de SV. Entretanto, aos 90 dias de compostagem, a LEA 03 apresentou maior redução total de SV. Em termos comparativos, a redução de SV no material mantido na Composteira, aos 90 dias, foi de 22% enquanto na LEA 03, já aos 45 dias, uma redução de quase 30% já havia sido alcançada, indicando eficiência de degradação muito maior na LEA 03.

4.2.4.5 Nutrientes

Na LEA 03, relação C/N obtida inicialmente ficou em 13,6:1, que está dentro dos valores sugeridos por HENRY (2003), que é 10 a 20:1. As concentrações de N e C, bem como a relação C/N está apresentada na Tabela 4.1. A variação na concentração de N em função do tempo de compostagem está apresentada na Figura 4.29.

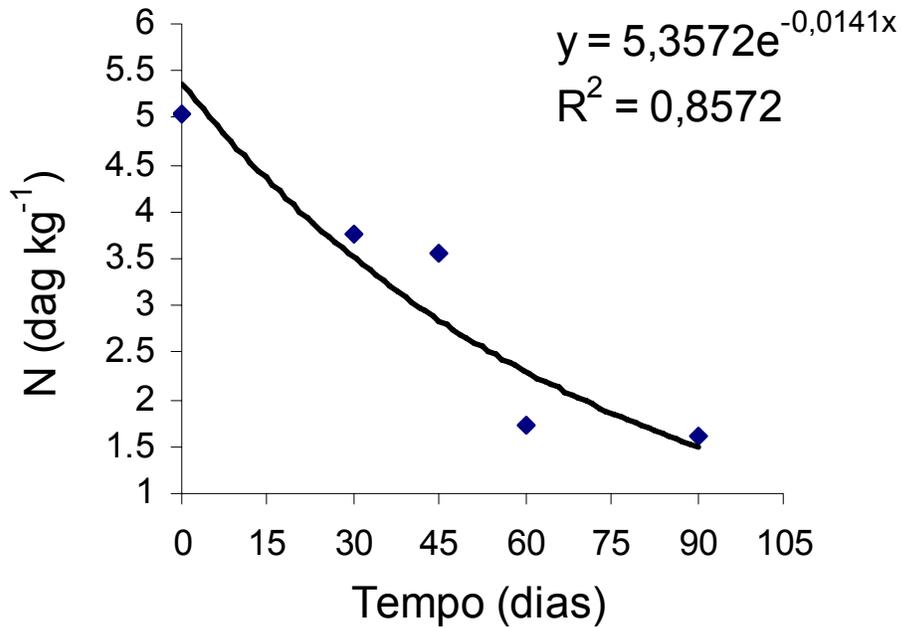


Figura 4.29. Variação na concentração de Nitrogênio em função do tempo de compostagem – LEA 03.

Conforme pode ser observado na Figura 4.29, a concentração de N decresceu de forma exponencial com o tempo, tal como ocorrido nas outras leiras. A baixa relação C/N inicial, que é função da grande concentração de N, associada aos valores elevados de temperatura e pH no material, promoveu a perda de N na forma de amônia. Conforme já citado anteriormente, esse comportamento é comum em compostagem com esse tipo de resíduo, associada a uma baixa relação C/N inicial.

Conforme pode ser verificado a partir dos dados apresentados na Tabela 4.1, a redução da concentração de N, ao longo do processo, foi de 68%. Nos primeiros 45 dias, essa redução foi de 29%.

Na Figura 4.30 está apresentada a variação na concentração de COT no material em função do tempo de compostagem. Essa variável está associada à degradação da matéria orgânica, assim, quanto maior for o decréscimo na concentração de COT maior será a taxa de degradação do material na leira.

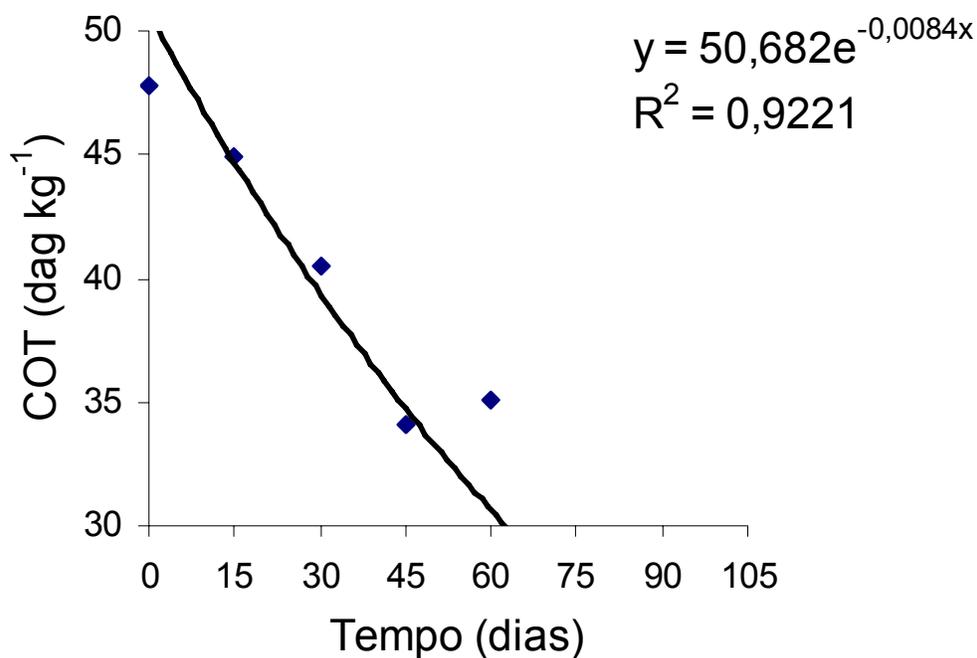


Figura 4.30. Variação na concentração de Carbono Orgânico Total em função do tempo de compostagem – LEA 03.

Na Figura 4.30 e na Tabela 4.1, pode ser observado que a redução no valor de COT foi de 59,3%, enquanto que no material constituinte da LEA 01 foi de 29,5%; na LEA 02 foi de 28,8% e na composteira foi de 22%, portanto, na LEA 03 a compostagem foi a mais acelerada, fato esse que deve ter sido favorecido pela palha de café como fonte de C. A palha de café apresentou relação C/N de 36,9:1 contra 167:1 do bagaço de cana-de-açúcar e ambos os materiais foram usados nas mesmas proporções, assim os melhores resultados obtidos na LEA 03 podem ser creditados à mais baixa relação C/N da palha de café ou à maior disponibilização de N para os microrganismos, proporcionadas por esse material.

Na Figura 4.31 está apresentada a variação da relação C/N em função do tempo de compostagem, nos primeiros 30 dias.

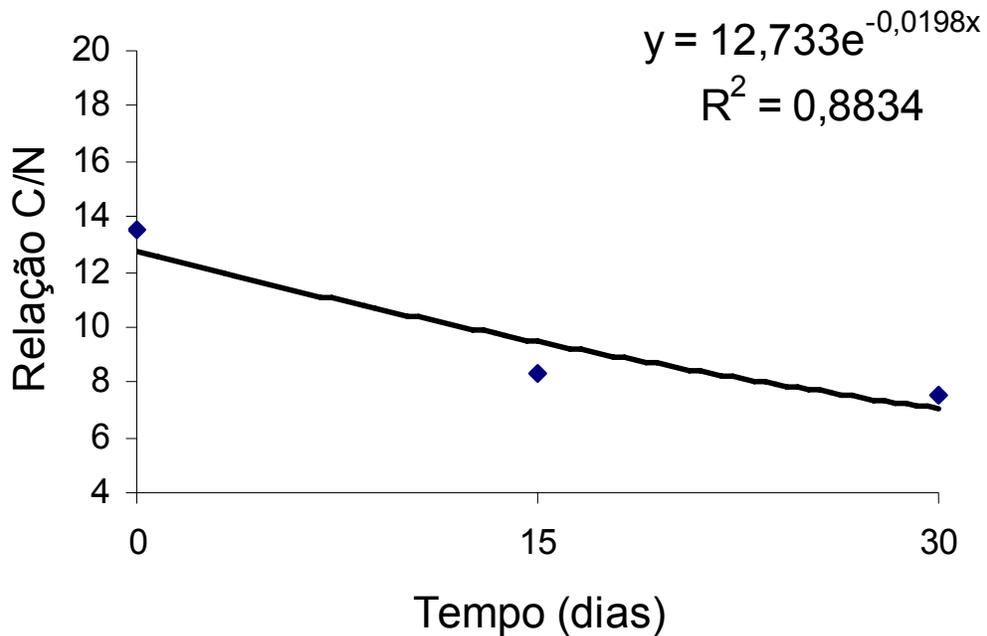


Figura 4.31. Variação da relação C/N em função do tempo de compostagem – Leira 03.

Na Tabela 4.1, a variação da relação C/N observada demonstra que a compostagem na LEA 03 também apresentou duas fases distintas, nos primeiros 30 dias houve redução considerável na concentração do C e redução moderada na concentração do N, o que refletiu na redução da relação C/N da mistura.

