



**UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA ACADÊMICA
COORDENAÇÃO GERAL DE PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO EM DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS AMBIENTAIS**

MARIA DAS GRAÇAS CABRAL DE ARAÚJO

**CONTROLE MICROBIOLÓGICO E ATIVIDADE
ENZIMÁTICA EM COMPOSTAGEM DE RESÍDUOS DE
PODA DE ÁRVORES E LODO DE ESGOTO**

**Recife
2011**

MARIA DAS GRAÇAS CABRAL DE ARAÚJO

**CONTROLE MICROBIOLÓGICO E ATIVIDADE
ENZIMÁTICA EM COMPOSTAGEM DE RESÍDUOS DE
PODA DE ÁRVORES E LODO DE ESGOTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós –
Graduação em Desenvolvimento em Processos
Ambientais da Universidade Católica de Pernambuco
como pré-requisito para obtenção do título de
**Mestre em Desenvolvimento de Processos
Ambientais.**

Área de Concentração: Desenvolvimento em Processos
Ambientais.

Linha de Pesquisa: Biotecnologia e Meio Ambiente.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Alexandra Amorim Salgueiro

Co-orientadora: Prof^a. Dr^a. Clarissa Daisy da Costa Albuquerque

**Recife
2011**

A663c

Araújo, Maria das Graças Cabral de

Controle microbiológico e atividade enzimática em compostagem de resíduos de poda de árvores e lodo de esgoto / Maria das Graças Cabral de Araújo ; orientador Alexandra Amorim Salgueiro ; co-orientador Clarissa Dayse da Costa Albuquerque, 2011.

xvi, 88 f. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica de Pernambuco. Pró-reitoria Acadêmica. Curso de Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais, 2011.

1. Resíduos sólidos. 2. Lodo de esgoto. 3. Enzimas. 4. Biodegradação. 5. Compostagem. 6. Microbiologia. 7. Húmus. I. Título.

CDU 574.6

CONTROLE MICROBIOLÓGICO E ATIVIDADE ENZIMÁTICA EM COMPOSTAGEM DE RESÍDUOS DE PODA DE ÁRVORES E LODO DE ESGOTO

Maria das Graças Cabral de Araújo

Examinadores:

Prof^a. Dr^a. Alexandra Amorim Salgueiro (Orientadora)
Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP

Prof^a. Dr^a. Arminda Saconi Messias (titular interno)
Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP

Prof^a. Dr^a. Maria Los Angeles Perez Fernandez Palha (titular externo)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Defendida em: 25 de março de 2011

Coordenadora: Prof^a. Dr^a. Alexandra Amorim Salgueiro

Dedico a Deus, pela presença constante em minha vida, auxiliando e amparando nessa longa caminhada. Aos meus queridos pais, João Cabral (*in memorium*) e Cosmea Leão, que partiram deixando-nos um testemunho inesquecível de amor e fé e pelo dom da vida. Ao meu irmão Jaime (*in memorium*) e aos irmãos e familiares, em especial à professora Alexandra Amorim Salgueiro, pela orientação, confiança e dedicação compartilhada durante todo o Mestrado.

“A mente que se abre a uma nova idéia jamais voltará ao seu tamanho original”

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado forças, iluminando meu caminho para que pudesse concluir mais uma etapa da minha vida.

Ao meus pais (*in memorium*), por ter sido minha estrutura familiar por muitos anos, que me ensinaram a lutar por idéias, através do exemplo de vida e de trabalho, corações bondosos que dedicaram toda sua vida à família, por todo o amor que ambos me dedicaram meu eterno agradecimento.

Aos meus irmãos, pelo carinho e atenção que sempre tiveram comigo, e em especial a minha irmã Josélita, que esteve ao meu lado, com quem dividi as minhas ansiedades e inquietações apoiando e me fazendo acreditar que nada é impossível, e que abriu mão de muitas coisas para me proporcionar a realização desse trabalho.

À professora orientadora Dr^a. Alexandra Salgueiro, pela sua tranquilidade, dedicação e domínio, um exemplo de profissionalismo e competência, e sobretudo pela pessoa humana e maravilhosa que não mediu em nenhum momento esforços para me auxiliar nessa produção científica, pela qual tenho profunda estima e admiração.

À minha co-orientadora Prof^a Dr^a Clarissa Daisy da Costa Albuquerque, pelo conhecimento transmitido.

À professora Dr^a Arminda Messias, pelos ensinamentos e conhecimentos transmitidos durante o Mestrado.

Ao professor Sérgio Paiva, pela sua atenção, tranquilidade e disponibilidade nos auxiliando nos trabalhos de laboratório, e compartilhando os seus conhecimentos científicos para o fazer dessa dissertação.

À estagiária Alexciana, pela dedicação e esforços em compartilhar comigo os trabalhos de laboratório. E às demais estagiárias, Rebeca e Nátaia, que auxiliaram na realização desse trabalho.

Ao Colega Francisco Canidé de Araújo, que se disponibilizou a colaborar com seu conhecimento para realização dos experimentos em campo, dando toda a sua atenção para que esse experimento fosse bem sucedido.

Ao Instituto Agrônomo de Pernambuco - IPA nas pessoas do diretor Presidente Dr. Júlio Zoé de Brito, diretor técnico Genil Gomes da Silva e gerente administrativo do Centro de Treinamento do IPA – CETREINO, Ulisses Arruda de Melo Cavalcanti Azedo, pela gentileza do bom acolhimento e por nos ter cedido uma área para realização dos experimentos em campo.

À Gerência da Regional Carpina na pessoa do gerente Claudemir Monteiro de Vasconcelos e dos supervisores Uzzai Cordeiro Silva e Francisco Canidé de Araújo, pela atenção, paciência, compreensão, incentivo e apoio nos momentos de incerteza, meu muito obrigado, pois, a contribuição de vocês foi valiosa na realização desse trabalho. Agradeço também a Sílvia pelo seu interesse e dedicação em colaborar nos experimentos de campo.

A Companhia Pernambucana de Saneamento – COMPESA, por nos ter fornecido o resíduo de lodo de esgoto utilizado na compostagem.

À Empresa Municipal de Limpeza Urbanização – EMLURB, por ter colaborado no fornecimento dos resíduos de poda para os experimentos de laboratório e campo.

À Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP, na pessoa do Magnífico Reitor Prof. Dr. Pe. Pedro Rubens de Oliveira pelo acesso e utilização das instalações dos laboratórios.

À toda equipe dos laboratórios de Química, pela atenção, acolhimento e colaboração nos experimentos.

À Maria de Fátima Gonçalves de Oliveira, pelo apoio técnico e orientações durante os experimentos; que não mediu esforço para colaborar.

Aos professores do curso de Mestrado Desenvolvimento de Processos Ambientais, pelo apoio e inspiração no amadurecimento dos meus conhecimentos e conceitos que me levaram à execução e conclusão dessa Dissertação.

Aos amigos que fiz durante o curso, pela verdadeira amizade que construímos; em particular, àqueles que estavam sempre ao meu lado, Amanda, Jaceline e Cláudia.

À Dr^a Eliane Noya, pela colaboração e incentivo.

Por fim, gostaria de agradecer a todos que contribuíram direta ou indiretamente para que esse trabalho fosse realizado, meu eterno AGRADECIMENTO.

Batalhei, insisti e finalmente consegui galgar mais um degrau em minha vida.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xiii
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvi
CAPÍTULO I	17
1.1 INTRODUÇÃO	17
1.2 OBJETIVOS	19
1.2.1 Objetivo Geral	19
1.2.2 Objetivos específicos	19
1.3 REVISÃO DE LITERATURA	20
1.3.1 Resíduos sólidos urbanos	20
1.3.2 Classificação dos resíduos sólidos.....	21
1.3.3 Política nacional de resíduos sólidos.....	22
1.3.4 Lodo de esgoto	23
1.3.4.1 Processo de tratamento de esgoto.....	23
1.3.4.2 Processos de tratamento de lodo de esgoto.....	24
1.3.4.3 Características físico-químicas de lodo de esgoto.....	25
1.3.4.4 Aplicação de lodo de esgoto	26
1.3.5 Resíduos de poda urbana.....	26
1.3.6 Compostagem.....	29
1.3.6.1 Fundamento básico	29
1.3.6.2 Compostagem de resíduos sólidos	30
1.3.6.3 Fases da compostagem.....	30
1.3.6.4 Biodegradação.....	31
1.3.6.5 Fatores que influenciam o processo de compostagem.....	35
1.3.6.6 Produto final de compostagem.....	38
1.4 REFERÊNCIAS	39
CAPÍTULO II	45
2.1 RESUMO	46
2.2 INTRODUÇÃO	47

2.3 MATERIAL E MÉTODOS	49
2.3.1. Resíduos orgânicos	49
2.3.2 Preparação das pilhas de compostagem.....	49
2.3.3 Amostragem e extração	51
2.3.4 Determinações físico-químicas.....	51
2.3.5 Determinações microbiológicas.....	52
2.3.6 Determinação de atividades enzimáticas.....	54
2.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
2.4.1 Caracterização dos resíduos sólidos	55
2.4.2 Compostagem de poda de árvores e lodo de esgoto em laboratório.....	56
2.4.3 Compostagem de poda de árvores, lodo de esgoto e esterco em campo	69
2.4.4 Caracterização do produto final.....	81
2.5 CONCLUSÕES	84
2.6 REFERÊNCIAS	85
CAPÍTULO III	88
3 CONCLUSÕES GERAIS	88

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1 Fases da compostagem.....	31
---	----

CAPÍTULO II

Figura 1 Pilhas de compostagem em experimento de laboratório.....	57
Figura 2 Compostagem de poda urbana e lodo de esgoto na proporção 1:1 no tratamento A em laboratório: (a) no início do experimento; (b) com 30 dias de compostagem e (c) com 60 dias.....	58
Figura 3 Valores médios de temperatura e umidade do ambiente durante a compostagem em laboratório.....	59
Figura 4 Temperatura média durante a compostagem no tratamento A de resíduos de poda de árvores e lodo de esgoto no topo, centro e base.....	60
Figura 5 Temperatura média durante a compostagem no tratamento B de resíduos de poda de árvores e lodo de esgoto no topo, centro e base.....	61
Figura 6 Temperatura média durante a compostagem no tratamento C de resíduos de poda de árvores e lodo de esgoto no topo, centro e base.....	62
Figura 7 Umidade média das pilhas de compostagem nos três tratamentos em laboratório.....	64
Figura 8 Valores médios de pH das pilhas de compostagem nos tratamentos em laboratório.....	65
Figura 09 Compostagem de poda de árvores e lodo de esgoto em campo.....	70
Figura 10 Valores médios de temperatura e umidade do ambiente durante a compostagem em campo.....	71
Figura 11 Temperatura média das pilhas de compostagem do tratamento I em campo.....	72
Figura 12 Temperatura média das pilhas de compostagem do tratamento II em campo.....	73

Figura 13 Temperatura média das pilhas de compostagem do tratamento III em campo.....	74
Figura 14 Temperatura média das pilhas de compostagem do tratamento IV em campo.....	74
Figura 15 Valores médios de pH das pilhas de compostagem em campo.....	75
Figura 16 Umidade média das pilhas de compostagem em campo.....	76
Figura 17 Atividades enzimáticas positivas em compostagem em laboratório: (a) celulase; (b) proteases; (c) fenoloxidase e (d) tanase.....	80

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

Tabela 1 Características físico-químicas de lodos de esgoto.....	25
Tabela 2 Caracterização de poda urbana.....	28

CAPÍTULO II

Tabela 1 Tratamentos de compostagem em campo.....	50
Tabela 2 Caracterizações físico-químicas e microbiológicas dos resíduos sólidos utilizados nas compostagens em laboratório e campo.....	56
Tabela 3 Quantidades dos componentes da compostagem em laboratório	57
Tabela 4 Composição microbiológica das compostagens de poda urbana e lodo de esgoto (tratamento A) em laboratório.....	67
Tabela 5 Composição microbiológica das compostagens de poda urbana e lodo de esgoto na presença de cal (tratamento B) em laboratório.....	67
Tabela 6 Composição microbiológica das compostagens de poda urbana e lodo de esgoto na presença de cal e inóculo (tratamento C) em laboratório.....	68
Tabela 7 Percentuais de atividades enzimáticas positivas durante a compostagem de poda urbana e lodo de esgoto em laboratório.....	69
Tabela 8 Quantidade em peso seco (kg) dos componentes da compostagem em campo.....	70
Tabela 9 Composição microbiológica das compostagens de poda de árvores, lodo de esgoto e esterco bovino na presença de cal realizadas em campo (tratamento I).....	77
Tabela 10 Composição microbiológica das compostagens de poda de árvores, lodo de esgoto e esterco bovino realizadas em campo (tratamento II).....	77
Tabela 11 Composição microbiológica das compostagens de poda de árvores, lodo de esgoto e esterco bovino na presença de cal realizadas em campo (tratamento III).....	78

Tabela 12 Composição microbiológica das compostagens de poda de árvores, lodo de esgoto e esterco bovino realizadas em campo (tratamento IV).....	78
Tabela 13 Caracterização dos húmus obtidos nas compostagens de poda de árvores e lodo de esgoto em laboratório (tratamentos A, B e C) e em campo (tratamentos I, II, III e IV).....	82

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi reaproveitar poda de árvores urbanas e lodo de esgoto para compostagem. Foi investigada a adição de cal hidratada e de inóculos em compostagem em laboratório e em campo (esterco bovino). O conteúdo microbiológico, atividades enzimáticas, temperatura, pH e concentrações de carbono e nitrogênio foram determinados. A contagem padrão de bactérias e os fungos (leveduras e fungos filamentosos) atingiram valores máximos na faixa de 10^{12} e de 10^8 UFC/mL, respectivamente. A calagem inibiu os coliformes totais e termotolerantes, além das *Salmonellas* e das quatro enzimas investigadas quando foram utilizados cal e lodo de esgoto na proporção 1:1. Na compostagem em campo, a massa não foi sanitizada, tendo sido utilizado 25 % p/p de cal em relação ao lodo de esgoto; a fase termófila ocorreu durante um pequeno período. As atividades das celulases, proteases, fenoloxidasas e tanases atingiram os maiores percentuais na fase ativa de degradação dos resíduos. A umidade da compostagem em campo variou entre 55 a 65 %. Durante as compostagens submetidas à calagem, o pH atingiu valores alcalinos enquanto nos demais tratamentos, esse parâmetro foi em torno da neutralidade. O húmus obtido apresentou a relação carbono:nitrogênio entre 9:1 e 16:1 com 60 dias de compostagem. A granulometria da poda urbana, o volume dos resíduos em tratamentos de laboratório e a presença da cal influenciaram a compostagem. Poda de árvores e lodo de esgoto podem ser reaproveitados por tratamento de compostagem para produção de húmus cujo produto final pode ser utilizado na recomposição de solo.

Palavras-chaves: resíduos sólidos, poda de árvores, lodo de esgoto, biodegradação, microbiologia, enzimas, húmus.

ABSTRACT

The objective of this work was to reuse the urban tree pruning and sewage sludge for composting. The addition of slaked lime and inocula to compost, both in laboratory and in the field, was investigated. The microbiological content, enzyme activities, temperature, pH and concentrations of carbon and nitrogen were determined. The standard counting of bacteria and fungi (yeasts and filamentous fungi) reached maximum values in the range of 10^{12} and 10^8 CFU/mL, respectively. Liming inhibited the total coliforms and fecal coliforms. In addition, *Salmonellas* and the four enzymes investigated were also inhibited when a 1:1 slaked lime to sewage sludge ratio was used. In the experiments in the field, the mass was not sanitized and was used slaked lime at 25 % w/w in relation to sewage sludge; the thermophilic phase occurred in a short period. The activities of cellulases, proteases, phenoloxidases and tannases reached the highest percentage in the active phase of waste degradation. The moisture in the composting field ranged from 55 to 65%. During the composting in the presence of slaked lime, pH reached alkaline values while in other treatments, pH was around neutrality. The final product showed a carbon: nitrogen ratio between 9 and 16 after 60 days of composting. The particle size of the urban pruning, the volume of waste in laboratory treatments and the presence of slaked lime influenced composting. The urban tree pruning and sewage sludge can be reused after the composting treatment for humus production, whose final product can be used in the recovery of soil.

Key-words: solid waste, tree pruning, sewage sludge, biodegradation, microbiology, enzymes, humus.