Na segunda fase, com a redução das fontes de carbono facilmente oxidáveis, a redução na concentração de C passou a ser menor, enquanto que a redução na concentração de N se mostrou acentuada. Essa combinação faz com a relação C/N aumente.

FLYNN & WOOD (1996), analisando as mudanças químicas e de temperaturas na compostagem de cama de frango, observaram, em leiras que iniciaram com relação C/N de 24, 26 e 26:1, após 84 dias de compostagem, relações C/N aumentadas ou ligeiramente reduzidas para valores de 22, 27 e 28:1, respectivamente. Os autores atribuíram isto ao fato de faltar N para que a compostagem se processasse de forma eficiente.

4.3. Aspectos Sanitários do Composto Orgânico Produzido

Os microrganismos de interesse nesse trabalho foram os coliformes termotolerantes e a *Salmonella*. Os resultados das análises microbiológicas estão mostrados na Tabela 4.2. Esses microrganismos encontram-se dentre os mais utilizados para avaliar a qualidade, em termos sanitários, do composto final que, segundo PEREIRA NETO (2003), são as bactérias do grupo coliforme, principalmente os estreptococos, a *Escherichia coli* e a *Salmonella*.

Para efeito de avaliação da eficiência de cada processo na eliminação de organismos patogênicos, foi usado, como referência, os valores contidos na resolução CONAMA 375. Esta resolução exige a ausência de *Salmonella* em amostra de 10 g de ST e que a contagem de organismos de coliformes termotolerantes esteja menor que 10^3 NMP/g de ST.

Tabela 4.2. Parâmetros microbiológicos durante os processos de compostagem:

microrganismos	Dia	Experimentos			
		Composteira	LEA 01	LEA 02	LEA 03
Coliformes a 45°C (NMP*/g)	0	$2,9 \times 10^4$	$4,6 \times 10^6$	$2,4 \times 10^6$	$1,5 \times 10^6$
	15	NA	< 3	9,2	3,6
	20	< 3	NA	NA	NA
	30	NA	3,6	< 3	< 3
	40	< 3	NA	NA	NA
	45	NA	< 3	< 3	$> 1,1 \times 10^3$
	60	< 3	NA	NA	NA
Salmonella 25 g	0	Presença	Ausência	Presença	Ausência
	15	NA	Ausência	Ausência	Ausência
	20	Ausência	NA	NA	NA
	30	NA	Ausência	Ausência	Ausência
	40	Ausência	NA	NA	NA
	45	NA	Ausência	Ausência	Ausência
	60	Ausência	NA	NA	NA

1 – NMP = Número Mais Provável.

2 – Análises feitas de acordo com IN 62 de 26 de agosto de 2003 – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.

NA – Não analisado.

Os resultados apresentados na Tabela 4.2 comprovam a eficiência do primeiro estágio da composteira na eliminação de microrganismos indesejáveis.

Assim, temperaturas superiores a 65 °C no material mantidas no processo do 2º ao 6º dias já foram suficientes para a eliminação ou inativação dos microrganismos monitorados. Os resultados apresentados indicam a eliminação e, ou, redução de *Salmonella* e coliformes termotolerantes, após 20 dias de execução da compostagem.

Os resultados mostraram, também, eficiência do processo de Leiras Estáticas Aeradas na redução e, ou, eliminação de microrganismos do tipo Coliformes termotolerantes e *Salmonella*. Comparando com os valores preconizados pela legislação CONAMA 375, os processos, LEA 01, LEA 02 e LEA 03, atenderam, já aos 15 dias de compostagem, os padrões microbiológicos estabelecidos. Entretanto, a amostra de 45 dias da LEA 03 apresentou uma quantidade superior ao exigido pela legislação de referência. Este fato pode ser devido às condições sanitizantes heterogêneas, especialmente, a umidade e as temperaturas e, ou, a uma recontaminação da massa de compostagem.

Segundo PINTO (2001), temperaturas superiores a 60°C, por um período de dois dias, seriam suficientes para garantir a eliminação de *Salmonella*. O mesmo autor relata que, para *E. coli*, 60 minutos seriam suficientes.

COSTA *et al.* (2006), em experimento semelhante, porém adicionando 1 L de substrato contendo *Salmonella sp* na diluição de 10⁸ unidades por mL, na última camada da composteira, com área aproximada de quatro metros quadrados, não conseguiu eliminação satisfatória desses microrganismos no primeiro estágio do processo. Segundo os autores as temperaturas máximas alcançadas no processo variaram de 54,1°C a 66,2 °C.

4.4. Aspectos Qualitativos, em Termos de Valor Fertilizante

4.4.1. Capacidade de Troca Catiônica (CTC)

A CTC mede a capacidade do composto de adsorver cátions. Sendo que essa capacidade será tanto maior, quanto maior for o índice de humificação do material. Isto porque as substâncias húmicas que compõe o composto são colóides eletronegativos com grande superfície específica. O processo de humificação, que ocorre, principalmente, na maturação e qualidade do composto, pode ser medida pelo valor da CTC do composto ou também pela relação CTC/COT, ou seja, estas variáveis dão indicativos do grau de maturação do composto orgânico.

Os valores obtidos para CTC e CTC/COT, no material mantido na composteira, estão apresentados na Tabela 4.2.

Como pode ser observado a CTC, após 60 dias de manutenção na composteira, foi de $175 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, o COT foi $41,52 \text{ dag kg}^{-1}$ e a relação CTC/COT foi de 4,22. Após 90 dias de compostagem, 30 dias de reviramento no pátio de compostagem, o material retirado da composteira apresentou CTC de $209 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, COT de $36,37 \text{ dag kg}^{-1}$ e relação CTC/COT de 5,75. Nos primeiros 30 dias de compostagem no 2º Estágio, houve acréscimo de 19% no valor da CTC, juntamente com uma redução de $12,4 \text{ dag kg}^{-1}$ na concentração de COT. Isto ocorreu devido à degradação da matéria orgânica, que proporcionou maior humificação do material, proporcionando aumento no valor da CTC e a transformação do COT em dióxido de carbono, reduzindo sua concentração. RODELLA & ALCARDE, (1994) misturando serragem e turfa, em diferentes proporções, verificou que a CTC e a relação CTC/COT variava proporcionalmente ao teor de matéria orgânica presente na mistura. Nesse experimento, a CTC variou de $5,48 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, na mistura com 0% de turfa, até $51,57 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, na mistura com 41% de turfa. A relação CTC/COT variou de 0,35 a 3,38. Segundo HARADA & INOKO (1980) valores de CTC/COT superiores a 1,7 indicam bom grau de humificação do material orgânico. De acordo com esse valor de

referência, os materiais compostados nesse trabalho podem ser classificados da seguinte forma:

- O material da composteira apresentou coeficiente de humificação de cerca de 2,5 vezes o valor de referência (1,7), já no final do 1º estágio de degradação, e de 3,5 vezes, nos 30 primeiros dias do 2º estágio;
- O material da LEA 01 apresentou coeficiente de humificação, aos 45 dias de compostagem, de 3 vezes o valor de referência (1,7). Após 60 dias de compostagem, essa relação se manteve;
- O material da LEA 02 apresentou coeficiente de humificação de 3 vezes o valor de referência (1,7), aos 30 dias e, manteve esse coeficiente aos 45 dias. Aos 60 dias, o coeficiente de maturação foi 4 vezes superior ao valor de referência e, aos 90 dias, esse valor reduziu para 3,4;
- O material da LEA 03 apresentou coeficiente de humificação de 2,65, aos 30 dias, de 3,4, aos 45 dias e de 5,7, aos 90 dias.

Avaliando os índices obtidos nos processos de compostagem que têm, em sua composição, os mesmos materiais, observa-se que:

- O material da LEA 03 apresentou coeficiente de maturação, aos 90 dias, 1,7 vezes o valor obtido no material da composteira. Como pode ser observado na Tabela 4.2, este valor foi conseguido não pelo ganho em termos de CTC, mas da redução do COT;
- O material da LEA 02 apresentou coeficiente de maturação, aos 90 dias, 1,3 vezes o valor obtido no material da LEA 01. Essa diferença é devida ao ganho, em termos de CTC, e também à redução do COT.

Diante destes resultados, observa-se que, em relação a essa variável, a trituração das carcaças de frango, favorecendo a degradação e humificação do material. Entretanto, conforme pode ser observado pelos valores apresentados na Tabela 4.2, esta melhoria foi, basicamente, em função da redução do COT, ou seja, da aceleração do processo de compostagem.

4.4.2 – Outros Nutrientes

Na quantificação dos valores de concentração dos nutrientes, fósforo, potássio e sódio no material em compostagem, foram observados pequenas variações com o tempo de compostagem, sendo as diferenças creditadas mais à amostragem. Os valores apresentados na Tabela 4.1 foram determinados com base na média dos valores encontrados nas amostras de 90 dias do experimento.

Embora as concentrações desses nutrientes no material, ao contrário das concentrações de C e N, não variam ao longo do processo de compostagem, sendo apenas função das matérias primas da mistura inicial, KUMAR *et al.* (2007) encontrou perda significativa de P no material quando a compostagem foi conduzida nos períodos de chuva. As concentrações de P nos materiais deste trabalho variaram de 1,84 dag kg⁻¹, no período de chuvas, a 2,91 dag kg⁻¹, no período de verão e os autores atribuíram essa perda à lixiviação desse nutriente através da leira. Os valores encontrados neste trabalho foram de 1,47 dag kg⁻¹, no material da Composteira, 1,98 dag kg⁻¹, no material da LEA 01, 2,39 dag kg⁻¹, no material da LEA 02 e de 2,12 dag kg⁻¹, no material da LEA 03. COSTA *et al.* (2006) encontrou concentração de P de 2,69 dag kg⁻¹ no composto final, enquanto SILVA *et al.* (1998), citados por COSTA *et al.* (2006), trabalhando com compostagem de resíduos sólidos de frigorífico, encontraram P igual a 0,71 dag kg⁻¹ e COSTA *et al.* (2005), trabalhando com resíduos sólidos da indústria de desfibrilação de algodão, encontraram concentração de 0,35 dag kg⁻¹ de P.

A concentração de K no material foi de 2,20 dag kg⁻¹, no material retirado da Composteira, 1,71 dag kg⁻¹, no material da LEA 01, 2,42 dag kg⁻¹, no material da LEA 02 e 2,63 dag kg⁻¹, no material da LEA 03. Essas variações se devem, provavelmente, às diferentes proporções de palha de café e frango nas amostras analisadas. KUMAR *et al.* (2007) encontrou em suas leiras de compostagem concentração de K entre 2,13 e 3,2 dag kg⁻¹. Os mesmos autores citam outras pesquisas, nas quais os valores de K variaram de 1,7 a 4,07 dag kg⁻¹. COSTA *et al.* (2006) encontraram concentração de K de 2,67 dag kg⁻¹ no composto final. SILVA *et al.* (1998), citados por COSTA *et al.* (2006), trabalhando com compostagem de resíduos sólidos de frigorífico, encontraram concentração de

0,97 dag kg⁻¹ de K e COSTA *et al.* (2005), trabalhando com resíduos sólidos da indústria de desfibrilação de algodão, encontrou concentração de 2,04 dag.kg⁻¹ de K. Essas diferenças apresentadas comprovam o que foi dito anteriormente que as concentrações dos nutrientes, no composto final, estão diretamente relacionadas aos materiais que compõe a mistura inicial.

As concentrações de Na encontradas foram de 0,47 dag kg⁻¹, no material retirado da Composteira, 0,58 dag kg⁻¹, no material da LEA 01, 0,77 no material da LEA 02 e 0,67 dag kg⁻¹, no material da LEA 03. Segundo MATOS (2006a), a cama de frango tem cerca de 0,54 dag kg⁻¹, palha de café 0,016 dag kg⁻¹ e resíduos da cana-de-açúcar varia de 0,04 a 1,4 dag kg⁻¹. Com exceção do valor obtido no material da composteira, os demais valores seriam os mesmos encontrados, caso se fizesse uma composição dos diferentes materiais que compõe cada leira e suas respectivas proporções.

4.5. A Responsabilidade Social das Empresas e a Sustentabilidade da Produção

Durante a parte inicial do desenvolvimento deste trabalho, quando então houve a necessidade de ir a campo em busca da matéria-prima para desenvolver a pesquisa, deparou-se com uma realidade triste e, aparentemente, negligente quer por parte dos órgãos fiscalizadores, quer por parte da agroindústria, o elo mais forte economicamente cadeia produtiva de frangos de corte. Pôde-se constatar que, em todas as granjas visitadas, os funcionários não trabalhavam com equipamentos de proteção adequados, havia crianças andando descalças no entorno e dentro das granjas e animais domésticos em contato tanto com as crianças quanto com os resíduos gerados por essas granjas. Além disso, os resíduos gerados por essas granjas, tais como cama de frango e as aves mortas, não eram manuseados com o devido cuidado e critério. As aves mortas, durante cada dia do ciclo produtivo eram colocadas em composteiras, conforme orientação da agroindústria, entretanto, depois de cumprido um período pré-estabelecido pela agroindústria (60 dias de tratamento na composteira), era disposto no solo sem qualquer critério ou orientação técnica.

Este cenário é preocupante, principalmente, quando se considera a crescente demanda de alimentos no Brasil e em outros países, em especial carne de frango, paralelamente a uma melhor consciência da população mundial a respeito das questões sociais e ambientais. Essa mudança de postura do consumidor, especialmente, aqueles de países desenvolvidos, tem levado muitas empresas a repensar a forma como elas se relacionam com a sociedade e o meio ambiente. Nesse sentido, MACHADO FILHO (2004) relata que tem havido aumento da pressão dos mercados externos, tanto no que se refere aos aspectos intrínsecos da qualidade dos produtos, quanto no que diz respeito a rastreabilidade de todo o processo produtivo, incluindo as relações sociais com fornecedores, processos de abate e práticas ambientais adequadas. Segundo VERDOLIN e ALVES (2005), com o advento da globalização da economia, a revolução tecnológica e o aumento do fluxo de informações deram início à construção de uma nova filosofia corporativa, a responsabilidade social, na qual as questões sociais e ambientais são pontos essenciais e, por que não dizer, vitais para as organizações.

Pela ótica da responsabilidade social, qualquer atividade de negócios possui uma dimensão ética, complementar as suas dimensões econômica e legal (MACHADO FILHO, 2004.). De acordo com o Business Social Responsible Institute⁴ (BSR, 2001), citado por MACHADO FILHO (2004), de uma forma ampla, o termo responsabilidade social corporativa se refere às decisões de negócios, tomadas com base em valores éticos que incorporam as dimensões legais, o respeito pelas pessoas, comunidades e meio ambiente. Sustenta, ainda, que o conceito de empresa socialmente responsável se aplicará àquela que atue no ambiente de negócios de forma que atinja ou exceda as expectativas éticas, legais e comerciais do ambiente social no qual a empresa se insere. Nessa mesma linha de pensamento, o INSTITUTO ETHOS (2002; 2004), considera que as empresas que possuem responsabilidade social são co-responsáveis pelo desenvolvimento social. E que, a empresa socialmente responsável tem como principal característica a coerência ética nas práticas e relações com acionistas, funcionários, prestadores de serviço, fornecedores, consumidores, comunidade,

⁴ Principal entidade mundial na área de responsabilidade social, reunindo 1600 empresas que representaram um faturamento total em torno de US\$ 1,5 bilhão de dólares em 1999.

governo e meio-ambiente contribuindo para o desenvolvimento contínuo de todos e dos relacionamentos entre si e com o meio ambiente. Além disso, ao adicionar às suas competências básicas a conduta ética e socialmente responsável, as empresas conquistam o respeito das pessoas e das comunidades atingidas por suas atividades, o engajamento de seus colaboradores e a preferência de seus consumidores.

O objetivo do presente tópico é fazer uma breve reflexão sobre a necessidade de se pensar e agir no sentido de melhorar as relações, em todos os níveis da cadeia produtiva, no que diz respeito às pessoas envolvidas no processo e às questões ambientais relacionadas. Nesse sentido, sugere-se que seja pensada a produção alimentar como um conjunto de elos de uma cadeia na qual não importam somente as questões financeiras, mas tudo e todos que são afetados, diretos e indiretamente, pelo processo produtivo, em si. Além disso, percebe-se a necessidade de definir e fiscalizar as responsabilidades de todos os envolvidos. Percebe-se que no curso da cadeia produtiva alimentar, tal como tem sido praticada, tem-se buscado o aperfeiçoamento da produção, em cada elo da cadeia, aumentando a produtividade e a lucratividade sem, contudo, dar a devida atenção às questões ambientais e sociais. Entretanto, essa é uma visão míope que busca o maior lucro financeiro possível em detrimento dos aspectos sociais e ambientais, o que pode trazer sérias conseqüências, em médio e longo prazo, tanto ao meio ambiente e a saúde dos trabalhadores envolvidos no processo, quanto a restrições de mercado para os produtos obtidos a partir desse modelo produtivo.

Acredita-se que uma parceria que envolvesse a agroindústria, a associação de avicultores, as instituições de ensino e pesquisa da nossa região poderia ajudar a desenvolver um sistema de gestão da cadeia produtiva na qual todos poderiam se beneficiar e, assim, minorar os problemas sociais e ambientais. Além disso, com uma atitude pró-ativa, poder-se-ia planejar melhor a expansão da cadeia produtiva no sentido de evitar ou minimizar os impactos ambientais inerentes ao processo de produção. A agroindústria poderia, por exemplo, subsidiar a construção de unidades de tratamento para os resíduos orgânicos, como unidades de compostagem. O Estado poderia criar incentivos fiscais que promovessem

tanto o uso quanto o beneficiamento de compostos orgânicos. Os produtores rurais associados, juntamente com as instituições de ensino e pesquisa, trabalhariam no sentido de desenvolver tecnologias e formar mão-de-obra para a operação dos processos de reciclagem dessa grande quantidade de resíduos orgânicos. Além da produção de um composto orgânico, que é um excelente condicionador de solo, a compostagem, conforme apresentado neste trabalho, é a alternativa mais adequada para tratamento de resíduos orgânicos, tanto do ponto de vista sanitário e ambiental quanto econômico.