CAPÍTULO I

1.1 INTRODUÇÃO

A saturação do ambiente com resíduos oriundos de processos produtivos e de consumo superam a capacidade de assimilação dos ecossistemas e desencadeiam uma crise ecológica de deteriorização ambiental (LIMA, FIGUEIREDO, 2006). A disposição no ambiente de resíduos sólidos vem sendo responsável por impactos deletérios ao homem e aos ecossistemas, sendo um dos mais sérios problemas ambientais no meio urbano, por ser crescente, diversificado e constante (BARATTA-JÚNIOR, 2007).

A produção de resíduos vem crescendo de forma acentuada, sobretudo em países em desenvolvimento, pelo aumento do consumo e pela falta de políticas de saneamento básico e de processamento de resíduos. A disposição de resíduos sólidos tem sido responsável pela contaminação do solo e das águas superficiais e subterrâneas (RIBEIRO, MORIELLI, 2009).

Em 2007, de acordo com pesquisas realizadas pela Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), foram gerados cerca de 174,4 milhões de toneladas de resíduos sólidos no Brasil. Os resíduos urbanos atingiram o percentual de 35 %, totalizando 61,5 milhões de toneladas, dentre todos os outros resíduos provenientes da saúde, indústria, construção civil (RIBEIRO, MORIELLI, 2009). A quantidade de resíduos no Nordeste atingiu 13.343 t/dia, gerando uma média de 1.106 kg/habitantes/dia. Recife coletou 1.824 t/dia de resíduos sólidos urbanos (1,20 kg/hab/dia); 29,62 % desse resíduo foram coletados e descartados em lixões a céu aberto; 31,8 %, destinados a aterros controlados e 38,6 %, em aterros sanitários (ABRELPE, 2007).

A constante preocupação com os problemas de poluição do ambiente, associada à escassez de recursos naturais impõe alternativas para os resíduos sólidos. Uma proposta é a estabilização desses resíduos através de processos biológicos controlados, aeróbios, caracterizados pela ação de micro-organismos do solo, que realizam metabolismos complexos de natureza bioquímica, principalmente por reações de oxidação e de hidrólise em presença de oxigênio (BIDONE, 2001).

Considerando que a quantidade de resíduos sólidos aumenta com o crescimento da população e com o desenvolvimento tecnológico, urge o incentivo a investigações científicas sobre seu destino final mais adequado. Dentre os resíduos orgânicos gerados em grandes quantidades nas cidades mais populosas e que não têm sido gerenciados eficazmente e, por conseguinte, constituem um dos grandes problemas, ressalta-se o lodo de esgoto e a poda de árvores que neste trabalho, foram submetidos a tratamento de compostagem, visando diminuir impactos ambientais.

Essa dissertação está apresentada em três capítulos; o primeiro capítulo apresenta a introdução, os objetivos e a revisão de literatura pertinente com as respectivas referências; o capítulo seguinte apresenta um manuscrito a ser submetido a uma revista científica e o terceiro capítulo, as conclusões gerais.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Investigar o comportamento microbiológico e a atividade enzimática na compostagem de resíduos de poda urbana e lodo da estação de tratamento de esgoto.

1.2.2 Objetivos específicos

- Selecionar e triturar os resíduos orgânicos a compostar;
- realizar compostagem com resíduos de poda de árvores urbanas na presença de lodo da estação de tratamento de esgoto e de esterco bovino;
- determinar o conteúdo microbiológico durante a compostagem;
- determinar atividade enzimática hidrolítica durante a compostagem;
- investigar parâmetros físico-químicos durante a compostagem;
- caracterizar o produto final (húmus).

1.3 REVISÃO DE LITERATURA

1.3.1 Resíduos sólidos urbanos

A elevada demanda por produtos industrializados e agrícolas, somando ao desordenado crescimento populacional, tem levado a um dos principais problemas que a humanidade está enfrentando: o descarte dos resíduos de forma inadequada. A palavra resíduo de origem latina, “*residuum*”, significa ficar assentado no fundo de, segundo Buenos (1988, apud BIDONE, 2001); na conotação atual do termo, abrange restos, sobras, borras, sedimentos.

A população mundial está frente a um grande problema de disposição de resíduos, particularmente em áreas de crescimento urbano. O problema está relacionado ao simples fato que as áreas urbanas estão produzindo muitos resíduos e há pouco espaço para sua disposição. Os resíduos produzidos pela sociedade devido à industrialização e à urbanização têm crescido de forma exponencial e, conseqüentemente, resulta em problemas na área de gestão de resíduo. Durante o primeiro século da revolução industrial, o volume de produção de resíduo era relativamente pequeno e o conceito de “diluir e dispensar” foi adequado. Áreas industriais e urbanas se expandiram e esse conceito tornou-se insuficiente; um novo conceito conhecido como “concentrar e conter” tornou-se popular. A recuperação de recursos onde os resíduos podem ser convertidos em materiais úteis tem favorecido a utilização de tecnologia limpa e o desenvolvimento sustentável (KELLER, 2000).

Os diversos resíduos gerados nos centros urbanos, às vezes são acumulados no ambiente sem o adequado tratamento ou utilização que possibilite sua reciclagem. O tratamento de efluentes urbanos e industriais resulta um resíduo sólido denominado lodo de esgoto que necessita de um destino adequado. Esse resíduo pode ser aproveitado na agricultura em ambiente florestal. O uso como adubo orgânico é a alternativa mais promissora para esse resíduo. Entretanto, ao ser aplicado como fertilizante em solos agrícolas é necessário o conhecimento de sua composição (CAMPOS, 2006).

Segundo as Normas Brasileiras de Resíduos - NBR, especificamente a NBR nº 10.004 (1987), “resíduos sólidos são aqueles resíduos que se encontram nos

estados sólido e semi-sólido, e resultam de atividades de comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição, os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável seu lançamento na rede pública de esgoto ou corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível”.

Os problemas ambientais, sociais e econômicos gerados pela produção de resíduos na sociedade moderna não se caracterizam apenas pela inadequada disposição no meio ambiente, mas também, pela indisponibilidade de áreas para dispor estes resíduos que, nos grandes centros urbanos, atingem grandes volumes. Os países desenvolvidos encontram problemas para selecionar áreas que atendam suas necessidades; os países em desenvolvimento defrontam-se com carências tecnológicas, falta de critério e de controle na disposição final dos resíduos, segundo Ramos (2004, apud BRUNI, 2005).

Dentre as alternativas de destino final dos resíduos sólidos, destacam-se: aterros sanitários, incineração, reaproveitamento, reciclagem e compostagem. O aterro sanitário é a solução mais adotada, devido ao menor custo de investimento em relação à incineração. Têm-se buscado alternativas de reaproveitamento e reciclagem dos resíduos sólidos urbanos. A tríade: redução, reutilização e reciclagem representam a moderna visão na direção da diminuição da quantidade de resíduos sólidos gerados e de seu potencial poluidor (BIDONE, 2001).

1.3.2 Classificação dos resíduos sólidos

A lei nº 12.305 classificou os resíduos sólidos quanto à origem, exemplificando resíduos sólidos urbanos onde se enquadram as podas de árvores; resíduos de serviços públicos de saneamento básico que abrangem o lodo de estação de tratamento de esgoto, dentre outros; e quanto à periculosidade em resíduos perigosos e não perigosos (BRASIL, 2010). Enquanto os resíduos de poda urbana não apresentam nenhum efeito prejudicial à saúde ou ao meio ambiente, o lodo de esgoto apresenta características patogênicas.

1.3.3 Política nacional de resíduos sólidos

A disposição e destinação de resíduos e rejeitos foram aprovadas na Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010) que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos.

O Capítulo I, art.9º, dispõe que na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (BRASIL, 2010).

De acordo com o Capítulo II, Art. 3º, define-se:

XIV – Reciclagem: processo de transformação dos resíduos sólidos que envolvem a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vistas à transformação em insumos ou novos produtos, observadas as condições e os padrões estabelecidos pelos órgãos competentes do Sistema Nacional do Meio Ambiente (Sisnama) e, se couber, do Sistema Nacional de Vigilância Sanitária (SNVS), e do Sistema Unificado de Atenção à Sanidade Agropecuária (Suasa).

XV – Rejeitos: resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada.

XVI – Resíduos sólidos: material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólidos ou semissólidos, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública e esgoto ou em corpo d'água ou exijam para isso soluções técnicas ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.

VII - Destinação final ambientalmente adequada: destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a **compostagem**, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do Sisnama, do SNVS e do Suasa, entre elas, a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos.

VIII – Disposição final ambientalmente adequada: distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos.

1.3.4 Lodo de esgoto

O lodo de esgoto é um resíduo sólido de composição variável, rico em matéria orgânica, que é separado da fase líquida nos processos de tratamento de esgoto através da decantação ou da flotação em sistemas aerados (FERNANDES, SILVA, 1999).

O lodo gerado nas estações de tratamento de esgoto é um subproduto de disposição final onerosa e problemática. Com o crescimento da população, os sistemas de coleta e tratamento de esgoto aumentaram e, conseqüentemente, ocorreu maior produção de lodo de esgoto. Mais de 90 % do lodo produzido no mundo tem sua disposição final pelos processos de: incineração, disposição em aterros sanitários e uso agrícola. A produção de lodo no Brasil está estimada entre 150 mil e 220 mil toneladas de matéria seca por ano devido aos baixos índices de coletas e tratamento de esgoto, existentes no país. Em 2001, a população brasileira estimada em 116 milhões de habitantes, produziu 32 milhões de esgoto coletado, o qual se fosse integralmente tratado, acarretaria uma produção de 325 mil a 473 mil toneladas por ano de lodo (ANDREOLI, PINTO, 2001).

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, de todo o esgoto recolhido no Brasil, apenas 35 % é tratado (IBGE, 2000). De acordo com o censo demográfico, os locais onde os distritos despejam o esgoto que não é coletado são: rio, 83 %; lago ou lagoa; 5 %; mar, 1 %; outros, 11 %. O destino final dos resíduos produzidos nos sistemas de tratamento de água e esgotos é uma preocupação mundial (ANDREOLI, 2006).

O lodo de esgoto é obtido nas estações de tratamento a partir do resíduo líquido urbano que provém de áreas domiciliares e industriais; é formado por matéria orgânica e inorgânica, originadas por diferentes processos nas estações de tratamento (KIEHL, 1985).

1.3.4.1 Processo de tratamento de esgoto

O tratamento do esgoto processa-se através de fenômenos físicos, químicos e biológicos. É normalmente aplicado um método biológico para estabilizar os lodos gerados na estação de tratamento de esgoto. O tratamento pode abranger níveis tecnicamente diferentes, denominados de tratamento preliminar, primário,

secundário ou terciário. O tratamento preliminar tem a finalidade de remover por ação física o material grosseiro e as partículas maiores em suspensão, sendo o lodo denominado de digerido. O tratamento primário inclui além do tratamento preliminar, a remoção, por ação física, de partículas em suspensão no esgoto através da passagem da fase líquida, em baixa velocidade, em decantador. O tratamento secundário é um processo biológico de tratamento que depende de sua modalidade, podendo atuar sobre efluente primário, preliminar ou até sobre esgoto bruto livre de material grosseiro. O mecanismo do processo biológico para remoção do material orgânico é por metabolismo microbiano, sendo o lodo denominado de lodo ativado (FERNANDES, SILVA, 1999; KIEHL, 1985).

1.3.4.2 Processos de tratamento de lodo de esgoto

Os processos de tratamento de lodo de esgoto visam reduzir o teor de material orgânico biodegradável, a concentração de organismos patogênicos e o teor de água para obter um material sólido e estável, que não constitua perigo para a saúde e possa ser manipulado e transportado com facilidade e a baixo custo (FERNANDES, SILVA, 1999).

As alternativas para reduzir a água em lodo de esgoto são por desaguamento ou secagem natural. É importante reduzir o teor de água no lodo, pois a massa de água dificulta o manuseio, aumenta os custos de transporte e disposição final, além de favorecer o desenvolvimento de micro-organismos patógenos. Na prática, é possível reduzir a umidade a menos de 10 % (PEDROZA et al., 2006).

O desaguamento mecânico é utilizado em processos físicos como filtração ou centrifugação, tendo o produto final teor de sólidos na faixa de 15 a 35 %. Essa técnica tem a desvantagem de um custo operacional elevado. A remoção de água pode ocorrer pelo mecanismo de percolação que cessa quando o lodo atinge a umidade de 80 %; sendo um método simples, com custo de instalação e de operação baixo. A secagem natural utilizada em leito de secagem funciona como filtros granulares de bateladas de lodo, quando a água evapora por ação do calor do sol. Em climas tropicais quentes, essa técnica é muito utilizada. Os leitos de secagem foram as primeiras unidades técnicas a serem empregadas para produzir lodo seco (PEDROZA et al., 2006).

1.3.4.3 Características físico-químicas de lodo de esgoto

Segundo Fia et al. (2005), em função da origem e do processo de obtenção, o lodo de esgoto apresenta uma composição variável, sendo um material rico em matéria orgânica (40 a 60 %) e em alguns micronutrientes. Um lodo de esgoto típico apresenta 40 % de matéria orgânica, 4 % de nitrogênio, 2 % de fósforo e 0,4 % de potássio.

A tabela 1 ilustra a composição química de lodos provenientes de estações de tratamento de esgoto originados da Empresa de Saneamento do Estado de São Paulo (SABESP) e da Empresa de Saneamento do Estado do Paraná (SANEPAR). Os lodos de esgotos apresentam a relação C: N variando entre 5:1 e 6:1. Dentre os diversos elementos, ressalta-se a presença de potássio variando entre 0,63 e 1,5 g/kg e de fósforo cujo valor mínimo determinado foi 2,9 g/kg e o valor máximo, 10,6 g/kg. A presença desses elementos químicos, além do nitrogênio são fundamentais para as plantas e, conseqüentemente, devem estar presentes nos fertilizantes (PROSAB, 1996).

Tabela 1 Características físico-químicas de lodos de esgoto

Parâmetros	Lodo A	Lodo B	Lodo C
pH	-	-	7,0
Sólidos (g/kg)	-	-	13
Carbono (g/kg)	390	321	32
Nitrogênio (g/kg)	79,1	49,1	6
C/N	5:1	6:1	5:1
Potássio (g/kg)	0,63	1,5	-
Fósforo (g/kg)	10,6	3,7	2,9
Cálcio (g/kg)	22,1	15,9	-
Magnésio (g/kg)	2,1	6,0	-
Cobre (mg/kg)	98	439	-
Ferro (mg/kg)	42.224	-	-
Manganês (mg/kg)	212	-	-
Zinco (mg/kg)	1.868	824	-
Boro (mg/kg)	118	-	-
Molibdênio (mg/kg)	9,2	-	-

Fonte: Lodo A = SABESP, São Paulo; Lodo B = SANEPAR, Curitiba; Lodo C = ETE de lodo ativado (PROSAB, 1996)

1.3.4.4 Aplicação de lodo de esgoto

O lodo de esgoto e o lodo de estações de tratamento de água, após secagem e higienização submetida ao processo de compostagem na presença de outras matérias orgânicas, reduzem os custos com compras de fertilizantes químicos na formulação de substratos para produção de mudas. Essa estratégia de reaproveitamento dos resíduos do saneamento é econômica e benéfica para o desenvolvimento da planta (ANDREOLI et al., 2006).

No Brasil, o uso agrícola de lodo de esgoto, ainda não está amplamente difundido; entretanto, já faz parte de programas nacionais de controle de impactos ambientais citado por Pires (2005, apud BARBOZA, 2007).

O uso do lodo de esgoto como adubo orgânico na recuperação de solos degradados é considerada uma alternativa promissora de disposição final desse resíduo. Por ser rico em matéria orgânica e nutrientes para as plantas, é recomendada sua aplicação como condicionador e ou fertilizante dos solos. A aplicação do lodo de esgoto em solos agrícolas tem como principais benefícios a incorporação dos macronutrientes nitrogênio e fósforo e dos micronutrientes, zinco e cobre (CAMPOS, ALVES, 2008).

A escolha de alternativas de disposição final adequada de lodo de esgoto recai em fatores econômicos. É necessária uma análise ambiental criteriosa para uma alternativa técnica adequada e economicamente viável. A disposição final do lodo em aterros sanitários pode representar 50 % do custo operacional de uma ETE. A incineração tem custos elevados de implantação e de quantidade de energia. Na reciclagem agrícola, o lodo de esgoto vem sendo bastante utilizado, sendo o valor do produto final influenciado pelo transporte no custo final de destinação (Pires, 2006, apud ANDREOLI et al., 2006).