Essa “força tarefa” poderia proporcionar melhor condição de vida aos trabalhadores envolvidos na produção de frangos, melhorando a saúde e auto-estima de todos, poderia gerar mais empregos e renda para a região (aspectos positivos economicamente), melhorar a sustentabilidade dos negócios tanto no sentido econômico quanto ambiental, além de se desenvolver uma cultura de respeito ao ser humano e ao meio ambiente, que irá trazer benefícios para essa e as próximas gerações.

A direção e o sentido do desenvolvimento das atividades agrícolas e agroindustriais deverão voltar-se para a qualidade e sustentabilidade, não somente econômica, mas também social, ambiental e tecnológica (VALENZA PAIVA, 2007).

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados obtidos pode se concluir que:

- os materiais cama de frango de bagaço de cana-de-açúcar proporcionaram compostabilidade satisfatória, quando associados à cama de frango e carcaças de frango;
- as temperaturas atingidas, na primeira fase, no Método da Composteira foram suficientes para a eliminação das bactérias patogênicas e indicadores de interesse presentes no material.
- na composteira, principalmente na primeira fase, o conteúdo de água no material foi fator limitante à degradação, o que se verificou pela baixa redução na concentração de sólidos voláteis;
- a redução de sólidos voláteis na composteira foi muito baixa no primeiro estágio do processo, entretanto foi maior no segundo estágio, o que indicou que, ao contrário do que tem sido recomendado aos avicultores pela agroindústria da região da zona da mata mineira, sem a fase de reviramento, a degradação do material não atinge padrões de composto orgânico;
- nas Leiras Estáticas Aeradas (LEA), a palha de café proporcionou melhores resultados que o bagaço de cana-de-açúcar na compostagem da carcaça de frango, como foi demonstrado pela diferença na redução de SV.
- nas LEA 02 e 03, houve maior dificuldade em se alcançar temperaturas sanitizantes, o que pode ser atribuído ao ressecamento da massa pela aeração forçada. Entretanto, a redução de SV, nessas duas leiras, se deu de forma mais

acelerada, especialmente, nos primeiros 15 dias. Este fato foi atribuído a tituração das carcaças de frango que proporcionaram uma maior superfície específica facilitando a ação dos microrganismos.

- o sistema de aeração das LEA deve ser equipado com dispositivo de umedecimento do ar para que as condições do meio fiquem mais favoráveis à ação dos microrganismos responsáveis pela degradação. A formação de uma zona de condensação de água no topo das leiras pode ser um fator indicativo das vantagens de se ter sistemas alternativos de insuflação/sucção para aeração do material, obtendo-se, com isso, melhor distribuição da água no material;

- os materiais produzidos, tanto na composteira como nas leiras estáticas aeradas, já no primeiro estágio (fase de decomposição ativa), apresentaram coeficientes de humificação muitas vezes superiores aos indicados como adequados (1,7). No segundo estágio (período de estabilização do material) o coeficiente de humificação aumentou ainda mais no material retirado da composteira, permanecendo igual na LEA 01 e aumentando muito na LEA 02 e LEA 03. Isso demonstrou que a trituração das carcaças de frango favoreceu a humificação do material compostado;

- houve, tanto no material mantido na composteira como no das leiras estáticas aeradas, redução da concentração de N, entretanto maiores reduções foram observadas nas últimas, pela maior exaustão dos gases de amônia produzidos.

- todos os sistemas avaliados se mostraram eficientes na eliminação ou redução dos microrganismos *Salmonella* e coliformes termotolerantes, a níveis compatíveis com o que é exigido pela legislação CONAMA 375.

Diante das experiências e resultados obtidos recomenda-se que a compostagem de carcaças de frango seja melhor estudada, especialmente, o método de Leiras Estáticas Aeradas. Nesse sentido, apresentam-se as seguintes recomendações:

- A excessiva perda de nitrogênio, ocorrida no presente trabalho, pode ser evitada e, ou, amenizada através de uma relação C/N mais adequada ou mesmo pela adição sulfato de cálcio ou cal.
- A umidade demonstrou ser um fator condicionante do processo, sendo assim, um estudo mais aprofundado de mecanismos de umedecimento das LEA e composteira é de suma importância, especialmente, para evitar ou minimizar a intervenção no processo para correção da umidade. Afinal, em função das características bacteriológicas desses resíduos, a intervenção traz riscos à saúde dos operadores do sistema.
- A compostagem em LEA, para esses tipos de resíduos, ainda precisa de estudos mais aprofundados. Parece ser uma boa alternativa de estudo, métodos alternados de aeração. Acredita-se que essa alternância pode acelerar a degradação do material pelo deslocamento das zonas de maior aquecimento no interior da leira.
- A composteira mostrou-se eficiente, em termos de sanitização, mas não na estabilização da matéria orgânica, medida pela redução de SV. Além disso, parece ser limitada em se tratando de grandes quantidades de resíduos. Nesse sentido, seria importante um estudo comparativo de custos envolvidos nos processos LEA e composteira, considerando as potencialidades e limitações de cada um.
- A ausência de temperaturas sanitizantes nas regiões periféricas das LEA prejudicou a eliminação de microrganismos indicadores de interesse, bem como a uma degradação mais uniforme da matéria orgânica. Nesse sentido, recomenda-se o uso de um material isolante na coberturas das LEA , podendo ser um composto maturado

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU JUNIOR, C.H.; MURAOKA, T.; OLIVEIRA, F.C. *Cátions trocáveis, capacidade de troca de cátions e saturação de bases em solos brasileiros adubados com composto de lixo urbano*. **Scientia Agrícola**, vol. 58, Piracicaba, 2001. p. 813-824.

ALEXANDER, M. "*Introduction to soil microbiology*". New York, J. Wiley and Soons, 1977. 467p apud AZEVEDO, M.A. *Estudo e avaliação de quatro modos de aeração para sistemas de compostagem em leiras*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG. (Dissertação de Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, 1993. 230p.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION – *Standard methods for the examination of water and wastewater*. New York: APHA, WWA. WPCR, 19a. Ed., 1995.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION – *Standard methods for the examination of water and wastewater*. New York: APHA, WWA. WPCR, 20th Ed., 1998.

ASTONI, D.M.; MATOS A.T.; SARTORI, M.A.; SILVA, N.C.L.; BARROS, R.T.P.; LUIZ F., A.R. *Perda de carga em ar forçado em colunas de material orgânico com diferentes profundidades e estágios de degradação bioquímica*. Engenharia na Agricultura, vol. 16, n.1, janeiro – março, 2003.

AUSVETPLAN. (1996). *Operational procedures manual disposal, Edition 2.0, Disposal Plan, 8-130-131*. Retrieved April 21, 2003, from <http://www.aahc.com.au/ausvetplan/disfnl2.pdf> apud MUKHTAR, S.; KALBASI A.; AHMED A. *Carcass Disposal: A Comprehensive Review*. National Agricultural Biosecurity Center Consortium, USDA APHIS Cooperative Agreement Project, Carcass Disposal Working Group, Kansas State University. Kansas, 2004. Disponível em: <http://fss.k-state.edu/research/books/carcassdisp.html>. Acesso em: 11/09/2007.

AZEVEDO, M.A.; PEREIRA NETO, J.T. *Avaliação de um sistema de aeração forçada para leiras de compostagem*. In: *Reunião Anual da SBPC*, 1991, Rio de Janeiro. p. 667-688.

AZEVEDO, M.A. *Estudo e avaliação de quatro modos de aeração para sistemas de compostagem em leiras*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG. (Dissertação de Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, 1993. 230p.

BACH, P.D., SHODA, M.; KUBOTA, H. *Rate of composting of dewatered sewage sludge in continuously mixed isothermnal reactor. Journal of Fermentation Technology*", 62, 1984. p. 285-292 apud AZEVEDO, M.A. *Estudo e avaliação de quatro modos de aeração para sistemas de compostagem em leiras*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG. (Dissertação de Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, 1993. 230p.

BAGLEY, C.B. *Alternatives for dead animal disposal*. Utah State University Wild West Veterinary Conference. Logan, Utah. 2002 apud MUKHTAR, S.; KALBASI A.; AHMED A. *Carcass Disposal: A Comprehensive Review*. National Agricultural Biosecurity Center Consortium, USDA APHIS Cooperative Agreement Project, Carcass Disposal Working Group, Kansas State University. Kansas, 2004. Disponível em: <http://fss.k-state.edu/research/books/carcassdisp.html>. Acesso em: 11/09/2007.