1.3.5 Resíduos de poda urbana

As árvores são essenciais ao equilíbrio do ambiente. Elas influenciam diretamente o clima da região, a quantidade de água e a qualidade do ar. A forma e o aspecto das árvores resultam principalmente da forma da copa, que por sua vez depende da distribuição das ramificações. A dinâmica do desenvolvimento urbano resulta na execução de podas que modifica o crescimento livre das árvores em

parques, ruas e jardins de pequenas áreas. Na poda, há eliminação seletiva de ramos com a finalidade de atingir objetivos previamente definidos. A poda em árvores urbanas é uma prática permanente que visa garantir um conjunto de árvores vitais, seguras e de aspectos visual agradável (FABIÃO, 2006).

O desmatamento ocasionado pela construção civil e pelo desenvolvimento industrial gera grande parte de resíduos de poda e de remoção de árvores na arborização pública. Devido à própria natureza do espaço urbano, as árvores sempre apresentarão necessidade de adequação ao meio ambiente. A arborização urbana por mais planejada e criteriosa que seja necessita da técnica de poda para que a vegetação possa ter seu ciclo de vida resistente às intempéries.

Os resíduos sólidos, resultantes da poda, geram um volume considerável de material vegetal que podem ser aproveitados das mais diversas formas: lenha, carvão, madeira para a fabricação de móveis rústicos, artesanatos, em caldeiras como fonte de energia térmica e outros, gerando benefícios ambientais e sociais. Os galhos mais finos inservíveis para lenha, carvão ou finalidade mais nobre que correspondem a 60 % do volume total como também as folhas poderão ser compostadas e utilizadas como adubo orgânico (BARATTA-JÚNIOR, 2007).

Os resíduos de poda de árvores são classificados quanto à origem, como resíduos de limpeza urbana (BRASIL, 2010); não são perigosos, não causam impactos nem riscos à saúde e ao meio ambiente. Segundo normais oficiais, esse resíduo está enquadrado na Classe II B – não perigoso, inerte (NBR, 2004). Mesmo assim, as disposições desses resíduos em locais abertos como lixões ou aterros sanitários podem provocar problemas, quando misturados com resíduos pré-existentes, que podem conter substâncias perigosas e materiais biológicos biodegradáveis, que interagem química e biologicamente, causando impactos sobre a qualidade do ar, do solo e da água.

A falta de locais adequados para disposição dos resíduos provenientes da poda de árvores e dos resíduos sólidos em geral, além de técnicas cada vez mais onerosas para o seu tratamento, são problemas enfrentados pela civilização contemporânea (CORTEZ, 2008).

A compostagem da poda urbana contribui na diminuição dos danos causados pela disposição desordenada dos mesmos, reduzindo a pressão sobre os recursos naturais, possibilitando a produção de composto, para uso em áreas agrícolas,

produção de mudas e paisagismo, bem como a minimização da quantidade de resíduos sólidos a ser disposto (BARATTA-JÚNIOR, 2007).

Pelo processo de expansão demográfica, grandes quantidades de árvores são eliminadas, além do processo de poda, quando galhos e folhas são cortados, técnica necessária para a vida das plantas. Em Recife, mais de três mil toneladas de resíduos de podas são despejados nos aterros todos os meses. Desse total, apenas cerca de 13 % são aproveitados na venda de lenha e o restante é queimado ou aterrado (EMLURB, 2004).

Na tabela 2 são apresentados os resultados de determinações químicas de poda urbana. Observa-se a presença de carbono orgânico igual a 22,9 % e nitrogênio, 1,53 %, resultando numa relação C;N de 15:1. Considerando o valor dessa relação e a presença de fósforo e potássio, além de diversos outros elementos químicos, esse resíduo pode ser reaproveitado em compostagem.

Tabela 2 Caracterização de poda urbana

Parâmetros	Valor
pH	8,07
Carbono orgânico (%)	22,9
Nitrogênio (%)	1,53
Relação C/N	15/1
Fósforo (mg/dm ³)	373
Potássio (mol/dm ³)	23,9
Cálcio (mol/dm ³)	35,1
Magnésio (mol/dm ³)	16
Sódio (mol/dm ³)	3,9
Ferro total (mg/kg)	3.718,75
Crômio total (mg/kg)	25
Chumbo (mg/kg)	< 0,05
Zinco (mg/kg)	75
Cádmio (mg/kg)	0
Cobre (mg/kg)	25
Níquel (mg/kg)	50

Fonte: Baratta-Júnior (2007)

1.3.6 Compostagem

A compostagem é um método ambientalmente correto e seguro para reciclagem e reutilização de resíduos sólidos orgânicos. De acordo com a Lei nº 14.236 (PERNAMBUCO, 2010), nos tratamentos de resíduos por compostagem, as características físicas, físico-químicas, químicas e ou biológicas são alteradas em processos e procedimentos, visando obter um material estável num menor espaço de tempo.

1.3.6.1 Fundamento básico da compostagem

A compostagem é praticada desde a antiguidade, porém, de forma empírica, até recentemente. O processo passou a ser pesquisado cientificamente e realizado de forma racional, onde resíduos orgânicos são retornados ao solo, contribuindo para sua fertilidade. Essa técnica está sendo bastante difundida.

A compostagem é definida como um processo biológico aeróbio e controlado, onde há transformação de resíduos orgânicos em resíduos estabilizados, com propriedades e características diferentes do material que lhe deu origem (BIDONE, 2001). Segundo Kiehl (1985), a compostagem é um processo biológico de transformação da matéria orgânica crua em substâncias estabilizadas (húmus), com propriedades diferentes do material de origem. Pereira-Neto (2010) define compostagem como um processo biológico aeróbio, utilizado no tratamento e na estabilização de resíduos orgânicos para a produção de húmus.

A base da compostagem é a biodegradação dos resíduos orgânicos que se decompõem naturalmente por população diversificada de micro-organismos, transformando os resíduos em outro tipo de matéria orgânica; esse processo é desenvolvido em duas etapas distintas, degradação ativa e maturação. Esse processo pode ser acelerado por adição de resíduos ricos em consórcios microbianos, em condições controladas de aerobiose e demais parâmetros (MORENO et al., 2008). A biodegradação controlada dos resíduos orgânicos é uma medida necessária para viabilizar o potencial de fertilização da fração orgânica e evitar os fatores adversos causados pela degradação descontrolada no meio ambiente (PEREIRA-NETO, 2010).

1.3.6.2 Compostagem de resíduos sólidos

Segundo Pereira-Neto (1996, apud LEITÃO et al., 2007), em um país com as características do Brasil, a compostagem, reveste-se de grande importância e necessidade por atender a vários objetivos: sanitários, sociais e agrícola. Muitas pesquisas nessa área vêm desenvolvendo-se, visando desenvolver um sistema prático operacional que ofereça um composto eficiente, com baixo custo de produção (LEITÃO et al., 2007).

A compostagem bem conduzida destrói ovos, larvas e micro-organismos patogênicos existentes no lodo de esgoto desde que a temperatura elevada permaneça por longo período (KIEHL, 1985).

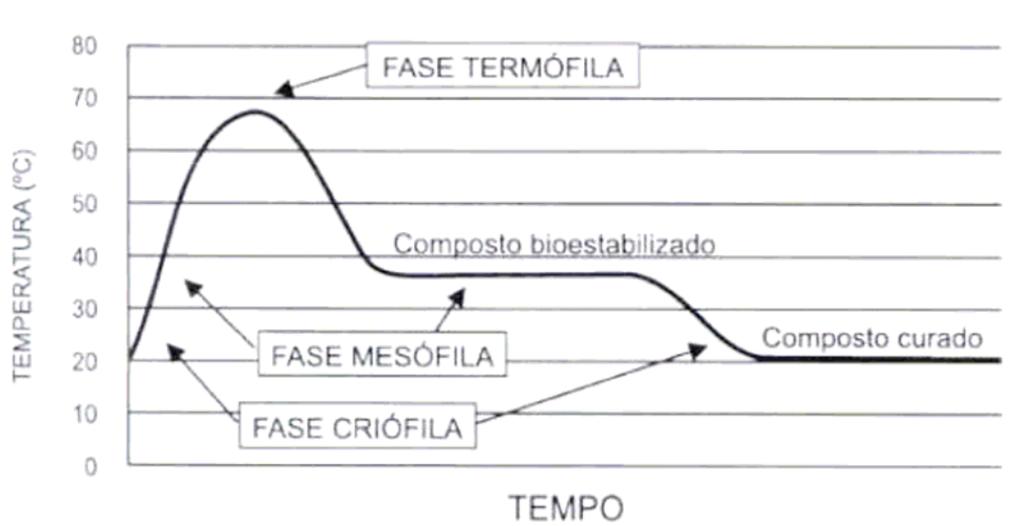
1.3.6.3 Fases da compostagem

A compostagem é um processo resultante da decomposição microbiana por oxidação da massa heterogênea de matéria orgânica no estado sólido sob condição de umidade controlada, citado por Kiehl (2002, apud SILVA, EIGENHECER, RODRIGUES, 2009). As diversas transformações sofridas por esses substratos orgânicos através da ação de diferentes micro-organismos além da taxa e da extensão dessas transformações, depende não só do material inicial, mas também das condições durante a compostagem.

Nesse processo, podem-se distinguir três fases. A fase mesófila é caracterizada pelo crescimento e multiplicação intensa dos micro-organismos com aumento de temperatura onde ocorrem reações químicas de oxidação; essa fase pode durar cerca de 30 dias (PEREIRA-NETO, 2010).

Em seguida, ocorre a fase termófila com elevadas taxas de consumo de oxigênio e de redução de matéria orgânica; a temperatura pode atingir 50 a 70° C. É a fase de semicura ou bioestabilização com duração de até 30 dias, período em que o composto deixa de ser tóxico. Na terceira fase, também de duração média de 30 dias, ocorre a cura, maturação ou humificação, seguida de mineralização. Caracteriza-se pela diminuição da temperatura e das taxas de consumo de oxigênio (BIDONE, 2001).

A figura 1 apresenta as fases da compostagem em relação à curva padrão de temperatura durante o processo.



Fonte: Kiehl (2002, apud SILVA et al., 2009)

Figura 1 Fases da compostagem

1.3.6.4 Biodegradação

A biodegradação é a transformação dos compostos químicos pela ação dos organismos vivos; é um dos principais processos que determina o destino de compostos orgânicos em ambientes aquático e terrestre. Nesse processo, há transformações por organismos superiores e micro-organismos.

Os micro-organismos ocupam os mais diferentes nichos da biosfera, sendo encontrados em praticamente todos os ambientes terrestres. A maior biomassa viva no planeta é formada por comunidades microbianas, sendo responsáveis por processos essenciais para manter a vida nas condições ambientais atuais. De todos os organismos vivos, os micro-organismos são os mais versáteis e diversificados em suas exigências nutricionais porque nem sempre requerem certos tipos de compostos complexos contendo carbono como nutriente (ANDREOTE, 2008).

Nos ciclos bioquímicos, a transformação microbiana é a mais importante e, possivelmente, o único processo significativo em que pode decompor estruturas orgânicas complexas em substâncias químicas de valor ambiental. Uma característica-chave dos micro-organismos corresponde à sua capacidade de realizar reações químicas, degradando moléculas maiores em menores, além de sintetizar moléculas com estruturas específicas (SCHLEGEL, 1993).

Micro-organismos

A matéria orgânica seja coloidal ou sólida no processo de compostagem é degradada por micro-organismos que se utilizam da ação de diversas enzimas para o crescimento microbiano. A cinética de transformação das substâncias contidas nos resíduos deve ser determinada a fim de avaliar a extensão e o período de degradação. Vários métodos têm sido desenvolvidos para simular transformação de compostos orgânicos em ambientes diversos.

Os fungos filamentosos em geral crescem em meio ácido e têm são caracterizados por apresentarem função hidrolítica, secretando enzimas que quebram a matéria orgânica em moléculas menores na presença da água. Esses micro-organismos são seres eucarióticos, unicelulares ou multicelulares. Obrigatoriamente são micro-organismos aeróbios que preferem meios mais ácidos, embora desenvolvam atividades em meio alcalino (ESPOLITO, AZEVEDO, 2004). São bastante atuantes na faixa termofílica da compostagem pela degradação de compostos carbonáceos (celulose e lignina), atuando também na fixação de nitrogênio e na formação de húmus (PEREIRA- NETO, 2010).

As bactérias mesofílicas dominam as fases iniciais do processo de compostagem, sendo substituídas por bactérias termofílicas à medida que a temperatura aumenta para valores superiores a 40° C. Para preservar a boa atividade dessas, ao final do processo não se deve efetuar revolvimento, pois levariam as camadas mais ricas em fungos e actinomicetos para o interior da pilha. As bactérias desempenham seu papel na fase termófila, decompondo açúcares, proteínas e outros compostos orgânicos de fácil digestão, aumentam a disponibilidade de nutrientes, agregam partículas ao solo e fixam nitrogênio (BIDONE, 2001).

Os actinomicetos constituem uma classe de micro-organismos muito heterogênea. São bactérias que apresentam algumas características de fungos, decompõem materiais que outros micro-organismos não degradam e têm habilidade para se reproduzirem em ambientes com baixo teor de umidade e elevadas temperaturas (HERBETS, 2005). São capazes de degradar grande variedade de substratos como ácidos orgânicos, açúcares, proteínas, além de ligninas e ainda produzem enzimas que podem degradar o material constituinte de outras bactérias.

Atuam geralmente, na fase final do processo de compostagem (PEREIRA-NETO, 2010).

Os actinomicetos, denominados de actinobactérias, participam da dinâmica de microambientes onde o fluxo de carbono e outros nutrientes constituem fatores determinantes para o funcionamento segundo Kennedy e Smith et al. (1995, apud ARAÚJO, CALAZANS, MELO, 2008). A maioria das actinobactérias são saprofiticas, ocorre em vários ecossistemas, como o solo e têm a função de degradar matéria orgânica para sua nutrição. Atuam no meio em compostagem quando escasseiam outras bactérias e fungos, fixando nitrogênio e decompondo adubação verde em elevada temperatura.

Enzimas

As enzimas são macromoléculas predominantemente protéica, imprescindíveis a qualquer sistema vivo, pois aceleram as reações químicas que mantêm e regulam os processos vitais. Esses catalisadores estão presentes em todos os seres vivos, dos quais podem ser extraídos e aplicados livres ou imobilizados, em sistemas diferentes daqueles que as originou. Uma das principais características das enzimas é sua especificidade sobre o substrato (SAID, PIETRO, 2004).

A velocidade de reação das enzimas depende do pH, força iônica do meio, temperatura e presença ou ausência de inibidores. As enzimas se desestruturam em elevadas temperaturas e valores extremos de pH. Em reações catalisadas por enzimas, a velocidade é acelerada pelo aumento da temperatura até atingir uma temperatura ótima. Apesar de algumas enzimas tolerar a grandes mudanças de pH, a maioria delas são ativas somente em intervalos muito restritos. Mudanças drásticas no pH promovem a desnaturação de muitas enzimas. A atividade enzimática e, conseqüentemente, a cinética das enzimas em processo de biodegradação varia de acordo com a composição e características da matéria orgânica e dos produtos resultantes (FERNÁNDEZ et al., 2008).

Esses biocatalisadores são secretados por micro-organismos, plantas e animais. Têm muitas aplicações tecnológicas, razão pela qual a participação no mercado mundial, de enzimas industriais cresce significativamente (BON et al., 2008). Esse fato é justificado pelas características das enzimas: apresentam

especificidade e elevada eficiência catalítica; são proteínas versáteis que permitem a catálise de reações de hidrólise e de síntese, muitas vezes de forma quimo, régio ou enantiosseletivas, atuam sob condições brandas de temperatura e pressão, são inócuas aos seres vivos, dentre outras propriedades específicas (FELIX, NORONHA, MARCO, 2004; FREIRE, CASTILHO, 2008).

Os micro-organismos através das enzimas, sintetizam e excretam várias substâncias por reações de oxidação e hidrólise durante a degradação da matéria orgânica. Por sua vez, esses biocatalisadores têm reflexo no ciclo natural do carbono, nitrogênio, fósforo e outros elementos (FERNÁNDEZ et al., 2008).

Na compostagem, dentre as enzimas responsáveis pela degradação dos resíduos, exemplificam-se: proteases, amilases, celulasas, tanases e ligninas. As proteases são enzimas que hidrolisam proteínas a peptídeos e aminoácidos e que estão envolvidas em uma variedade de processos fisiológicos essenciais para o ciclo de vida de organismos; estão distribuídas na natureza e apresentam grande resistência a condições adversas. São produzidas por vegetais, animais e micro-organismos cuja atividade é importante na degradação de resíduos sólidos e de efluentes industriais e domésticos (FELIX, NORONHA, MARCO, 2004; VERMELHO et al., 2008).

As amilases são um conjunto de hidrolases glicolíticas que degradam o amido com produção de glicose, maltose e dextrina (MORAES, 2004). As lipases trabalham em interfaces hidrofílicas-lipofílicas e toleram solventes orgânicos nas reações; estão envolvidas em várias etapas do metabolismo de lipídeos, incluindo digestão, absorção e reconstituição de gorduras e metabolismo de lipoproteínas (TREVISAN, 2004).

As celulasas são sistemas enzimáticos que hidrolisam a celulose com liberação de glicose, celobiose, dentre outros compostos. A celulose é o polímero natural mais abundante na natureza, sendo sua biodegradação realizada por enzimas como exoglicanases, endoglicanases e glicosidases, denominadas celulasas, classificadas por suas diferentes formas e ação. As celulasas são produzidas por um espectro de bactérias e fungos aeróbios e anaeróbios, mesófilos e termófilos (DILLON, 2004).

As tanases são enzimas que atuam em ligações lignolíticas e que têm sido utilizadas nas indústrias de alimentos. A lignina é um dos principais constituintes da

madeira, assim como a celulose e a hemicelulose, sendo responsável pela sua resistência; é um heteropolímero amorfo de elevado peso molecular, formado pela polimerização de unidades fenolíticas e álcoois que atuam como material incrustante, Esse biopolímero é de difícil degradação em relação aos polissacarídeos, sendo um componente recalcitrante do húmus (SILVA, 2004). Os fungos são os principais agentes de degradação da lignina, entre eles os denominados fungos da decomposição branca (ESPOSITO, AZEVEDO, 2004).

1.3.6.5 Fatores que influenciam o processo de compostagem

A compostagem sendo um processo biológico torna-se implícita a necessidade de controle dos fatores que comumente interferem a atividade microbiológica. Segundo Pereira-Neto (2010) e Kiehl (1998), a compostagem pode ser classificada, segundo os fatores predominantes no processo de fermentação que dependem de: temperatura (criófila, mesófila ou termófila), aeração (aeróbio, anaeróbio ou misto), ambiente (aberto ou fechado) e o tempo (lento ou natural, ou acelerado).

O desenvolvimento de um sistema biologicamente complexo como é a compostagem, para obter um produto estabilizado com ausência de microorganismos patogênicos e metais pesados, deverá respeitar limites e princípios dos fatores relacionados à atividade biológica. Os principais fatores que interferem no processo de compostagem são descritos a seguir (KIEHL, 1985).

a) Umidade

A umidade é fundamental para a vida microbiana. O processo de compostagem ocorre satisfatoriamente buscando o equilíbrio água e ar, com o teor de umidade na ordem de 55 %. Umidades superiores a 60 % causam anaerobiose (quando a água ocupa os espaços vazios do meio, impedindo a passagem do oxigênio). A umidade inferior a 40 % reduz significativamente a atividade biológica. O ajuste da umidade pode ser feito pela mistura de componentes ou pela adição de água (BIDONE, 2001).

Nas leiras orgânicas constituídas de lodos de esgotos, esterco, resíduos de indústrias de alimentos que apresentam teores médios de umidade acima de 80 % é necessário reduzir o teor de umidade para que a compostagem se processe

normalmente (PEREIRA-NETO, 2010). Valor ótimo de umidade para maioria dos processos de compostagem está compreendido no intervalo de 40 a 70 % (FERNÁNDEZ et al., 2008).

O teor de umidade da matéria-prima em processo de compostagem é influenciado pelo tamanho e composição das partículas. Quanto mais finas as partículas dos resíduos orgânicos a serem compostados maior será a capacidade de retenção de água. À medida que a matéria orgânica vai se humificando, vai aumentando sua capacidade de retenção de água. O lodo de esgoto tem tendência a se compactar e assim sendo, a umidade inicial para compostagem deve ser inferior a 60 %. O excesso de umidade do composto pode ser reduzido pelos revolvimentos; quando a umidade está entre 60 e 70 %, revolver a cada dois dias, umidade entre 40 e 60 %, revolver a cada três dias, e umidade abaixo de 40 %, requer irrigação, a não ser na fase final (KIEHL, 1985).

b) Aeração

No processo aeróbio da compostagem, o fornecimento de ar é vital à atividade microbiana, pois os micro-organismos aeróbios têm necessidade de O₂ para oxidar a matéria orgânica que lhes serve de alimento. Durante a compostagem, a demanda por oxigênio pode ser bastante elevada, e a falta desse elemento pode se tornar fator limitante para a atividade microbiana prolongando o ciclo de compostagem. A circulação de ar na massa do composto é fundamental para rapidez e eficiência do processo de biodegradação (PESSINI et al., 2006).

A aeração dos resíduos em compostagem pode ocorrer por processos mecânicos ou por reviramento manual, denominado de processo natural. A atividade microbiológica e o controle da temperatura dependem da quantidade de oxigênio no meio (PEREIRA-NETO, 2010).

c) Temperatura

A temperatura tem efeito sobre o crescimento da atividade metabólica dos micro-organismos, sendo um dos fatores indicativos da eficiência do processo de compostagem (PEREIRA-NETO, 2010).

Alguns fatores que influenciam o bom desenvolvimento da temperatura na massa de compostagem são os tipos de matéria-prima e do sistema utilizado, além

do controle operacional - teor de umidade, ciclo de reviramento, balanço inicial dos nutrientes, quantidade de material e configuração geométrica das leiras (PEREIRA-NETO, 2010).

Na compostagem aeróbia, evidenciam-se muitas mudanças de temperatura determinadas pelo metabolismo exotérmico dos micro-organismos aeróbios. Inicialmente, a fase criófila é caracterizada pela temperatura ambiente, fase mesófila com temperatura de 45 a 55 °C em um período de três a quatro dias, prosseguindo a elevação da temperatura, na fase termófila acima de 55 °C. Essa faixa permite a máxima atividade microbiana com redução de condições de sobrevivência de patógenos. O processo termina com a fase criófila quando a temperatura da biomassa atinge valores próximos ou iguais à temperatura ambiente (maturação) (KIEHL, 1985).]

d) Relação carbono/ nitrogênio

Os micro-organismos heterotróficos têm como fonte de energia, o carbono. O nitrogênio se faz necessário para síntese de proteínas. A relação carbono/nitrogênio (C/N) é considerada como fator que caracteriza o equilíbrio dos substratos. As proporções de C/N de 30/1 a 40/1 são recomendadas para iniciar a compostagem. Tanto a falta de nitrogênio quanto a falta de carbono limitam a atividade microbiológica. Se a relação C/N for baixa, ocorre perda de nitrogênio pela volatilização da amônia e até mesmo pela inibição da atividade biológica. Se essa for elevada, os micro-organismos ficam sem nitrogênio para síntese de proteínas e limita o seu desenvolvimento, tornando lento o processo de compostagem (PESSINI et al., 2006). No final da compostagem, ou seja, na completa maturação, a relação C/N é de 10/1 (PEREIRA-NETO, 2010).

e) Granulometria

Na compostagem, o tamanho das partículas dos resíduos exerce grande influencia na compostagem; a granulometria fina facilita a atividade microbiana promovendo o aumento da velocidade das reações bioquímicas. Segundo Fernandes e Silva (1999), as condições de compostagem dependem da porosidade dos substratos. Esses autores concluíram que o tamanho das partículas deverá estar entre 25 e 75 mm.

O pH durante a biodegradação pode ser indicativo do estado de compostagem dos resíduos orgânicos. Níveis de pH muito baixo ou muito alto reduzem ou até inibem a atividade microbiana, influenciando a biodegradação durante a compostagem. Quando são utilizadas misturas com pH próximo da neutralidade, na fase mesófila da compostagem, há uma queda sensível de pH, variando de 5,5 a 6,0 devido à produção de ácido orgânicos; em pH próximo de 5,0 ou inferior, há uma diminuição da atividade microbiana e o composto pode não passar para a fase termófila. Na passagem da fase termófila, há uma elevação do pH que se explica pela hidrólise das proteínas e liberação de amônia. O pH se mantém alcalino (7,5 – 9,0) durante a fase termófila. O processo de compostagem se desenvolve bem com pH próximo de 7,0 na presença de lodo de esgoto e poda (PESSIN et al., 2006). O pH do produto final, maturado (o adubo orgânico), deve ser superior a 7,8 (PEREIRA-NETO, 2010).

1.3.6.6 Produto final da compostagem

Húmus é um produto a que se chama de composto, caracterizado por se encontrar estabilizado quimicamente e biologicamente; rico em nutrientes que passaram de forma orgânica para mineral, com alto teor de material coloidal e com capacidade de melhoria da qualidade do solo, atuando como adubo (PEREIRA-NETO, 2010).

O valor do adubo orgânico depende do teor de nutrientes e da forma como eles se encontram. Não deve ser visto como um substituto do fertilizante, mas como um condicionador de solos, cujo uso permite melhorar suas condições gerais a longo prazo (PEREIRA-NETO, 2010; BIDONE, 2001).

1.4 REFERÊNCIAS

ANDREOLI, C. V.; PINTO, M. A. T. Introdução. In: _____. **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro: Rima, 2001. p. 21 -24.

ANDREOLI, C. V. **Alternativas de uso de resíduos do saneamento**. Rio de Janeiro: Artes Gráficas. 2006. 417p.

ANDREOLI, C. V.; TAMANIN, C. R.; PEGORINI, B. H. E. S. P; NEVES, P. S. Uso de lodo de esgoto na produção de substratos vegetal. In: _____. **Usos alternativos de lodos de estações de tratamento de água e estações de tratamento de esgoto**. Rio de Janeiro: ABES, 2006. p. 235 -281.

ARAÚJO, J. M. ; CALAZANS, G. M. ; MELO, I. S. Importância de actinobactérias para a agricultura. In: _____. **Microrganismo e agrobiodiversidade: o novo desafio para a agricultura**. Guaíba: Agrolivros, 2008. p. 277-296.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2007. Disponível em: <<http://www.scribd.com/doc/2363213/Panorama-dos-residuos-solidos-no-brasil-2006>>. Acesso em: 28 jul. 2010.

ANDREOTE, F. D. (et al.) Diversidade molecular de micro-organismos endofíticos. In: _____. **Microrganismo e agrobiodiversidade: o novo desafio para a agricultura**. Guaíba-RS: Agrolivros, 2008. p. 223-276.

BIDONE, F. R. A. **Resíduos Sólidos Provenientes de Coletas Especiais- Eliminação e Valorização**. Rio de Janeiro: ABES. 2001. 240p.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução nº 375 de 29 de agosto de 2006**. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. Diário Oficial da União,

Brasília-DF. Ministério do Meio Ambiente – MMA. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiano.cfm?codlegitipo=3>>. Acesso em: 10 mar. 2010.

_____. **Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União. Brasília. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/11230>. Acesso em: 19 fev. 2011.

BRUNI, V. C. **Avaliação do processo operacional de compostagem aerada de lodo de esgoto e poda vegetal em reatores fechados**. 2005. 94 f. (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

BARATTA-JÚNIOR, A. P. **Utilização do composto de resíduos da poda da arborização urbana em substratos para produção de mudas**. 2007. 53 f. Dissertação (Mestrado Ciências Ambientais e Florestais) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.

BARBOZA, R. S. L. de. **Influência do lodo de esgoto na nodulação e no desenvolvimento do caupi (*Vigna unguiculata* [L.] Walp)**. 2007. 84 f. Dissertação (Desenvolvimento de Processos Ambientais – Universidade Católica de Pernambuco, Recife.

BON, E. P. C.; COSTA, B. R.; SILVA, M. V. A.; FERREIRA-LEITÃO, V. S.; FREITAS, S. P.; FERRARA, M. A. Mercado e perspectivas de uso de enzimas industriais e especiais no Brasil. In: Bon, E. P. S.; Ferrara, M. A.; Corvo, M. L. **Enzimas em biotecnologia - produção, aplicações e mercado**. Rio de Janeiro: ed. Interciência, 2008. p. 463-488.

CAMPOS, F. S., ALVES, M. C. Uso de lodo de esgoto na reestruturação de degradado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 32, p. 1389-1397, 2008.

CORTEZ, C. L.; COELHO, S. T.; GRISOLI, R.; GAVIOLI, F. **Compostagem de resíduos de poda urbana**. 2008. CENBIO – Centro Nacional em Referência em Biomassa. Disponível em: <<http://www.cenbio.org.br>>. Acesso em: 19 nov. 2010.

DILLON, A. J. P. Celulases. In: S. Said, R. C. L. R. Pietro. **Enzimas como agentes biotecnológicos**. 14th. Ribeirão Preto: Legis Summa. 2004. p. 243 – 267.

EMLURB - Empresa Municipal de Limpeza Urbanização. **Resíduo de poda não tem aproveitamento correto**, 2004. Disponível em: <http://emlurb.com.br>. Acesso em: 28 mar. 2010.

ESPOSITO, E.; AZEVEDO, J. L. **Fungos**: uma introdução à biologia, bioquímica e biotecnologia. Caxias do Sul: EDUCS. 2004. 510p.

FELIX, C. R.; NORONHA, E. F.; MARCO, J. L. Proteases – características e aplicações industriais. In: S. Said, R. C. L. R. Pietro. **Enzimas como agentes biotecnológicos**. Ribeirão Preto: Legis Summa. 2004. p. 327-348.

FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. **Manual prático para a compostagem de bioSSólidos**, Londrina: PROSAB. 1999. 83p.

FERNÁNDEZ, M. T. H. ; IZQUIERDO, C. G. ; STAMFORD, N. P. ; MORENO, M. C. M. Enzimas que actúan en la materia orgánica del suelo. In: _____. **Microorganismos e Agrobiodiversidade**: o novo desafio para agricultura, Guaíba-RS: Agrolivros, 2008. p. 351-375.

FABIÃO, A. **As podas em árvores ornamentais**: como e porquê. Câmara Municipal de Odivelas, out. 2006. Disponível em: <<http://www.cm-odivelas.pt/camaramunicipal/.../podas arvores.pdf-similares>>. Acesso em: 16 out. 2010.

FREIRE, D. M. G.; CASTILHO, L. R. Lipases em biocatálise. In: _____. BON, E. P. S.; FERRARA, M. A.; CORVO, M. L. **Enzimas em biotecnologia - produção, aplicações e mercado**. Rio de Janeiro: Interciência, p. 369-386, 2008.

HERBETS, R. A. **Compostagem de resíduos sólidos orgânicos: aspectos biotecnológicos**. 2005. Dissertação (Mestrado Biotecnologia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

FIA, R.; MATOS, A. T.; AGUIRRE, C. I. Características químicas de solo adubado com doses crescentes de lodo de esgoto caçado. **Engenharia na Agricultura**. v. 13, 2005. p. 387-299.

KELLER, E. A. Waste Management. In: _____. **Environmental Geology**. New Jersey: Prentice-Hall, 2000. p. 317 – 333.

KIEHL, J. E. **Fertilizantes orgânicos**. 33 ed., Piracicaba: CERES. 1985. 492p.

_____. **Manual de compostagem: manutenção e qualidade do composto**. Piracicaba: CERES. 2002. 171p.

LEITÃO, V. P. M.; MOTA, S.; SILVA, L. A.; SILVA, J. C. C. Monitoramento da temperatura durante a fase de degradação ativa em composto orgânico de folhas de cajueiro e de mangueira, 24 , 2007, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte.

LIMA, J. R. T.; FIGUEIREDO, M. A. B. **Extensão rural, desafios de novos tempos: agroecologia e sustentabilidade**. Recife: BAGAÇO. 2006. 174p.

MORAES, E. da. Gestão dos resíduos sólidos urbano: comparativo entre os municípios de Maringá e Santo André. In: SIMPÓSIO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA, 2009, Maringá. **Anais ...** Paraná.

MORAES, L. M. P. Amilases. In: Said, S., Pietro, R. C.L. R. **Enzimas como agentes biotecnológicos**. Ribeirão Preto: Legis Summa. 2004. p. 223-242.