BERTOLDI, M., VALLINI, G.; PERA, A. *The biology of composting: a review*". *Waste Management & Research*, 1, 1983. p.157-176 apud AZEVEDO, M.A. *Estudo e avaliação de quatro modos de aeração para sistemas de compostagem em leiras*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG. (Dissertação de Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, 1993. 230p.

BIDDLESTONE, A.J.; GRAY, K.R. *Introduction to compost - principles*. In: Waste Not Want Not Conference, 1991. p. 1-19.

BOLLEN, G.J.; VOLKER, D.; WIJNEN, A.P. *Inactivation of soil borne plant pathogens during small-scale composting of crop residues*. *Netherlands Journal of Plant Pathology*, 95 (Supplement 1), 1989. p. 19-30 apud MUKHTAR, S.; KALBASI A.; AHMED A. *Carcass Disposal: A Comprehensive Review*. National Agricultural Biosecurity Center Consortium, USDA APHIS Cooperative Agreement Project, Carcass Disposal Working Group, Kansas State University. Kansas, 2004. Disponível em: <http://fss.k-state.edu/research/books/carcassdisp.html>. Acesso em: 11/09/2007.

BRASIL, MINISTÉRIO DA AGRICULTURA PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Instrução Normativa No. 8/2004. *Proíbe em todo território nacional a produção, comercialização e a utilização de produtos destinados à alimentação de ruminantes que contenham em sua alimentação proteínas e gordura de origem animal*. Brasília, 2004.

BRASIL, MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA 375/2006. *Define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgotos gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providencias*. Brasília, 2006.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. *Drying cereal grains*. The AVI Publishing Company, Inc. Westport, Connecticut, 1974. 265p.

BUSINESS SOCIAL RESPONSIBILITY (BSR). *Social Responsibility. Business and society*, vol. 28, set. 1999 apud MACHADO FILHO, C.A.; ZYLBERSZTAJN, D.. *Responsabilidade social corporativa e a criação de valor para as organizações*. Série de Working Papers nº03/024, Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, 2004.

CARR, L.; BROIDE, H.L.; JOHN, H.M.; MALCONE, G.W.; PALMER, D.H.; ZIMMERMANN, N. *Composting catastrophic event poultry mortalities*. Maryland: University of Maryland & Maryland Cooperative Extension, 1998. Retrieved April 21, 2003, from <http://www.agnr.umd.edu/MCE/Publications/Publication.cfm?ID=35> apud MUKHTAR, S.; KALBASI A.; AHMED A. *Carcass Disposal: A Comprehensive Review*. National Agricultural Biosecurity Center Consortium, USDA APHIS Cooperative Agreement Project, Carcass Disposal Working Group, Kansas State University. Kansas, 2004. Disponível em: <http://fss.k-state.edu/research/books/carcassdisp.html>. Acesso em: 11/09/2007.

CORRÊA, R.S.; FONSECA, Y.M.F.; CORRÊA, A.S. *Produção de biossólido agrícola por meio da compostagem e vermicompostagem de lodo de esgoto*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Vol. 11, n. 4. Campina Grande – PB. 2007. p.420-426.

COSTA, M.S.S.M.; COSTA, L.A.M.; SESTAK, M.; OLIBONE, D.; SESTAK, D.; KAUFMANN, A.V.; ROTTA, S.R. *Compostagem de resíduos da indústria de desfibração de algodão*. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, vol. 25, n.2, 2005. p.540-548.

COSTA, M.S.S.M.; COSTA, L.A.M.; PELÁ, C.J.S.; DECARLI, L.D.; MATTER, U.F. *Desempenho de quatro sistemas para compostagem de carcaça de aves*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Vol. 10, n. 3. Campina Grande – PB. 2006. p.692-698.

DAS, K.C.; MINKARA, M.Y.; MELEAR, N.D.; TOLLNER, E.W. *Effect of poultry litter amendment on hatchery waste composting*. J. Appl. Poult. Res., 11, 2002: p. 282-290 apud KUMAR, V.R.S., SIVAKUMAR, K.; PURUSHOTHAMAN, M.R.; NATARAJAN, A.; AMANULLAH, M.M. *Chemical changes during composting of dead birds with caged layer manure*. Journal of Applied Sciences Research, 3(10): 1100- 1104. INSInet Publication, 2007.

DEFILIPO, B.V.; RIBEIRO, A.C.. *Análise Química do Solo (Metodologia) – Boletim de Extensão*. 2ª. Edição. Viçosa. 1997. 26 p.

ELLIS, D. *Carcass disposal issues in recent disasters, accepted methods, and suggested plan to mitigate future events (applied research project for Master of Public Administration)*. San Marcos, Texas: Texas State University-San Marcos (formerly Southwest Texas State University), 2001 apud MUKHTAR, S.; KALBASI A.; AHMED A. *Carcass Disposal: A comprehensive review*. National Agricultural Biosecurity Center Consortium, USDA APHIS Cooperative Agreement Project, Carcass Disposal Working Group, Kansas State University. Kansas, 2004.

Disponível em: <http://fss.k-state.edu/research/books/carcassdisp.html>. Acesso em: 11/09/2007.

EMBRAPA/CNPS. *Manual de métodos de análise do solo*. Rio de Janeiro. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 2 ed., 1997. 212 p.

ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY (EPA). *Review of on-farm disposal treatment risks and the potential for recycling of wastes produced from commercial chicken farms and processors*. Australia, 1999. Disponível em: <http://www.epa.sa.gov.au/pdfs/chickenfarms.pdf> . Acesso em: 11/11/07

ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY (EPA). *Draft guidelines for composting works in south Australia*. Australia, 2007. Disponível em: http://www.epa.sa.gov.au/pdfs/composting_guidelines.pdf . Acesso em: 29/12/07

FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. *Compostagem de resíduos agroindustriais utilizando tecnologia de compostagem de baixo custo*. 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Foz de Iguaçu, 1997. p. 1596-1605. Disponível em: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/abes97/custo.pdf>. Acesso em: 11/11/07

FIALHO, L.L.; SILVA, W.T.L.; MILORI, D.M.B.P.; SIMÕES M.L.; MARTIN NETO, L. *Monitoramento químico e físico do processo de compostagem de diferentes resíduos orgânicos*. Circular técnica 29 - Embrapa. São Carlos, 2005. Disponível em: www.cnpdia.embrapa.br/publicacoes. Acesso em: 11/11/07

FINSTEIN, M.; MORRIS, M. *The microbiology of composting*. Advances in applied microbiology. 19, 1975. p.113-151 apud AZEVEDO, M.A. *Estudo e avaliação de quatro modos de aeração para sistemas de compostagem em leiras*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG. (Dissertação de Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, 1993. 230p.

FINSTEIN, M.S.; CIRELLO, J.; MAC GREGOR, S.T.; MILLER, F.C.; PSARIANOS, K.M. *Sludge composting and utilization: rational approach to process control*. Final Report to USEPA, NJDEP, CCMUA. Universidade de Rutgers, New Brunswick, 1980 apud AZEVEDO, M. A. *Estudo e avaliação de quatro modos de aeração para sistemas de compostagem em leiras*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG. (Dissertação de Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, 1993. 230p.

FINSTEIN, M.S., MILLER, F.C.; STROM, P.F. *Composting ecosystem management for waste treatment*. Bio-Tecnology, june, vol. 1(4), 1983. p. 347-353 apud AZEVEDO, M.A. *Estudo e avaliação de quatro modos de aeração para sistemas de compostagem em leiras*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG. (Dissertação de Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, 1993. 230p.

FLYNN, R.P.; WOOD, C.W. *Temperature and Chemical Changes During Composting of Broiler Litter*. Compost Science & Utilization (1996), vol. 4, No. 3, p. 62-70.

GOLUEKE, C.; BRADLEY, J.; McGAUHEY, P. *A critical evaluation of inoculums in composting*. Applied Microbiology, 2: 45-52, 1954 apud AZEVEDO, M.A. *Estudo e avaliação de quatro modos de aeração para sistemas de compostagem em leiras*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG. (Dissertação de Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, 1993. 230p.

GOLUEKE, C.G. *Composting – a study of the processes and its principles*. Emmaus: Rodale Press Inc Book Division. 1975. 235p apud CORRÊA, R.S.; FONSECA, Y.M.F.; CORRÊA, A.S. *Produção de biossólido agrícola por meio da compostagem e vermicompostagem de lodo de esgoto*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Vol. 11, n. 4. Campina Grande – PB. 2007. p.420-426.

GOLUEKE, C.G. *Biological processing: composting and hydrolisis*. Handbook of solid waste management. New York, Van Nostrand Reinholds Company, 1977. p. 197-225.

GOLUEKE, C.G. *Composting combined refuse and sewage sludge*. Compost Sci. land utiliz., USA, 1980. p. 197-225.