MORENO et al. Producción de biofertilizantes por degradación microbiológica de resíduos orgânicos. In: _____. **Microrganismo e agrobiodiversidade: o novo desafio para a agricultura**. Guaíba: Agrolivros, 2008. p. 377-399

PEDROZA, E. C. L.; MOREIRA, E. A.; CAVALCANTI, P. F. F.; SOBRINHO, P. A.; ANDREOLI, C. V.; HAANDEL, A. V. Aplicação de leitos para secagem de lodo gerado em estações de tratamento de esgoto. In: _____. **Usos alternativos de lodos de estações de tratamento de água e estações de tratamento de esgoto.** 5. ed., Rio de Janeiro: ABES, 2006. p. 109-158.

PEREIRA-NETO, J. T. **Manual de compostagem - processo de baixo custo.** Minas Gerais: UFV. 2010. 81p.

PERNAMBUCO. Lei nº 14.236 de 13 de dezembro de 2010. Dispõe sobre a Política Estadual de Resíduos Sólidos e dá outras providências. Disponível em: <http://www.comunidades.pe.gov.br/c/document_library/get_file?...930>. Acesso em: 19 fev. 2011.

PERSSIN, N.; FERNANDO, F.; PANAROTTO, C. T.; FIROTTA, R.; SCHNEIDER, V. E.; SILVA, S. M. C. P.; HOSSAKA, A. L.; TELH, M. Metodologia de Transformação e aproveitamento da Fração Orgânica: Minimização da Quantidade de Resíduos Dispostos em aterros. In: _____. **Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos com ênfase na proteção de corpos d'água: prevenção, geração e tratamento de lixiviados de aterros sanitários.** Rio de Janeiro: ABES, 2006. p. 35-36.

PROSAB – Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. **Manual Prático para a Compostagem de Biossólidos.** eds. Fernandes, F. e Silva, S. M. C. P. Londrina: Universidade Estadual de Londrina. 1996, 91p.

RIBEIRO, D. V.; MORELLI, M. R. **Resíduos sólidos – problema ou oportunidade?** Rio de Janeiro: Interciência. 2009. 158p.

SAID, S.; PIETRO, R. C. L. R. Generalidades sobre aplicação industrial de enzimas. In: _____. **Enzimas como agentes biotecnológicos.** Ribeirão Preto: Legis Summa. 2004. p. 1-8.

SCHLEGEL, H. G. **General Microbiology**. Cambridge: Cambridge University Press. 7th. ed. 1993. 655p.

SILVA, R. ; GOMES, E. Ligninases. In: Said, S; Pietro, R. C. L. R. **Enzimas como agentes biotecnológicos**. Ribeirão Preto: Legis Summa. 2004. p. 349-378.

SILVA, G. S.; EIGENHECER, E. M.; RODRIGUES. D. C. ; da. Produção e aproveitamento de composto orgânico a partir de resíduos de origem vegetal no campus da Universidade Federal Fluminense/Niterói-RJ. In: CONGRESSO NACIONAL DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO. 2009, Niterói. **Anais...** Rio de Janeiro: UFF, 2009.

TREVISAN, H. C Lipases. In: Said, S; Pietro, R. C. L. R. **Enzimas como agentes biotecnológicos**. Ribeirão Preto: Legis Summa. 2004. p. 114-135.

VERMELHO, A. B.; MELO, A. C. N.; SÁ, M. H. B.; SANTOS, A. L. S.; D'AVILA-LEVY, C. M.; COURI, S.; BON, E. P. S. Enzimas proteolíticas: aplicações biotecnológicas. In: Bon, E. P. S.; Ferrara, M. A.; Corvo, M. L. **Enzimas em biotecnologia - produção, aplicações e mercado**. Rio de Janeiro: Interciência, 2008. p. 273-287.

CAPÍTULO II

CONTROLE MICROBIOLÓGICO E ATIVIDADE ENZIMÁTICA DE COMPOSTAGEM DE PODA URBANA NA PRESENÇA DE LODO DE ESGOTO*

ARAÚJO, M. G. C.

PAIVA, S. C.

MELO, A. P.

SALGUEIRO, A. A.

Laboratórios de Química Analítica, Química Orgânica, Bioengenharia e de Microbiologia; Núcleo de Pesquisas em Ciências Ambientais – NPCIAMB;
Centro de Ciências e Tecnologia, Centro de Ciências Biológicas;
Universidade Católica de Pernambuco;
Rua do Príncipe, 526, Boa Vista, 5050-990, Recife, PE, Brasil.

2.1 RESUMO

A compostagem é um método de decomposição de material biodegradável sob tratamentos adequados, de forma a obter um composto orgânico (húmus) para utilização na fertilização do solo. O objetivo deste trabalho foi reaproveitar poda de árvores urbanas e lodo de esgoto para compostagem. O processo foi desenvolvido em laboratório e em campo ao ar livre, sob diferentes tratamentos. Foi investigada a adição de cal hidratada e de inóculos. As amostras dos resíduos e durante a compostagem foram submetidas à extração com água tamponada estéril. O conteúdo microbiológico, atividades enzimáticas, temperatura, pH e concentrações de carbono e nitrogênio foram determinados. A contagem padrão de bactérias e os fungos (leveduras e fungos filamentosos) atingiram valores máximos na faixa de 10^{12} e de 10^8 UFC/mL, respectivamente. A calagem inibiu os coliformes totais e termotolerantes, além das *Salmonellas* e as quatro enzimas investigadas quando foram utilizados cal e lodo de esgoto na proporção 1:1. Na compostagem em campo, a massa não foi sanitizada; a cal foi utilizada a 25 %p/p em relação ao lodo de esgoto e a fase termófila ocorreu num pequeno período. As atividades das celulases, proteases, fenoloxidasas e tanases atingiram os maiores percentuais na fase ativa de degradação dos resíduos. A umidade da compostagem em campo variou entre 55 a 65 %. Durante a compostagem submetida à calagem, o pH atingiu valores alcalinos enquanto nos demais tratamentos, o pH foi em torno da neutralidade. O produto final obtido apresentou relação carbono:nitrogênio entre 9 e 16 com 60 dias de compostagem. A granulometria da poda urbana, o volume dos resíduos em tratamentos de laboratório e a presença da cal influenciaram a compostagem. Processo de compostagem de poda de árvores e lodo de esgoto por aeração é eficaz na produção de composto orgânico para utilização na agricultura, proporcionando uma boa alternativa para destinação final do lodo de estação de tratamento de esgoto.

Palavras-chave: resíduos sólidos, poda de árvores, lodo de esgoto, biodegradação, microbiologia, enzimas, húmus.

2.2 INTRODUÇÃO

Os resíduos sólidos produzidos pela população dos centros urbanos são muitas vezes acumulados no ambiente sem o adequado tratamento ou utilização que possibilite sua reciclagem. A crescente e diversificada geração de resíduos nos meios urbanos e a necessidade de sua disposição final alinham-se entre os mais sérios problemas ambientais enfrentados por países industrializados (CAMPOS, 2006).

A geração desses resíduos é proporcional ao aumento da população e desproporcional à disponibilidade de soluções para o gerenciamento dos detritos. O correto manejo dos resíduos é um desafio dos centros urbanos neste início de milênio (REICHERT, 1999 apud SANTOS et al., 2006).

As formas de tratamento e de destinação final dos resíduos sólidos praticados nas últimas décadas são frutos do modelo de industrialização no período de 1950 a 1960. O crescimento a qualquer custo favoreceu o aparecimento de lixões - resíduos sólidos dispostos a céu aberto - em todo o Brasil (BIDONE, 2001).

O crescimento acentuado de urbanização de países emergentes como o Brasil, tem levado a população residente em zonas rurais, a migrar para aglomerados urbanos. Tal concentração populacional, que no Brasil, é da ordem de 160 milhões de habitantes na zona urbana e 29 milhões de habitantes na zona rural (IBGE, 2010), gera milhares de toneladas diárias de vários tipos de resíduos. Os resíduos, dispostos inadequadamente são capazes de degradar o meio ambiente e transmitir doenças aos seres humanos e animais.

Os resíduos sólidos podem ser decompostos pela compostagem onde são transformados num composto (adubo) utilizado na agricultura (SANTOS, 2006). Considerando-se o grande percentual de folhagem e galhos gerados diariamente pela poda das árvores da zona urbana da cidade de Recife, faz-se necessário buscar uma alternativa para o seu reaproveitamento através da compostagem que não precisa de mão-de-obra qualificada e pode ser desenvolvida em sistemas simplificados e de baixo custo onde o produto final (húmus) pode ser comercializado.

Os resíduos sólidos verdes, provenientes da prática de poda de árvores realizada nos perímetros urbanos, representam um considerável volume de material

vegetal, oriundo de praças, jardins, residências e quando inadequadamente manuseados, poluem o ambiente (SUSZEK et al., 2005). Os resíduos de poda são ricos em lignina e são biodegradáveis, sendo classificados pela legislação brasileira como resíduos classe II B – inertes, recebendo os mesmos tratamentos e destino final dos resíduos urbanos (ABNT, 2004).

O lodo de esgoto é o resíduo proveniente do tratamento das águas residuárias, de origem urbana e ou industrial, coletadas por rede de esgoto e levadas as estações de tratamento de esgoto (SALVADOR, 2006). Esse resíduo apresenta grande potencial de aproveitamento agrícola e florestal, quer seja como um condicionante de propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, como também uma fonte de nutrientes para as plantas cultivadas (BARCELLAR et al., 2004; CAMPOS, 2006).

O objetivo deste trabalho foi realizar compostagem de poda urbana e lodo de esgoto, determinando o conteúdo microbiológico e atividades enzimáticas, além de parâmetros físico-químicos durante o processo.

2.3 MATERIAL E MÉTODOS

2.3.1 Resíduos orgânicos

Os resíduos de poda de árvores urbanas utilizados nos experimentos foram originados de várias espécies de árvores arbóreas e coletados em diversas avenidas da cidade do Recife pela EMLURB (Empresa Municipal de Limpeza e Urbanização) em veículos acoplados com triturador. Os resíduos de árvores foram triturados em forrageira e, em seguida, submetidos a uma triagem onde foram excluídos os gravetos maiores que 10 cm e acondicionados em sacos plásticos. Esse resíduo foi utilizado na composição das pilhas de compostagem que foram preparadas em menos de 24 h.

O lodo de esgoto foi coletado em leitos de secagem de tratamento primário na Estação de Tratamento de Esgoto do Cabanga (Recife – PE) e acondicionado em bombonas de plástico na temperatura de 28 °C.

O esterco bovino curtido foi também utilizado na compostagem de campo, como inóculo. Esse resíduo, proveniente da Fazenda Idelburgo, em Carpina (PE), foi coletado e disposto no solo ao ar livre à temperatura ambiente de 30 °C durante cerca de 30 dias antes da montagem das pilhas.

2.3.2 Preparação das pilhas de compostagem

Os experimentos laboratoriais foram realizados em laboratório na Universidade Católica de Pernambuco com iluminação indireta por radiação solar e ventilação natural por janelas abertas durante o dia. As pilhas foram construídas em caixas de polietileno, com capacidade de 25 kg, nas dimensões: 33 cm x 54 cm x 20 cm (largura x comprimento x altura). Os resíduos utilizados na compostagem de poda urbana e lodo de esgoto, além da cal (hidróxido de cálcio comercial a 50 %p/p de pureza) foram pesados, misturados manualmente e distribuídos nas caixas. A cal foi misturada previamente ao lodo de esgoto já hidratada, na proporção de 1:2 cal:lodo, antes de compor as pilhas. Foram realizados reviramentos semanalmente e

aguiação, duas a três vezes por semana em função da umidade da massa; a observação foi visual e empírica.

Um delineamento experimental casualizado com três tratamentos e três repetições foi realizado de acordo com as especificações a seguir:

- Tratamento A – poda urbana e lodo de esgoto na proporção de 1:1;
- Tratamento B – poda urbana, lodo de esgoto e cal na proporção de 1:1:0,5;
- Tratamento C – poda urbana, lodo de esgoto e cal na proporção de 1:1:0,5 na presença de 50 mL de inóculo, preparado em laboratório.

O consórcio de micro-organismos presentes no lodo de esgoto foi bioestimulado pelos nutrientes, originando o inóculo que foi preparado em frascos de Erlenmeyer de 500 mL, contendo 250 mL de volume útil. O meio de cultura foi composto por 1 % de glicose, 0,2 % de uréia e 0,1 % de fosfato básico de sódio. O cultivo submerso dos microrganismos autóctones do lodo de esgoto (10 g) ocorreu sob agitação a 150 rpm, 25 °C durante 48 horas.

No experimento de campo, oito pilhas foram construídas ao ar livre, em área do Centro de Treinamento (CETREINO) do Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA) na cidade de Carpina (PE) a 30 km da cidade do Recife. As pilhas foram construídas diretamente no solo, com terreno limpo e marcado, tendo como dimensões aproximadas: diâmetro 80 cm e altura 60 cm, em camadas alternadas dos resíduos: poda de árvores urbana, lodo de esgoto e esterco, na presença ou não de cal, sob quatro tratamentos em duplicatas, especificados na Tabela 1. O reviramento foi realizado de quinze em quinze dias, sendo a aguiação, cerca de três vezes por semana em função da característica macroscópica da compostagem em relação à umidade.

Tabela 1 Quantidade dos componentes (kg) nos tratamentos de compostagem em campo

Componentes	Tratamentos			
	I	II	III	IV
Poda urbana	48	48	64	64
Lodo de esgoto	48	48	48	48
Esterco bovino	35	35	35	35
Cal	15	-	15	-

2.3.3 Amostragem e extração

As amostragens foram coletadas no baricentro da pilha antes do revolvimento dos resíduos, durante 60 dias de compostagem. Cada 10 g da amostra foi suspensa em 100 mL de água de diluição tamponada a pH 7,2 estéril, em frascos de Erlenmeyer (APHA, 1998). Em seguida, o material foi submetido à extração durante 10 min a 25 °C, sob agitação em orbital de 150 rpm.

2.3.4 Determinações físico-químicas

- a) Temperatura – as temperaturas do ambiente e das pilhas de compostagem foram determinadas por termômetros analógicos com escala de 0 a 100 °C; os termômetros utilizados para determinar a temperatura das pilhas apresentavam uma haste de 40 cm de comprimento, proporcionando o monitoramento no interior da massa dos resíduos. Foram aferidas temperaturas no topo, na base e no baricentro de cada pilha de compostagem.
- b) Umidade – a umidade foi determinada através do equipamento Ultra-X, KARL KOLB - Scientific Technical supplies D-6072 (Dreieich Lvest Germony), ajustado a uma temperatura de 59,6 °C; a pesagem foi o indicador da balança de porcentagem zero (0 %); foi estabelecido o tempo de secagem da amostra até estabilizar a temperatura. Durante o processo, foram verificadas as leituras em quatro escalas de cores: a negra (0 a 25 %), a azul (25 % a 50 %), a amarela (0 % - 25 % + 50 % = 75 %) e a roxa (25 % + 75 % = 100 %). Os resultados foram expressos em percentual.
- c) pH - para 10 g de cada amostra, foi adicionado 25 mL de água destilada, agitado com bastão de vidro individual e após uma hora foi determinado o pH em potenciômetro, segundo metodologia da EMBRAPA (1997).
- d) Carbono total – as amostras coletadas de cada pilha foram trituradas, 0,04 g de cada amostra foi pesada em balança analítica, colocada em tubo de ensaio e

aquecida em placa elétrica até a fervura durante 5 minutos. Em seguida, a amostra digerida foi esfriada e adicionado 20 mL de água destilada, 1 mL de ácido ortofosfórico e 3 gotas do indicador difenilamina; o material foi titulado com solução de sulfato ferroso amoniacal 0,1 N até a cor azul desaparecer e aparecer a cor verde. O volume gasto foi utilizado para fazer os cálculos, segundo a metodologia da EMBRAPA (1997).