GOLUEKE, C.G.; DIAZ, L.F. *Understanding the basics of composting*. Biocycle, p. 56-59, abr. 1990 apud PEREIRA NETO, J.T. *On the treatment of Municipal refuse and sewage sludge using aerated static pile composting - A low cost technology approach*. Leeds, University of Leeds, 1987a. 272p. (Tese de Doutorado)

GOTTAS, H.B. *Composting*. who monografia n. 31, Genebra, 1956, 205p apud STENTIFORD, E.I.; PEREIRA NETO, J.T.; TAYLOR, P.L.; MARA, D.D. *Sanitization Potencial of Composting for Sewage Sludge and Refuse in a Static Pile System*. In: Advances in Water Engineering. T. H. Tebbutt Elsevier Applied Science Publishers, 1985. p. 269-277.

GRAVES, R.E.; HATTEMER, G.M.; STETTLER, D.; KRIDER, J.N.; CHAPMAN, D. *Composting*. In: UNITED STATES DEPARTAMENT OF AGRICULTURE, NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE. *Part 637 Environmental Engineering - National Engineering Handbook*. Washington, 2000. 88p. Disponível em: <http://www.info.usda.gov/CED/>. Acesso em: 11/11/07.

GRAY, K.; SHERMAN, K.; BIDDLESTONE, A. *A review of composting - part one*. Process biochemistry, 6 (6): 32-36, 1971 a apud AZEVEDO, M.A. *Estudo e avaliação de quatro modos de aeração para sistemas de compostagem em leiras*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG. (Dissertação de Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, 1993. 230p.

HALL, C. W. P. E. *Drying and Storage of Agricultural Crops*. The AVI Publishing Company, Inc. Westport, Connecticut, 1980. 381p.

HANSEN, R. C.; KEENER, H. M.; WARREN A.; DICK, MARUGG, C.; HOITINK, H.A.. *Poultry manure composting ammonia capture and aeration control*. American Society of Agricultural Engineers Paper 904062, St. Joseph, MI, 1990 apud GRAVES, R.E.; HATTEMER, G.M.; STETTLER, D.; KRIDER, J.N.; CHAPMAN, D. *Composting*. In: UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE. *Part 637 Environmental Engineering - National Engineering Handbook*. Washington, 2000. 88p. Disponível em: <http://www.info.usda.gov/CED/>. Acesso em: 11/11/07.

HARADA, Y.; YNOKO, A. *Relationship between cation-exchange capacity and the degree of maturity of city refuse composts*. Soil Sci. Plant Nutr. 26, 1980. p.353-362.

HARPER, A.F.; ESTIENNE, M.J.; COLLINS, E.R. *Composting as an environmentally safe means of dead pig disposal on Virginia swine farms*. Suffolk, Virginia: Virginia Tech Tidewater Agricultural Research & Extension Center, 2001. Retrieved June 16, 2003, from http://vmirl.vmi.edu/ev/Paper%20Sessions/Early%20Bird/Absracts/Harper_Abstract.htm apud MUKHTAR, S.; KALBASI A.; AHMED A. *carcass disposal: A comprehensive review*. National Agricultural Biosecurity Center Consortium, USDA APHIS Cooperative Agreement Project, Carcass disposal working group, Kansas State University. Kansas, 2004. Disponível em: <http://fss.k-state.edu/research/books/carcassdisp.html>. Acesso em: 11/09/2007.

HAUG, R.T. *Composting process design criteria*. BioCycle 27, 1986: p. 53-57 apud MUKHTAR, S.; KALBASI A.; AHMED A. *Carcass Disposal: A comprehensive review*. National Agricultural Biosecurity Center Consortium, USDA APHIS Cooperative Agreement Project, Carcass disposal working group, Kansas State University. Kansas, 2004. Disponível em: <http://fss.k-state.edu/research/books/carcassdisp.html>. Acesso em: 11/09/2007.

HAUG, R.T. *The practical handbook of compost engineering*. Boca Raton, Florida: Lewis Publishers, Press, Inc., 1993 apud MUKHTAR, S.; KALBASI A.; AHMED A. *carcass disposal: A comprehensive review*. National Agricultural Biosecurity Center Consortium, USDA APHIS Cooperative Agreement Project, Carcass disposal working group, Kansas State University. Kansas, 2004. Disponível em: <http://fss.k-state.edu/research/books/carcassdisp.html>. Acesso em: 11/09/2007.

HENRY, P. E. S. T. (2003). *CAMM Poultry. Capítulo 8, Dead animal disposal*. Disponível em: http://www.clemson.edu/camm/Camm_p/Contents.htm. Acesso em: 10/11/07

INSTITUTO ETHOS DE RESPONSABILIDADE SOCIAL. *Indicadores Ethos de responsabilidade social e empresarial: versão 2002*. São Paulo, 2002. Disponível em: www.ethos.org.br. Acesso em: 10 set. 2002 apud VERDOLIN, D.R.; ALVES,

A.F. *Responsabilidade social: Perspectivas para o agronegócio*. Organ. Rurais agroind., Lavras, vol. 7, n. 1, 2005. p. 103-113.

INSTITUTO ETHOS DE RESPONSABILIDADE SOCIAL. *O que é responsabilidade social?* São Paulo, 2004. Disponível em: www.ethos.org.br/docs/institucional/perguntas.shtml. Acesso em: 13 mar. 2004 apud VERDOLIN, D.R.; ALVES, A.F. *Responsabilidade social: Perspectivas para o agronegócio*. Organ. Rurais agroind., Lavras, vol. 7, n. 1, 2005. p. 103-113.

KANE, B.; MULLINS, J. *Thermophilic fungi in a municipal waste compost system*. Mycologia 65: 1087-1100, 1973 apud AZEVEDO, M.A. *Estudo e avaliação de quatro modos de aeração para sistemas de compostagem em leiras*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG. (Dissertação de Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, 1993. 230p.

KASHMANIAN, R.M.; RYNK, R.F. *Agricultural composting in the United States: Trend and driving forces*. Journal of Soil and Water Conservation, 51 (3), 1996. p. 194-201 apud MUKHTAR, S.; KALBASI A.; AHMED A. *carcass disposal: A comprehensive review*. National Agricultural Biosecurity Center Consortium, USDA APHIS Cooperative Agreement Project, Carcass disposal working group, Kansas State University. Kansas, 2004. Disponível em: <http://fss.k-state.edu/research/books/carcassdisp.html>. Acesso em: 11/09/2007.

KEENER, H.M.; ELWELL, D.L.; MONNIN, M.J. *Procedures and equations for sizing of structures and windrows for composting animal mortalities*. Applied Engineering in Agriculture, 16 (6), 2000. p. 68-692 apud MUKHTAR, S.; KALBASI A.; AHMED A. *carcass disposal: A comprehensive review*. National Agricultural Biosecurity Center Consortium, USDA APHIS Cooperative Agreement Project, Carcass disposal working group, Kansas State University. Kansas, 2004. Disponível em: <http://fss.k-state.edu/research/books/carcassdisp.html>. Acesso em: 11/09/2007.

KENNER, H.M.; EWELL, D. L. *Composting livestock mortalities, road kill, and meat processor by-products in Ohio*. NIAA Conference Paper. April, 9. Cincinnati, Ohio, 2003. Disponível em: <http://www.animalagriculture.org/Proceedings/2003%20Proc/keener.pdf>. Acesso em: 11/11/07

KIEHL, E.J. *Fertilizantes orgânicos*. São Paulo, Editora Agronômica Ceres, 1985, 492p.

KIEHL, E.J., *Manual de compostagem: maturação e qualidade do composto*. Piracicaba: E.J. Kiehl, 1998. 171p., apud MATOS, A.T. ; *Prática de tratamento e aproveitamento agrícola de resíduos sólidos*. Associação de Engenheiros Agrícolas de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Agrícola da UFV. (Série Caderno Didático nº 45), Viçosa, 2006. 43p.

KUBE, J. *Carcass disposal by composting*. Paper presented at the 35th Annual Convention of the American Association of Bovine Practitioners, Madison, Wisconsin. American Association of Bovine Practitioners 2002 Proceedings. p. 30-37 apud MUKHTAR, S.; KALBASI A.; AHMED A. *carcass disposal: A comprehensive review*. National Agricultural Biosecurity Center Consortium, USDA APHIS Cooperative Agreement Project, carcass disposal working group, Kansas State University. Kansas, 2004. Disponível em: <http://fss.k-state.edu/research/books/carcassdisp.html>. Acesso em: 11/09/2007.

KUMAR, V.R.S., SIVAKUMAR, K., PURUSHOTHAMAN, M.R., NATARAJAN, A.; AMANULLAH, M.M. *Chemical changes during composting of dead birds with caged layer manure*. Journal of Applied Sciences Research, 3(10): 1100- 1104. INSInet Publication, 2007.

KUTER, G., HOITINK, H.; ROSSMAN, L. *Effects of aeration and temperature on composting of municipal sludge in a full scale vessel system*. Journal of Water Pollution Control Federation, 57, 1985: p. 309-315 apud AZEVEDO, M.A. *Estudo e avaliação de quatro modos de aeração para sistemas de compostagem em leiras*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG. (Dissertação de Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, 1993. 230p.