- e) Nitrogênio total – segundo a técnica do micro-Kjeldahl, as amostras coletadas no baricentro de cada pilha foram trituradas, pesadas em balança analítica; 0,4 g de cada amostra foi colocada em tubos de ensaio e adicionado 15 mL da solução ácida de sulfato de sódio; o material foi digerido em bloco digestor na temperatura inicial de 120 °C, ajustando sempre a temperatura até a completa destruição da matéria orgânica (cor azul claro); depois o material digerido foi esfriado até 30 °C, adicionado 25 mL de água destilada aos tubos, agitado e adicionado 2 gotas de solução de cloreto férrico. Em seguida, foi distribuído 25 mL da solução de sulfato de sódio em cada frasco de Erlenmeyer, acrescentando cinco gotas do indicador misto; o material foi destilado em solução de hidróxido de sódio e sulfato de sódio para alcalinizar. Em seguida, o material foi titulado com solução de ácido sulfúrico 0,01 mol/L até a mudança de coloração (cor róseo); os volumes gastos na bureta foram utilizados nos cálculos (EMBRAPA, 1997).

2.3.5 Determinações microbiológicas

As determinações microbiológicas foram realizadas segundo as normas oficiais do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1998). As diluições decimais foram realizadas com as amostras utilizando água de diluição tamponada a pH 7,2.

A água de diluição ou água tamponada (soluções estoques de fosfato monopotássico e de cloreto de magnésio) foi preparada periodicamente, com pH ajustado para 7,2, distribuída em frascos de diluição e em frascos de Erlenmeyer, e em seguida esterilizadas a 120 °C durante 15 min.

Foram realizadas as seguintes determinações microbiológicas:

- a) coliformes totais e coliformes termotolerantes – foram determinados pela técnica de tubos múltiplos; inicialmente foi utilizado caldo lactosado em concentração dupla, utilizando 5 tubos contendo 5 mL do meio, após incubação por 24 - 48 h a $35 \pm 0,5$ °C; cada tubo positivo, foi inoculado em caldo verde brilhante bilis e caldo EC (*Escherichia coli*) e incubados por 24 - 48 h a $35 \pm 0,5$ °C para coliformes totais e a $44,5 \pm 0,2$ °C; para cada tubo positivo foi consultada a tabela estatística e o resultado final foi expresso em NMP/kg (número mais provável de coliformes por kg da amostra);
- b) contagem padrão de bactérias – pela técnica *pour plate* foram realizadas diluições decimais em água tamponada; foi adicionado 1 mL de cada diluição em placa de Petri, em duplicata e utilizado o meio de cultura ágar triptona glicose extrato de levedura (*plate count agar*); as colônias foram enumeradas após 2 dias de incubação a 35 °C e os resultados expressos em UFC/mL;
- c) fungos filamentosos e leveduras - foi utilizado o meio de cultura malte ágar com cloranfenicol, distribuído em placas de Petri; diluições das amostras foram adicionadas (0,1 mL) ao meio de cultura e dispersas com alça de vidro (Drigalski); a incubação foi a 25 °C, durante 5 a 7 dias; os resultados foram expressos em UFC/mL para as colônias filamentosas (fungos filamentosos) e as colônias leitosas (leveduras);
- d) pesquisa de *Salmonellas* – 90 mL de caldo selenito esterilizado em banho-maria durante 10 minutos com pH $7,1 \pm 0,2$, foi inoculado com 10 g de cada amostra de resíduo e dos tratamentos de compostagem; o material foi incubado por 24 horas a 41,5 °C em banho-maria. De cada material investigado, o teste foi confirmado por inoculação (em estrias com alça de platina) em meio agar xilose-lisina-desoxicolato (XLD), distribuído em placas de Petri as quais foram incubadas por 24 h a 35,5 °C.

2.3.6 Determinações de atividades enzimáticas

Os extratos das amostras durante a compostagem foram utilizados para determinação de enzimas por difusão em Agar em placa de Petri, utilizando os seguintes meios de cultura (por litro), contendo os substratos das enzimas:

- a) celulases: 3,8 g de KCl; 2,0 g de K_2HPO_4 ; 0,1 g de $MgSO_4 \cdot 7 H_2O$; 1,0 g de $(NH_4)_2SO_4$; 0,5 g de extrato de malte; 10 g de carboximetilcelulose ; 15,0 g de ágar; pH final 5,0; atividades visualizadas na presença de Vermelho Congo;
- b) proteases: 5,0 g de peptona; 3,0 g de extrato de carne; 8 % de gelatina; 15,0 g de ágar; pH final 5,0); atividades visualizadas na presença de vapor de iodo metálico;
- c) fenoloxidasas: 15,0 g de extrato de malte; 5,0 g de ácido gálico; 15,0 g de ágar
- d) tanases: 15,0 g de extrato de malte; 5,0 g de ácido tânico; 15,0 g de ágar

Foram inoculados 10 μ L dos extratos nos meios de cultura distribuídos em placas de Petri; após incubação por 24 – 72 h a 30 °C. As atividades enzimáticas de celulases e proteases foram reveladas segundo Hankin e Anagnostakis (1975). As atividades das oxidases (fenoloxidasas e tanases) foram visualizadas a olho nu pela formação de halos de cor marrom, indicando a oxidação dos dois substratos por ação enzimática.

2.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.4.1 Caracterização dos resíduos sólidos

A Tabela 2 ilustra os resultados das caracterizações físico-químicas e microbiológicas para os resíduos de poda de árvores urbana, lodo de esgoto e esterco bovino, utilizados na compostagem deste trabalho. A poda urbana apresentou pH próximo à neutralidade (pH 6,2), o lodo de esgoto, pH 5,0 enquanto o esterco bovino, pH 8,9.

A umidade média da poda de árvores foi 55 % cujo teor de água elevado foi justificado pelo espaço de tempo (menos de 24 h) entre a coleta e o início da compostagem desse resíduo. O esterco bovino com umidade de 61 % foi coletado, curtido durante 30 dias e depois utilizado na composição das pilhas de compostagem. Considerando que o lodo de esgoto estava petrificado por exposição à radiação solar em período prolongado, foi determinado baixo valor de umidade nesse resíduo (35 %).

A poda urbana e o lodo de esgoto apresentaram, respectivamente, 31 e 16 % de carbono (C) e 0,9 e 1,4 % de nitrogênio (N) (Tabela 2). Considerando que foi observado na coleta do lodo de esgoto, a presença de plantas nativas no leito de secagem e que esse resíduo, os valores determinados para C e N foram menores que os da literatura. Ricci, Padovani e Paula-Júnior (2010) caracterizaram lodo de esgoto cujos resultados de C e N foram 35,6 e 5 %, respectivamente.

Na composição microbiológica dos três resíduos orgânicos, os coliformes totais e os coliformes termotolerantes atingiram a ordem de grandeza de 10^9 bactéria/kg; as bactérias heterotróficas, na faixa de 10^9 - 10^{12} UFC/kg; os fungos filamentosos e leveduras atingiram a ordem de grandeza máxima de 10^8 UFC/kg. A presença desses micro-organismos nos resíduos possibilitou a degradação da matéria orgânica durante o processo. Considerando a presença dos micro-organismos patogênicos (coliformes termotolerantes e *Salmonellas*) nos três resíduos investigados, foi utilizada a cal para viabilizar a sanitização do produto final.

Vários trabalhos na literatura realizaram compostagem com poda de árvores, lodo de esgoto e esterco, não sendo especificada a caracterização dos resíduos

compostados, com relação aos percentuais de carbono e nitrogênio (MOURA et al., 2009; LEITÃO et al., 2009).

Tabela 2 Caracterizações físico-químicas e microbiológicas dos resíduos sólidos utilizados na compostagem em laboratório e campo

Parâmetros	Resíduos sólidos		
	Poda de árvores	Lodo de esgoto	Esterco bovino
pH	6,2	5,0	8,9
Umidade (%)	55	35	61
Carbono (%)	31	16	32
Nitrogênio (%)	0,9	5,4	2,5
Coliformes totais (NMP/kg)	$> 2 \times 10^9$	$> 2 \times 10^9$	$> 3 \times 10^9$
Coliformes termotolerantes (NMP/kg)	$> 2 \times 10^9$	$> 2 \times 10^9$	$> 3 \times 10^9$
Contagem padrão de bactérias (UFC/kg)	1×10^{11}	2×10^9	9×10^{12}
Leveduras (UFC/kg)	8×10^8	8×10^8	1×10^7
Fungos filamentosos (UFC/kg)	5×10^8	9×10^7	6×10^6
<i>Salmonellas</i> (10 g)	Presença	Presença	Presença

Nas cidades, o volume de poda de árvores está aumentando devido ao incentivo à arborização do ambiente para controlar o aumento da temperatura. Esse resíduo orgânico pode ser reaproveitado em processo de compostagem para evitar à disposição do mesmo em aterros sanitários.

Com relação ao lodo de esgoto, o volume desse resíduo, que aumenta com a crescente população, é uma fonte de nutrientes contendo metais pesados e micro-organismos patogênicos que limitam sua aplicação direta em solos agrícolas. Para transformação desse resíduo num insumo agrícola comercializável, é necessária a utilização da calagem para diminuir o número de patogênicos e que seja realizado um controle de qualidade do produto final para atender à legislação e evitar impactos negativos ambientais.

2.4.2 Compostagem de poda de árvores e lodo de esgoto em laboratório

A Figura 1 ilustra as pilhas de compostagem conduzida em laboratório. A diferente coloração bege da massa de resíduos em decomposição foi devido à

presença da cal; as pilhas de compostagem em caixas de polietileno foram dispostas no piso, enfileiradas e distribuídas de forma casualizada (por sorteio). Foram realizados três tratamentos (A, B e C) em triplicata, originando nove pilhas.



Figura 1 Pilhas de compostagem em experimento de laboratório

A Tabela 3 apresenta as quantidades utilizadas dos componentes de cada compostagem investigada. A relação C:N dos resíduos utilizados nesse trabalho foi em torno de 22,5:1, utilizando-se materiais sólidos na mesma proporção (50 % de cada resíduo) e de acordo com os valores de C e de N da poda de árvore e do lodo de esgoto (tabela 1). Os valores pesados foram em função das umidades dos resíduos.

Tabela 3 Quantidade dos componentes da compostagem em laboratório

Tratamento	Poda de árvores (peso seco, kg)	Lodo de esgoto (peso seco, kg)	Cal (kg)	Inóculo (mL)
A	3,1	2,3	-	-
B	3,1	2,3	2,2	-
C	3,1	2,3	2,2	50

A figura 2 (a, b e c) ilustra a compostagem realizada com poda urbana e lodo de esgoto (tratamento A em laboratório) no início do experimento (zero hora), com 30 e 60 dias, respectivamente. Apesar dos resíduos da poda de árvores terem sido triturados, no final do processo de compostagem pode-se visualizar pedaços de madeira da poda, sem se decomporem de dimensões em torno de 5 cm após 90 dias de compostagem.

A coloração dos resíduos variou durante o processo. No início do experimento, a cor apresentava-se amarronzada; após 30 dias de degradação, escureceu cuja intensidade aumentou proporcionalmente com o tempo de experimento, ficando o produto final (húmus) de cor preta. O volume da massa dos resíduos orgânicos compostados diminuiu gradativamente com o tempo no decorrer do processo (figura 2).

Nos tratamentos B e C da compostagem em laboratório, foi adicionado cal, cujo composto químico de cor branca alterou a coloração da massa em compostagem (figura 1).



Figura 2 Compostagem de poda urbana e lodo de esgoto na proporção 1:1 no tratamento A em laboratório: (a) no início do experimento; (b) com 30 dias e (c) com 60 dias

O inóculo utilizado no tratamento C da compostagem em laboratório foi obtido pela bioestimulação dos micro-organismos autóctones do lodo de esgoto, apresentando 2×10^{13} UFC/mL de bactérias heterotróficas, 10^4 UFC/mL de leveduras e 2×10^7 UFC/mL de fungos filamentosos após 48 h de incubação sob agitação orbital. Esse inóculo utilizado na compostagem visou acelerar o processo de biodegradação dos resíduos, aumentando o conteúdo microbiológico por adição de micro-organismos existentes no lodo de esgoto, previamente estimulados na presença de nutrientes sob condições físico-químicas específicas.

A adição de consórcio microbiano bioestimulado visou acelerar o processo de biodegradação porque lodo de esgoto contem metais pesados, inibidores de micro-organismos (PROSAB, 1996).

Temperatura e umidade do ambiente

A compostagem é um processo em que a temperatura é um dos parâmetros de controle por influenciar as atividades metabólicas dos micro-organismos

responsáveis pela degradação dos resíduos. A média da temperatura do ambiente onde foi realizada a compostagem em laboratório foi em torno de 30 °C. Em alguns dias, os valores de temperatura foram menores (25 °C), considerando as condições climáticas do período de maio a julho em Recife, com chuvas ocasionais.

Durante o experimento, a umidade do ar média foi 95 % apesar de valores de umidade maiores do que 100 % terem sido determinados (Figura 3). Os valores de temperatura e de umidade determinados nesse trabalho foram típicos da região nordeste do Brasil pela localização geográfica, próxima ao equador. Nessa região o clima é tropical quente e semi-úmido que apresenta calor intenso e alta umidade relativa do ar.

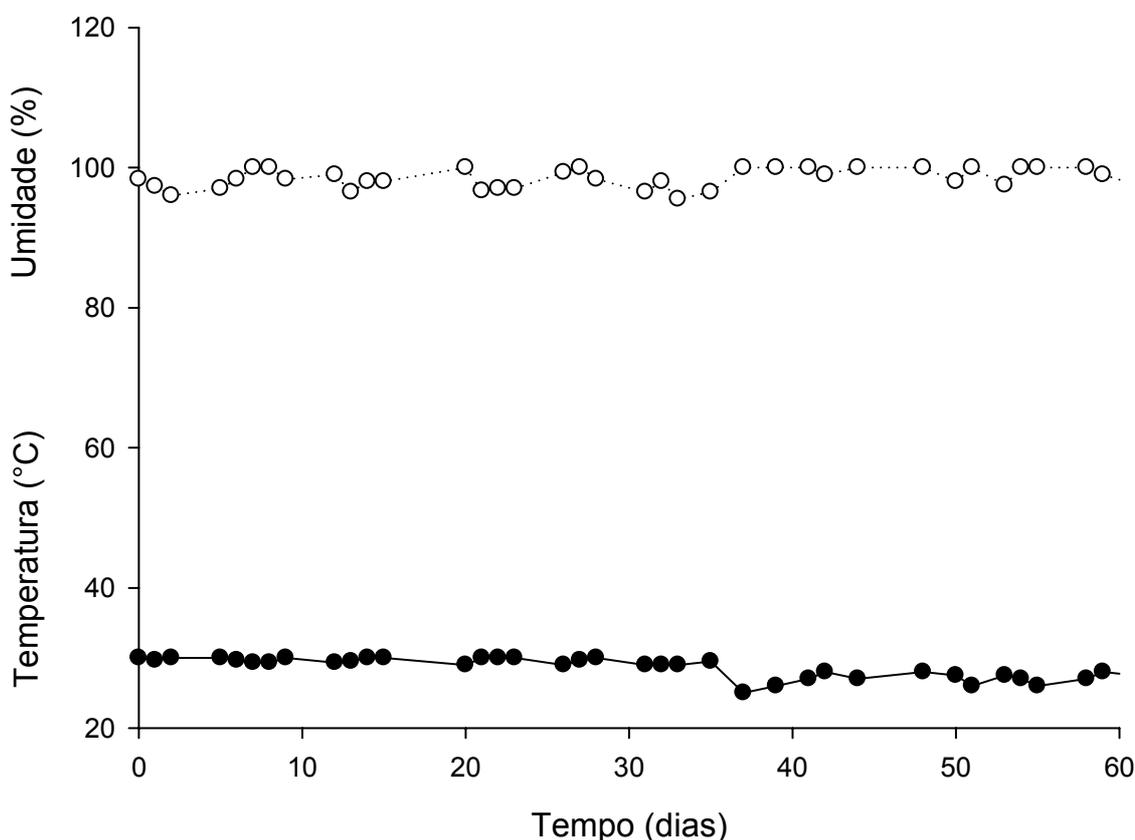


Figura 3 Valores médios de temperatura e umidade do ambiente durante a compostagem em laboratório

Temperatura da compostagem

A Figura 4 demonstra o perfil da temperatura monitorada no experimento da compostagem de lodo de esgoto e resíduo de poda urbano sob tratamento A. Foi

constatado que a temperatura variou de 30 – 31 °C nos primeiros dias, atingindo 25 – 27 °C com 60 dias do processo nos três pontos investigados (topo, centro e base da pilha). Não ocorreu a fase termófila, típica da compostagem (PEREIRA-NETO, 2010).

Considerando que o húmus com 60 dias de compostagem apresentava partículas de poda de árvores em torno de 5 cm, o processo foi acompanhado por mais trinta dias cuja temperatura permaneceu estável.