LANGSTON, J.; CARMAN, D.; VAN DEVENDER, K.; BOLES, J.C., Jr. *Disposal of swine carcasses in Arkansas* (MP397-5M-9-97N). Little Rock, Arkansas: Cooperative Extension Service, University of Arkansas, 2002. Retrieved April 11, 2003, from http://www.uaex.edu/Other_Areas/publications/HTML/MP397/composting_swine_carcasses.asp#Recipe apud MUKHTAR, S.; KALBASI A.; AHMED A. *carcass disposal: A comprehensive review*. National Agricultural Biosecurity Center Consortium, USDA APHIS Cooperative Agreement Project, Carcass disposal working group, Kansas State University. Kansas, 2004. Disponível em: <http://fss.k-state.edu/research/books/carcassdisp.html>. Acesso em: 11/09/2007.

LOOPER, M. *Whole animal composting of dairy cattle*. East Syracuse, New York: Dairy Business Communications, 2002. Retrieved May 2, 2003, from <http://www.dairybusiness.com/western/Nov01/Nov01vWDBcompost.htm> apud MUKHTAR, S.; KALBASI A.; AHMED A. *carcass disposal: A comprehensive review*. National Agricultural Biosecurity Center Consortium, USDA APHIS Cooperative Agreement Project, Carcass disposal working group, Kansas State University. Kansas, 2004. Disponível em: <http://fss.k-state.edu/research/books/carcassdisp.html>. Acesso em: 11/09/2007.

MATOS, A.T.; VIDIGAL, S.M.; SEDIYAMA, M.A.N.; GARCIA, N.C.P.; RIBEIRO, M.F. *Compostagem de alguns resíduos orgânicos utilizando-se águas residuárias da suinocultura como fonte de nitrogênio*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.2, n.2, p. 199-203, 1998.

MATOS, A. T. *Qualidade do meio físico Ambiental*. Associação de Engenheiros Agrícolas de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Agrícola da UFV. (Série Caderno Didático nº 33), Viçosa, 2004. 167p.

MATOS, A. T. *Tratamento e aproveitamento agrícola de resíduos sólidos*. Associação de Engenheiros Agrícolas de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Agrícola da UFV. (Série Caderno Didático nº 37), Viçosa, 2006a. 119p.

MATOS, A. T. *Prática de tratamento e aproveitamento agrícola de resíduos sólidos*. Associação de Engenheiros Agrícolas de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Agrícola da UFV. (Série Caderno Didático nº 45), Viçosa, 2006b. 43p.

MACHADO FILHO, C.A.; ZYLBERSZTAJN, D. *Responsabilidade social corporativa e a criação de valor para as organizações*. Série de Working Papers nº03/024, Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, 2004.

MAC GREGOR, S.T.; MILLER, F.C.; PSARIANOS, K.M.; FINSTEIN, M.S. *Composting process control based on interation between microbial heat ouput and temperature*. Applied and environmental microbiology, 41, 1981. p. 1321-1330 apud AZEVEDO, M.A. *Estudo e avaliação de quatro modos de aeração para sistemas de compostagem em leiras*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG. (Dissertação de Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, 1993. 230p.

MARA, D.D.; STENTIFORD, E.I. *Refuse/sludge composting by aerated static pile system*. University of Leeds, Civil Eng. Department, UK, ago. 1983. p.35p apud AZEVEDO, M.A. *Estudo e avaliação de quatro modos de aeração para sistemas de compostagem em leiras*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG. (Dissertação de Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, 1993. 230p.

MERCEDES, S.S.; PEREIRA NETO, J.T., CEBALLOS, B.S. *O efeito da temperatura na eliminação de Salmonella durante a compostagem de lixo urbano em leiras aeradas*. Anais da 43ª Reunião Anual da SBPC. Rio de Janeiro - RJ, 1991.

MERCEDES, S.S.; PEREIRA NETO, J.T. *O efeito da temperatura na eliminação de patógenos durante a fase ativa da compostagem de lixo urbano*. Anais do 17º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES. Natal – RN, Setembro, 1993.

METCALF & EDDY. *Wastewater engineering – Treatment and reuse*. New York: Mc Graw Hill, 1991. 1334 p.

MILLER, F.C. *Minimizing odor generation*. In HOITINK, H.A.J.; KEENER, H.M. (Eds.), *Science and engineering of composting: design, environmental, microbiological and utilization aspects*. p. 219-241. Worthington, OH: Renaissance

Publications, 1993 apud MUKHTAR, S.; KALBASI A.; AHMED A. *carcass disposal: A comprehensive review*. National Agricultural Biosecurity Center Consortium, USDA APHIS Cooperative Agreement Project, Carcass disposal working group, Kansas State University. Kansas, 2004. Disponível em: <http://fss.k-state.edu/research/books/carcassdisp.html>. Acesso em: 11/09/2007.

MORRIS, J.R.; O'CONNOR, T.; KAINS, F.; FRASER, H. *Composting livestock mortalities* (Fact Sheet agdex# 725/400). Ontario, Canada: Ontario Ministry of Agriculture and Food, 1997. Retrieved May 6, 2003, from <http://www.gov.on.ca/omafra/english/livestock/swine/facts/97-001.htm> apud MUKHTAR, S.; KALBASI A.; AHMED A. *carcass disposal: A comprehensive review*. National Agricultural Biosecurity Center Consortium, USDA APHIS Cooperative Agreement Project, Carcass disposal working group, Kansas State University. Kansas, 2004. Disponível em: <http://fss.k-state.edu/research/books/carcassdisp.html>. Acesso em: 11/09/2007.

MURPHY, D.W.; HANDWERKER, T.S. *Preliminary investigations of composting as a method of dead bird disposal*. Proceedings of the 1988 National Poultry Waste Management Symposium, 1988. p. 65-72 apud MUKHTAR, S.; KALBASI A.; AHMED A. *Carcass disposal: A comprehensive review*. National Agricultural Biosecurity Center Consortium, USDA APHIS Cooperative Agreement Project, Carcass disposal working group, Kansas State University. Kansas, 2004. Disponível em: <http://fss.k-state.edu/research/books/carcassdisp.html>. Acesso em: 11/09/2007.

MUKHTAR, S.; AUVERMANN, B.W.; HEFLIN, K.; BORIACK, C.N. *A low maintenance approach to large carcass composting*. Assemblia Internacional Annual da ASAE. Las Vegas, Nevada, 2003. (Artigo número: 032263). Disponível em: <http://tammi.tamu.edu/carcasscompostasae032263b.pdf> . Acesso em: 11/11/07

MUKHTAR, S.; KALBASI A.; AHMED A. *carcass disposal: A comprehensive review*. National Agricultural Biosecurity Center Consortium, USDA APHIS Cooperative Agreement Project, Carcass disposal working group, Kansas State University. Kansas, 2004. Disponível em: <http://fss.k-state.edu/research/books/carcassdisp.html>. Acesso em: 11/09/2007.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. *Biosolids applied to land: advancing standards and practices*. National Academy Press Washington, DC, July 2002. Disponível em: <http://www.epa.gov/waterscience/biosolids/nas/complete.pdf>. Acesso em: 11/09/2007.

PEDROSO-DE-PAIVA, D. *Guia para operar uma compostagem de aves mortas – tradução*: Fonte: Circular ANR-580, Alabama Cooperative Extension Service, Auburn University, Alabama – USA, EMBRAPA, 2004. Disponível em: www.cnpqa.embrapa.br/sgc/sgc_publicacoes/publicacao_c939h2q.pdf. Acesso em: 01/08/2007.

PEREIRA NETO, J.T.; MARA, D.D.; STENTIFORD, E.I. *Compostagem do lixo urbano e lamas de esgotos domésticos: uma análise para aplicação em áreas carentes ou industrializadas*. In: *Encontro Nacional de Saneamento Básico*, Lisboa, 1986a. APESB.

PEREIRA NETO, J.T.; STENTIFORD, E.I.; MARA, D.D. *Sistemas de compostagem por pilhas estáticas arejadas - uma alternativa de baixo custo ao tratamento e reciclagem do lixo urbano e lamas de esgotos domésticos*. Informação APESB, (29), Lisboa, Portugal, 1986b. p. 3-19.

PEREIRA NETO, J.T. *On the treatment of Municipal refuse and sewage sludge using aerated static pile composting - A low cost technology approach*. Leeds, University of Leeds, 1987a. 272p. (Tese de Doutorado)

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, 1987b, p. 146-163.

PEREIRA NETO, J.T. *Monitoramento da eliminação de organismos patogênicos durante a compostagem do lixo urbano e lodo de esgoto pelo sistema de pilhas estáticas aeradas*. *Engenharia Sanitária*, Rio de Janeiro 27 (2): 148-152, abr./jun. 1988.

PEREIRA NETO, J.T.; CALMETO, J.C.; AZEVEDO, M.A. *Uma nova concepção de compostagem por reviramento*. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, No.15, Belém, 1989. Anais... Belém, ABES, 1989. v. 2, tema 3, p.453-556.