Segundo Kiehl (1985), quando a massa em decomposição está distribuída em pequeno volume, o calor liberado durante o metabolismo microbiano se dissipa e a temperatura não se eleva. Na fase termófila da compostagem, o consumo de oxigênio pelos micro-organismos é máximo, ocorrendo no processo de respiração exógena, isto é, com liberação de calor.

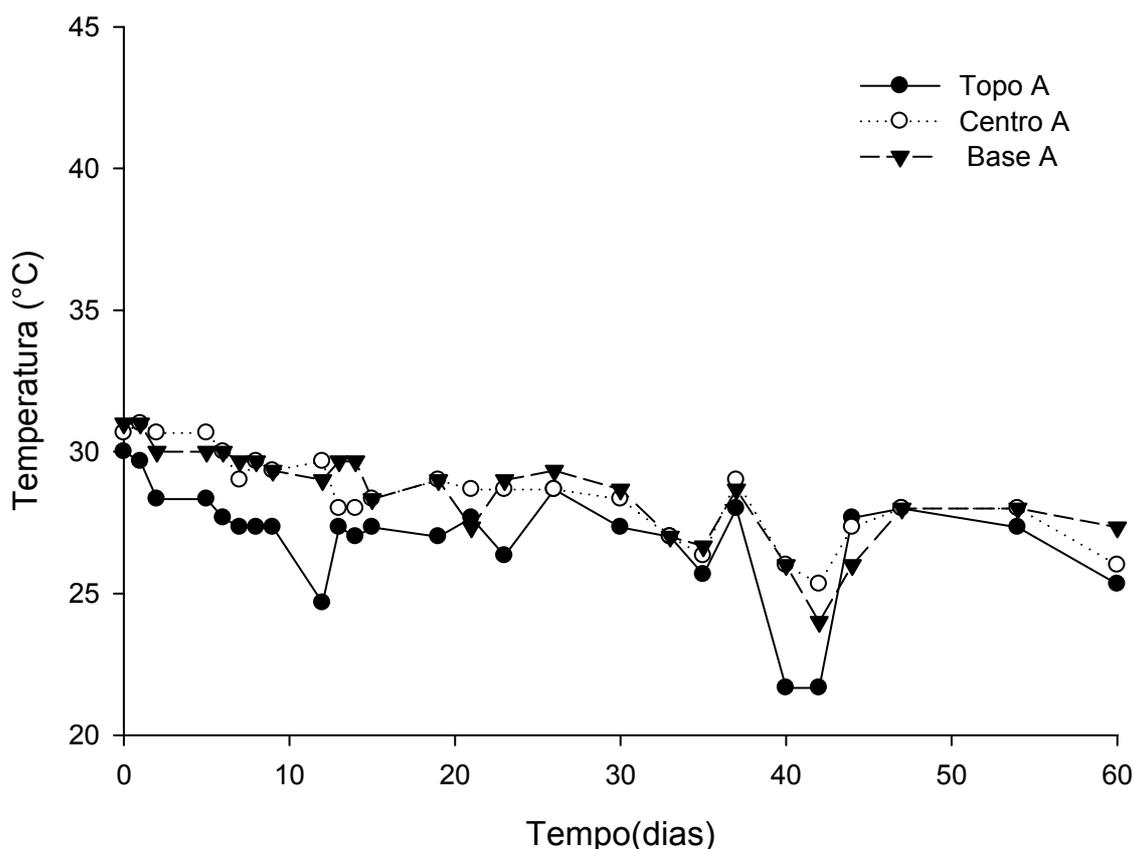


Figura 4 Temperatura média durante a compostagem no tratamento A de resíduos de poda de árvores e lodo de esgoto no topo, centro e base

A figura 5 demonstra o perfil da temperatura no topo, centro e base das pilhas da compostagem no tratamento B. As temperaturas do centro e da base

apresentaram uma pequena elevação nos primeiros dias na faixa de 38 – 39 °C em relação à condição A, que foi se estabilizando com o decorrer do processo até atingir a faixa de 26 °C (60 dias). Apesar da elevação da temperatura nos dois primeiros dias de compostagem, a fase termófila do processo de compostagem não foi caracterizada (PEREIRA-NETO, 2010; KIEHL, 1985).

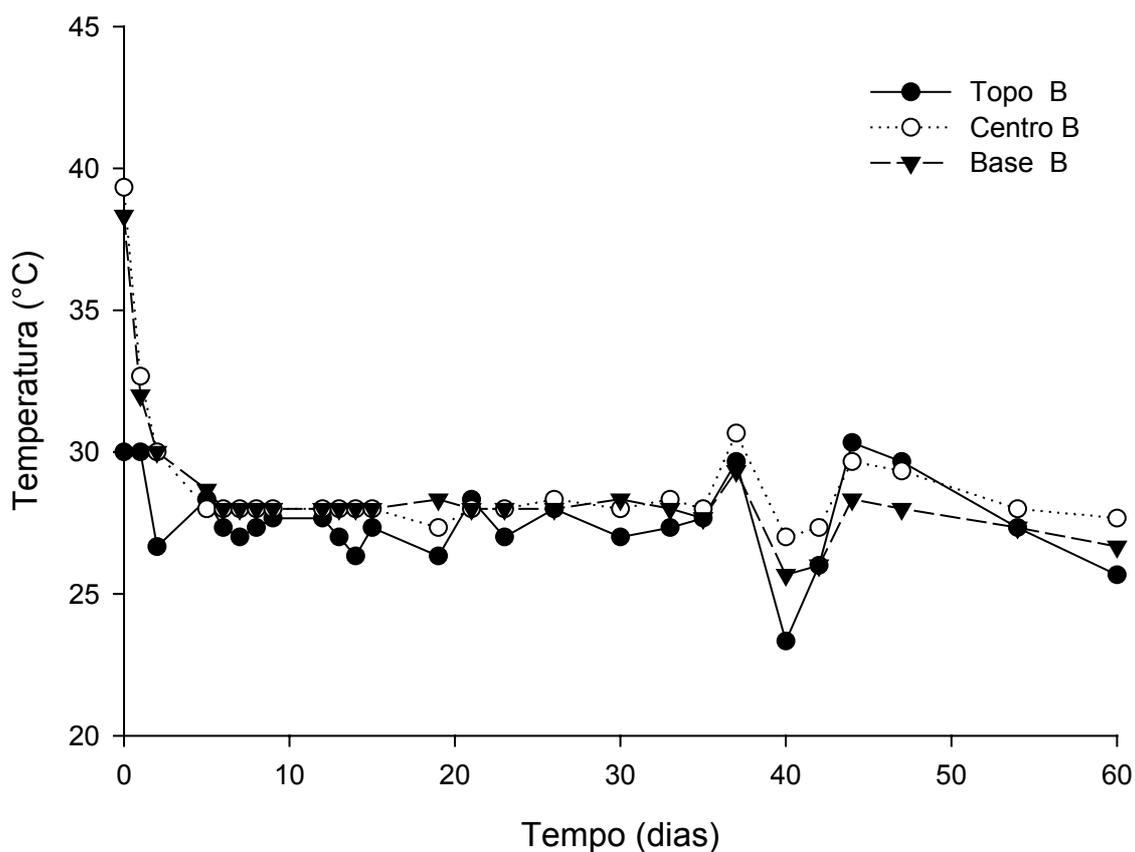


Figura 5 Temperatura média durante a compostagem no tratamento B de resíduos de poda de árvores e lodo de esgoto no topo, centro e base

A figura 6 demonstra o perfil da temperatura no topo, baricentro e base das pilhas da compostagem sob a condição C cujo comportamento foi semelhante à condição B. Logo, a presença do inóculo não influenciou no aumento da temperatura típica de compostagem de resíduos orgânicos. No primeiro dia de compostagem, a temperatura atingiu 40 °C cujo valor diminuiu com 24 h de compostagem, atingindo em torno de 32 - 30 °C. A presença de cal favoreceu o aumento de temperatura

considerando que esse composto libera energia por reação química, na presença da água.

O pico máximo típico de temperatura nas pilhas de compostagem não foi atingido, assim sendo, as fases do processo de degradação dos resíduos não evoluíram e a compostagem dos resíduos ocorreu lentamente. Dentre os parâmetros utilizados no controle do processo de compostagem, a temperatura é um fator determinante e para muitos autores um parâmetro crítico, pois influi não só nas reações metabólicas como no conteúdo da população microbiana (ESPOSITO, AZEVEDO, 2004).

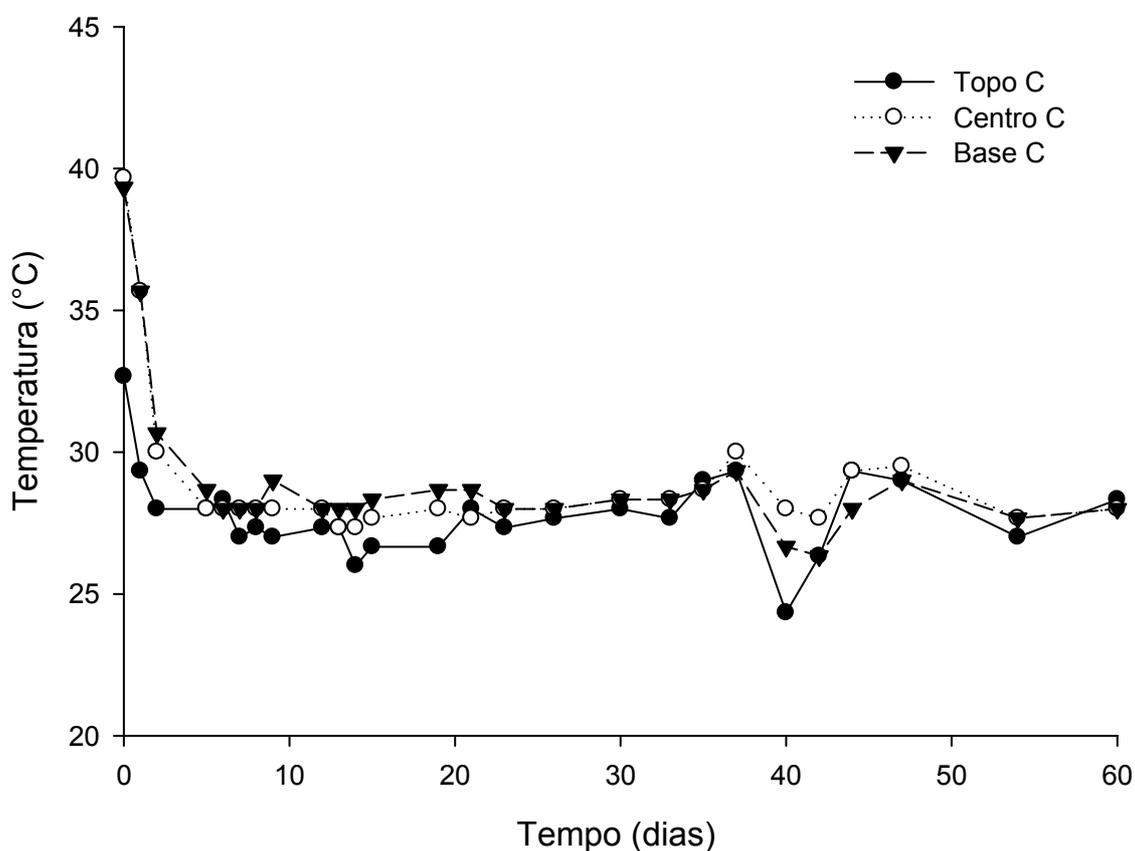


Figura 6 Temperatura média durante a compostagem no tratamento C de resíduos de poda de árvores e lodo de esgoto no topo, centro e base

Os experimentos de compostagem realizados em laboratório não favoreceram a fase termofílica, ressaltando os tamanhos das partículas de poda de árvore em torno de 10 cm, além do volume da massa compostada (pilha de tamanho pequeno), utilizada no experimento. Apesar da poda de árvores ter sido submetida a uma

forrageira, seguido de trituração para que o tamanho dessas partículas fossem menores; não foi atingido o tamanho médio de 5 cm que favorece o aumento de temperatura pela maior dispersão da massa, e conseqüentemente, maior capacidade de aeração e menor tempo de compostagem. Na formação das pilhas de compostagem, todos os gravetos do resíduo de poda de árvores maiores do que 10 cm de tamanho foram excluídos. Considerando que a temperatura não atingiu a fase termofílica desejada, o tamanho médio das partículas desse resíduo no início da compostagem deveria ter sido menor do que 10 cm (KIEHL, 1985; PEREIRA-NETO, 2010).

Ressalta-se que as triplicatas de cada tratamento foram reunidas após 60 dias de compostagem, acondicionadas em sacos de polietileno e mantidas no mesmo ambiente (laboratório). O produto final apresentou características humificadas, de forma visual e macroscópica com 90 dias de compostagem.

A temperatura da compostagem deve ser controlada e atingir valores termofílicos durante os primeiros dias (KIEHL, 1985; PEREIRA-NETO, 2010). Porém a maioria dos autores diverge quanto à temperatura ótima necessária para que aconteça a higienização do produto, de 45 a 65 °C (PEREIRA-NETO, 2010), entre 50 a 70 °C (KIEHL, 1985) e acima de 55 °C (BIDONE, 2001).

Umidade

A Figura 7 demonstra o perfil da umidade dos três tratamentos de compostagem de resíduos de poda de árvores e lodo de esgoto realizados em laboratório. As maiores umidades das pilhas de compostagem foram determinadas na ausência de cal (tratamento A), atingindo o valor médio de 65 %. A compostagem que foi submetida à calagem (tratamentos B e C), apresentou valores menores de umidade (47 a 60 %). Esses resultados estão de acordo com a literatura que especifica valores de 55 % de umidade para compostagem de resíduos sólidos (BIDONE, 2001; KIEHL, 1985; PEREIRA-NETO, 2010).

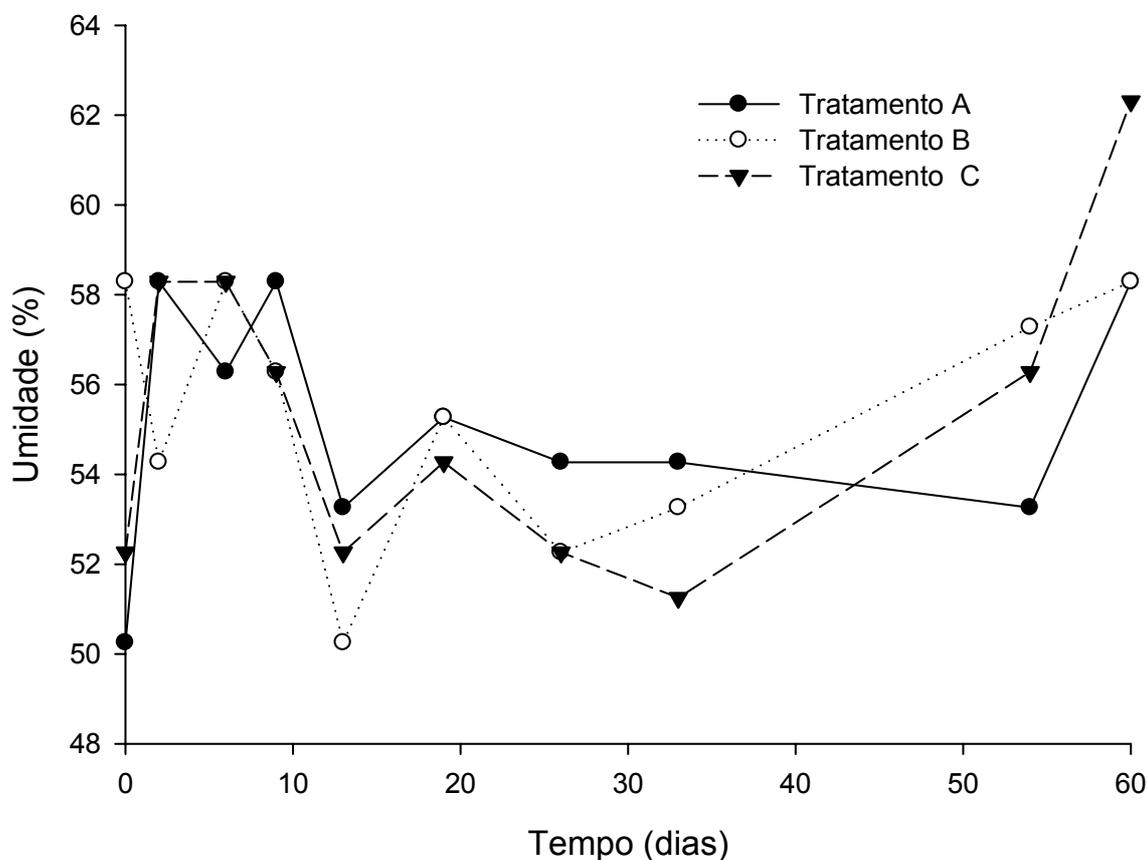


Figura 7 Umidade média das pilhas de compostagem nos três tratamentos em laboratório

pH

A Figura 8 apresenta os valores de pH determinados durante os tratamentos de compostagem realizados em laboratório. Nos primeiros vinte e cinco dias, o pH ficou em torno da neutralidade pH 7,0 para em seguida aumentar, atingindo pH maior do que 8,0 no final do processo (tratamento A). A não formação de ácidos orgânicos no início do processo manteve o pH elevado e conseqüentemente, diminuiu a velocidade de biodegradação por ação dos fungos filamentosos cujo pH ótimo é ácido (ESPOSITO, AZEVEDO, 2004). Logo, a composição dos resíduos no tratamento da compostagem influencia a evolução do processo.