PEREIRA NETO, J.T. *Conceitos modernos de compostagem*. *Engenharia Sanitária*, Rio de Janeiro, 28 (2): 104-109, abr./jun. 1989.

PEREIRA NETO, J.T.; AZEVEDO, M.A. *A co-compostagem do lixo urbano e lodo de esgotos em leiras sob aeração forçada - considerações gerais*. In: *Reunião Anual da SBPC*, 42, Porto Alegre, 1990. p. 57-60.

PEREIRA NETO, J.T.; STENTIFORD, E.I. *Aspectos epidemiológicos na compostagem*. *Bio*, (4): 1-5, out./dez. 1992.

PEREIRA NETO, J.T.; LELIS, M.P.N. *A contaminação biológica na compostagem*. XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental – 16 a 21 de setembro de 2001. João Pessoa – PB, 2001.

PEREIRA NETO, J.T. *A compostagem como processo de reciclagem de resíduos orgânicos*. II Semana Agro-Ambiental – 13 a 17 de outubro de 2003. Fundação Universidade Federal do Mato Grosso, Instituto de Ciências Naturais e Tecnologia.

PEREIRA NETO J.T. *Compostagem: fundamentos e métodos*. 1º Simpósio sobre compostagem: Ciência e Tecnologia – Universidade Estadual Paulista, 18 a 19 de Agosto de 2004 – FCA - GEMFER.

PEREIRA NETO, J.T. *Manual de compostagem, processo de baixo custo* – ed. Revisada e aumentada. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2007. 81 p.

PINTO, M.T. *Higienização de lodos*. In: ANDREOLI et al. (eds). *Lodo de esgotos: tratamento e disposição final*. Belo Horizonte: DESA-UFMG/SANEPAR. 2001 p.261-317.

QUEVEDO, A. 2007: *o ano para corrigir as falhas*. Anuário 2007 da Avicultura Industrial, N° 11 – Ano 98, Ed. 1151, 2006.

RITZ, C. W; WORLEY, J.W. *Poultry mortality composting management guide*. 2005). Cooperative Extension Service/The University of Georgia College of Agricultural and Environmental Sciences. Bulletin 1266. April, 2005.

RYNK, R. *On-farm composting handbook*. Ithaca, New York: Northeast Regional Agricultural Engineering Service, 1992 apud MUKHTAR, S.; KALBASI A.; AHMED A. *carcass disposal: A comprehensive review*. National Agricultural Biosecurity Center Consortium, USDA APHIS Cooperative Agreement Project, Carcass disposal working group, Kansas State University. Kansas, 2004. Disponível em: <http://fss.k-state.edu/research/books/carcassdisp.html>. Acesso em: 11/09/2007.

RODELLA, A.A.; ALCARDE, J.C. *Avaliação de materiais orgânicos empregados como fertilizantes*. Sci. Agrícola, Piracicaba, 51(3):556-562, set./nov. 1994.

SAFLEY, L.M.; DUPOLDT, C.; GETER, F.; STETTLER, D.; MURPHY, T. *Agricultural waste, management system, component design*. In: UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE. *Part. 651 - Environmental Engineering National Engineering Handbook*. Washington, 1996. 176p. Disponível em: http://www.vt.nrcs.usda.gov/technical/Engineering/AWMFH_VT.html . Acesso em: 11/11/07.

SAVAGE, G. CHASE, J.; MAC MILLAN, J. *Population changes in enteric bacteria and other microorganismos during aerobic thermophilic windrow composting*. Applied microbiology, 26, 1973. p. 969-974 apud AZEVEDO, M.A. *Estudo e avaliação de quatro modos de aeração para sistemas de compostagem em leiras*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG. (Dissertação de Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, 1993. 230p.

SCHULZE, K.L. *Aerobic decomposition of organic waste materials*. (Continuous thermophilic composting). *Applied microbiology*, 11, 1961. p.22-36 apud AZEVEDO, M.A. *Estudo e avaliação de quatro modos de aeração para sistemas de compostagem em leiras*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG. (Dissertação de Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, 1993. 230p.

SILVA, M.S.; COSTA, L.A.M.; DECARLI, D.L.; PELÁ, A.; ZUCARELI, C.; SILVA, C. J.; MATTER, U.F.; SANTOS, J.S. *Desenvolvimento de metodologia para compostagem de resíduos sólidos de frigorífico*. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola*, 27, 1998, Poços de Caldas. Anais. Jaboticabal: SBEA, 1998, vol. 1. p. 52-54 apud COSTA, M.S.S.M.; COSTA, L.A.M.; SESTAK, M.; OLIBONE, D.; SESTAK, D.; KAUFMANN, A.V.; ROTTA, S.R. *Desempenho de quatro sistemas para compostagem de carcaça de aves*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Vol. 10, n. 3. Campina Grande – PB. 2006. p.692-698.

SILVA, N.C.; MATOS, A.T.; SARTORI, M.A.; MOREIRA, D.A.; BARROS, R.T.P.; LUIZ, F.A.R. *Variação na pressão estática de ar insuflado em diferentes vazões específicas em colunas de material orgânico com diferentes estádios de degradação bioquímica*. *Acta Sci. Agron*. Vol. 30, n. 2. Maringá, 2008. p. 165-170.

SINGLEY, M.E.; HIGGINS, A.J.; FRUNKIN-ROSENGAUS, M. *Sludge composting and utilization: A design and operating manual*. The State Universty of New Jersey – RUTGERS. New Jersey, 1982 apud AZEVEDO, M.A. *Estudo e avaliação de quatro modos de aeração para sistemas de compostagem em leiras*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG. (Dissertação de Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, 1993. 230p.

STENTIFORD, E.I.; PEREIRA NETO, J.T.; TAYLOR, P.L.; MARA, D. D. *Sanitization potencial of composting for sewage sludge and refuse in a static pile system*. In: *Advances in water engineering*. T. H. Tebbutt Elsevier Applied Science Publishers, 1985. p. 269-277.

STENTIFORD, E.I. *Recent developments in composting*. In: *Internacional Symposium on Compost - Production, quality and use*, Udine, 1986 apud AZEVEDO, M.A. *Estudo e avaliação de quatro modos de aeração para sistemas de compostagem em leiras*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG. (Dissertação de Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, 1993. 230p.

STENTIFORD, E.I. *Composting of sewage sludges and solid wastes*. Leeds. University of Leeds, 1991. 60p.

STENTIFORD, E.I. *The Composting process applied to sewage sludges and source separated refuse*. In: *Composting and compost quality assurance criteria*. Páginas 69 a 80. Commission of The European Communités. Luxembourg, 1992. 423p.

STENTIFORD, E.I.; PEREIRA NETO; MARA, D. D. *Diversity of composting system*. In: *Low cost composting - Research Monographs in Tropical Public Health Engineering*. University of Leeds, Edited by D. D. Mara. March, 1996a.

STENTIFORD, E.I.; PEREIRA NETO, J.T.; MARA, D. D. *Composting of refuse and sewage sludge using the aerated static pile: Low cost composting - Research*

Monographs *in* Tropical Public Health Engineering. University of Leeds, Edited by D. D. Mara. March, 1996b.

SULLER, D.; FINSTEIN, M. *Effect of temperature, aeration and moisture on CO₂ formation in bench-scale, continuously thermophilic composting of soil waste.* Applied and environmental microbiology, 33, 1977. p. 345-350 apud AZEVEDO, M.A. *Estudo e avaliação de quatro modos de aeração para sistemas de compostagem em leiras.* Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG. (Dissertação de Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, 1993. 230p.

TORTORA, G.J.; FUNKE, B.R.; CASE, C.L. *Microbiologia.* 6. Ed. Porto Alegre: ARTMED, 2000. 830 p.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). *Disposal of domestic birds infected by avian influenza – An overview of considerations and options.* EPA530-R-06-009, 2006. Disponível em: http://www.deq.state.va.us/vpa/pdf/EPA_AI_Disposal_Guidance_Final.pdf. Acesso em: 11/09/07.

VALENZA PAIVA, N. S. *A Multifuncionalidade da agricultura e os desafios do programa brasileiro de produção e uso do biodiesel.* IX Congresso Mundial de Direito Agrário – União Mundial de Agraristas Universitários (UMAU). Marrakesch, 26-30 de novembro de 2007.

VERDOLIN, D.R.; ALVES, A.F. *Responsabilidade social: perspectivas para o agronegócio.* Organ. Rurais agroind., Lavras, vol. 7, n. 1, 2005. p. 103-113.

VITORINO, K.M.N. *Estudo da compostabilidade de resíduos de usinas de açúcar e de álcool.* (Dissertação de Mestrado). Campina Grande. Universidade Federal da Paraíba, 1991, 156p.

WAKSMAN, S.A. *The actinomycetes and their antibiotics in: Advances in applied bacteriologi.* Institute of Microbiology, Rutgers, The State University, New Brunswick. Vol.5, New Jersey, 1963. p.235-301.