Nos tratamentos B e C, submetidos à calagem, esse parâmetro físico-químico atingiu no início, valores aproximadamente pH 13 cujo valor ocasionou condições básicas no processo. Houve uma diminuição gradativa do pH a partir do 26º dia de compostagem cujo valor foi em torno de pH 9,7 depois de 45 dias de biodegradação

até o fim do experimento. A presença de cal favorece a transformação de parte do nitrogênio orgânico em amoniacal; essa fonte de nitrogênio é liberado na atmosfera e tende a abaixar o pH (KIEHL, 1985).

Medeiros et al. (2009) compostaram cascas de frutas e verduras, sobras de comida (69 %) e folhas secas (31 %) como atividade de educação ambiental, desenvolvidas em escola. O processo foi revirado manualmente duas vezes por semana. Inicialmente, foi determinado pH 5,8 o qual aumentou durante o processo, atingindo pH 8,2 no composto estabilizado. A relação C:N diminuiu de 28,5:1 para 14,3:1. Esses resíduos utilizados apresentaram nas suas composições químicas, valores baixos de N, P, K e Na e o processo atingiu a fase final com 90 dias.

Moura et al. (2009) realizaram compostagem de poda de árvores e sobras de alimentos de restaurante. Inicialmente, o pH manteve-se aproximadamente constante; em seguida, apresentou um pequeno abaixamento e depois a elevação desse valor com indicação do início da fase de biodegradação ativa. Os autores determinaram alterações na temperatura que caracterizaram a evolução do processo durante seis meses.

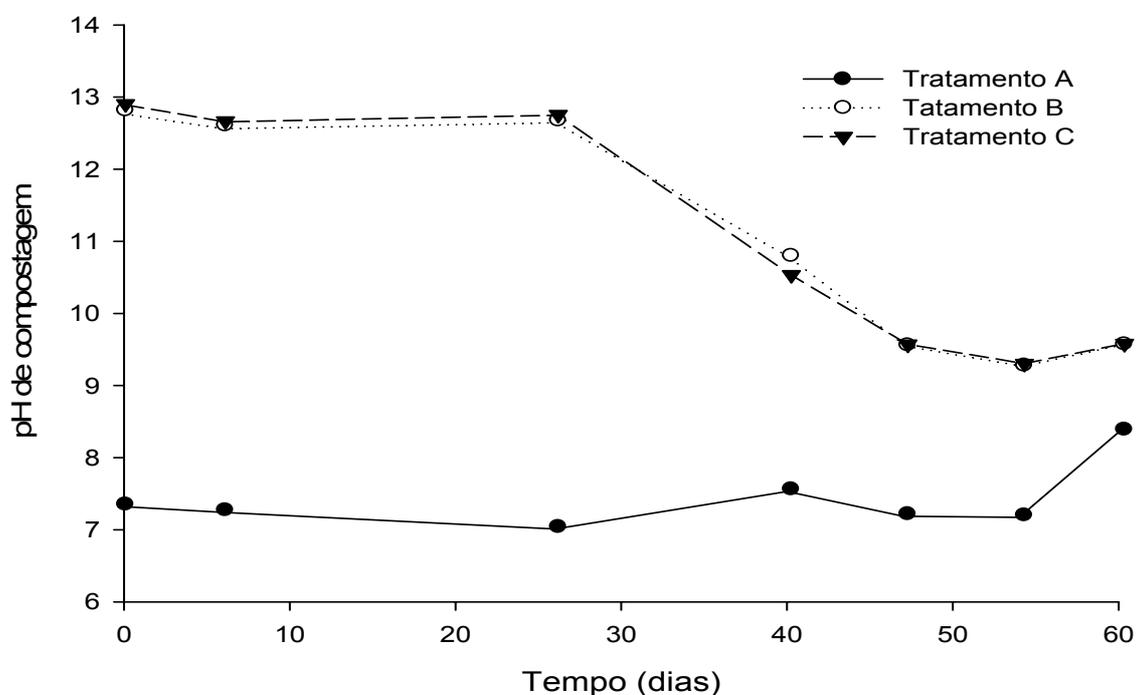


Figura 8 Valores médios de pH das pilhas de compostagem nos tratamentos em laboratório

Controle microbiológico

As Tabelas 4, 5 e 6 apresentam as composições microbiológicas dos três tratamentos de compostagem investigados em laboratório, A, B e C, respectivamente.

Analisando a compostagem de poda urbana e lodo de esgoto do tratamento A, determinou-se no início do experimento, um número de coliformes na ordem de grandeza de 10^9 NMP/kg cujo valor diminuiu gradativamente, atingindo $10^5 - 10^7$ NMP/kg com 60 dias de compostagem (Tabela 4).

As bactérias heterotróficas atingiram o valor máximo de 3×10^{12} UFC/kg cujo valor diminuiu à medida que a massa de compostagem foi degradada (tratamento A). As contagens de fungos filamentosos e de leveduras atingiram o máximo com 7 dias de compostagem (3×10^9 UFC/kg para os fungos filamentosos e 1×10^8 UFC/kg para as leveduras), cujos valores diminuíram gradativamente durante a compostagem, mas no final do processo aumentaram, atingindo $10^6 - 10^7$ UFC/kg.

Na compostagem de poda urbana e lodo de esgoto na presença de cal (tratamento B), ocorreu a sanitização da massa logo nos primeiros dias, confirmada pela ausência de coliformes totais e termotolerantes (Tabela 5). A presença da cal diminuiu a quantidade de bactérias cuja redução correspondeu a cerca de cem vezes menor. Os valores dos fungos filamentosos determinados atingiram valores menores do que 10^3 UFC/kg, considerando o pH em torno de 12 devido à presença da cal que desfavoreceu o crescimento desses micro-organismos. A maioria dos fungos tem pH ótimo em meio ácido (ESPOSITO, AZEVEDO, 2004). Ressalta-se que em várias análises, não foram determinadas leveduras na massa de compostagem enquanto, no final do processo, foram determinados 10^5 UFC/kg para os fungos filamentosos com 60 dias de compostagem, apesar do pH está em torno de 9 (Figura 9).

Analisando os resultados de compostagem de poda urbana e lodo de esgoto na presença de cal e inóculo, ficou confirmada a sanitização da massa, com relação aos coliformes totais e termotolerantes que não foram determinados nem no tempo zero nem com 7 dias de compostagem (Tabela 6). Na presença do inóculo, houve um incremento do conteúdo total de bactérias, atingindo 10^{12} UFC/kg cujo valor diminuiu com o tempo de compostagem até 10^8 UFC/kg. A adição de consórcio microbiano bioestimulado aos resíduos tende a favorecer a biodegradação e diminuir

o tempo de compostagem. As contagens dos fungos filamentosos e das leveduras diminuíram nas compostagens do tratamento C devido à presença de cal que favoreceu o aumento do pH (Figura 9). A Tabela 6 mostra a diferença de grandeza entre os fungos no tempo zero e com 7 dias de degradação sob pH alcalino.

Tabela 4 Composição microbiológica média da compostagem de poda urbana e lodo de esgoto (tratamento A) em laboratório

Parâmetros	Tempo (dias)					
	0	7	14	26	40	60
Coliformes totais (NMP/kg)	$> 2 \times 10^9$	ND	$> 2 \times 10^9$	5×10^8	4×10^7	5×10^7
Coliformes termotolerantes (NMP/kg)	$> 2 \times 10^9$	ND	$> 2 \times 10^9$	2×10^8	4×10^7	5×10^5
Bactérias heterotróficas (UFC/kg)	3×10^{12}	4×10^{10}	5×10^9	8×10^9	5×10^9	6×10^9
Leveduras (UFC/kg)	1×10^7	1×10^8	1×10^7	1×10^5	1×10^6	1×10^6
Fungos filamentosos (UFC/kg)	4×10^8	3×10^9	3×10^7	1×10^4	1×10^5	1×10^7

ND – determinação não realizada

Tabela 5 Composição microbiológica média da compostagem de poda urbana e lodo de esgoto na presença de cal (tratamento B) em laboratório

Parâmetros	Tempo (dias)					
	0	7	14	26	40	60
Coliformes totais (NMP/kg)	Ausência	Ausência	ND	ND	ND	ND
Coliformes termotolerantes (NMP/kg)	Ausência	Ausência	ND	ND	ND	ND
Bactérias heterotróficas (UFC/kg)	2×10^{10}	3×10^8	2×10^8	5×10^6	1×10^7	2×10^8
Leveduras (UFC/kg)	5×10^8	Ausência	Ausência	Ausência	Ausência	Ausência
Fungos filamentosos (UFC/kg)	6×10^8	4×10^3	$< 10^3$	1×10^3	1×10^4	2×10^5

ND – determinação não realizada

Analisando os resultados de compostagem de poda urbana e lodo de esgoto na presença de cal e inóculo, ficou confirmada a sanitização da massa, com relação aos coliformes totais e termotolerantes que não foram determinados nem no tempo zero nem com 7 dias de compostagem (Tabela 6). Na presença do inóculo, houve um incremento do conteúdo total de bactérias, atingindo 10^{12} UFC/kg cujo valor diminuiu com o tempo de compostagem até 10^8 UFC/kg. A adição de consórcio

microbiano bioestimulado aos resíduos tende a favorecer a biodegradação e diminuir o tempo de compostagem. As contagens dos fungos filamentosos e das leveduras diminuíram nas compostagens do tratamento C devido à presença de cal que favoreceu o aumento do pH (Figura 9). A Tabela 6 mostra a diferença de grandeza entre os fungos no tempo zero e com 7 dias de degradação sob pH alcalino.

Tabela 6 Composição microbiológica média da compostagem de poda urbana e lodo de esgoto na presença de cal e inóculo (tratamento C) em laboratório

Parâmetros	Tempo (dias)					
	0	7	14	26	40	60
Coliformes totais (NMP/kg)	Ausência	Ausência	ND	ND	ND	ND
Coliformes termotolerantes (NMP/kg)	Ausência	Ausência	ND	ND	ND	ND
Bactérias heterotróficas (UFC/kg)	4×10^{12}	5×10^8	2×10^8	3×10^8	1×10^7	2×10^8
Leveduras (UFC/kg)	3×10^8	1×10^3	3×10^3	4×10^4	5×10^4	3×10^5
Fungos filamentosos (UFC/kg)	3×10^8	3×10^4	Ausência	4×10^3	6×10^4	6×10^5

ND – determinação não realizada

Atividades enzimáticas

Nos experimentos de compostagem com apenas resíduos de poda de árvores e lodo de esgoto (tratamento A), as atividades das celulases, proteases e fenoloxidasas foram determinadas durante todo o processo (60 dias) enquanto as tanases, entre 14 e 60 dias (Tabela 7).

Os percentuais de atividades enzimáticas positivos foram menores na compostagem na presença de cal (tratamentos B e C). Logo as quatro enzimas investigadas foram inibidas possivelmente pelo aumento de pH favorecido pela adição de cal. Por outro lado, o inóculo adicionado na compostagem (tratamento C) induziu algumas atividades enzimáticas.

As atividades das celulases, proteases, fenoloxidasas e tanases aumentaram em intensidade com o tempo de compostagem, favorecendo a fase ativa da compostagem quando ocorre a taxa máxima de degradação de resíduos por ação microbiana. No final do processo, as atividades enzimáticas foram menores, correspondendo à fase de estabilização do composto (húmus) quando há esgotamento de nutrientes (KIEHL, 1985).

Por conseguinte, as enzimas hidrolíticas e oxidativas foram responsáveis pela compostagem dos resíduos de poda de árvores e lodo de esgoto.

Santos et al. (2006) confirmaram a presença de celulases produzidas por culturas isoladas de bactérias contidas em amostras de compostagem de aparas de grama e resíduos de poda de sabiá. Os autores realizaram teste qualitativo por difusão em Agar na presença de carboximetilcelulose, como substrato e a atividade foi revelada por solução do corante Vermelho do Congo.

Tabela 7 Percentuais de atividades enzimáticas positivas durante a compostagem de poda urbana e lodo de esgoto em laboratório

Tratamento de compostagem	Testes enzimáticos positivos (%)			
	Celulases	Proteases	Fenoloxidasas	Tanases
A	86	95	76	33
B	48	57	38	38
C	62	62	43	57

2.4.3 Compostagem de Poda de Árvores, Lodo de Esgoto e Esterco em Campo

O índice pluviométrico mensal variou em torno de 15 a 45 mm durante o período de setembro a dezembro de 2010 em Carpina onde foi realizada a compostagem em campo (IPA, 2010). Apesar de ser no período de verão, ocorreram precipitações que foram escassas e bem distribuídas durante todo o período não prejudicando o processo de compostagem pela diluição dos nutrientes e formação de chorume.

Nos experimentos de compostagem realizados em campo a céu aberto, as pilhas foram construídas diretamente no solo. As quantidades de cada resíduo utilizadas na composição das pilhas estão ilustradas na Tabela 8. A concentração da calagem foi apenas de 25 % com relação à massa de lodo de esgoto e esterco cuja concentração foi menor que a utilizada nos experimentos em laboratório.

O esterco bovino utilizado nos experimentos em campo apresentou 32 % de carbono e 2,5 % de nitrogênio (Tabela 2) e as pilhas de compostagem foram construídas com a relação C:N em torno de 20:1 (tratamentos I e II) e de 24:1 (tratamentos III e IV). Essas proporções foram utilizadas considerando o

experimento de laboratório em que a relação C:N foi de 22,5:1 apesar da literatura, recomendar valores de C:N na faixa de 30:1 a 40:1 para realização de compostagem de resíduos orgânicos (PEREIRA-NETO, 2010).

Tabela 8 Quantidade em peso seco (kg) dos componentes da compostagem em campo

Componentes	Tratamentos			
	I	II	III	IV
Poda urbana	24	24	32	32
Lodo de esgoto	21	21	21	21
Esterco bovino	13	13	13	13
Cal	15	-	15	-

A Figura 9 ilustra as pilhas de compostagem de poda de árvores e lodo de esgoto na presença de esterco, realizada em campo com quatros diferentes tratamentos em duplicatas, totalizando oito pilhas para investigar a sanitização por ação da cal a 25 % p/p em relação à massa de lodo de esgoto (tratamentos I e III), além de utilizar quantidades diferentes de poda de árvores (Tabela 8).



Figura 9 Compostagem de poda de árvores e lodo de esgoto em campo

Temperatura

A Figura 10 apresenta a temperatura ambiente e umidade do ar dos experimentos de compostagem realizados em campo, embaixo de árvores, a céu aberto cujas pilhas foram construídas diretamente no solo. Durante o processo de

degradação biológica, a temperatura média do ambiente ficou em torno de 32 °C e a umidade do ar em média 90 %.

A Figura 11 demonstra o perfil da temperatura no topo, baricentro e base das pilhas de compostagem em campo do tratamento I. Observou-se que durante os primeiros dias de compostagem ocorreram temperaturas em torno de 60 °C no baricentro e na base das pilhas. Após uma semana, a temperatura abaixou até 40 °C mas, com 15 dias do processo, após o primeiro revolvimento, a temperatura subiu no baricentro e topo, atingindo valores próximos de 50 °C cujo valor diminuiu gradativamente até o final do processo (30 °C).

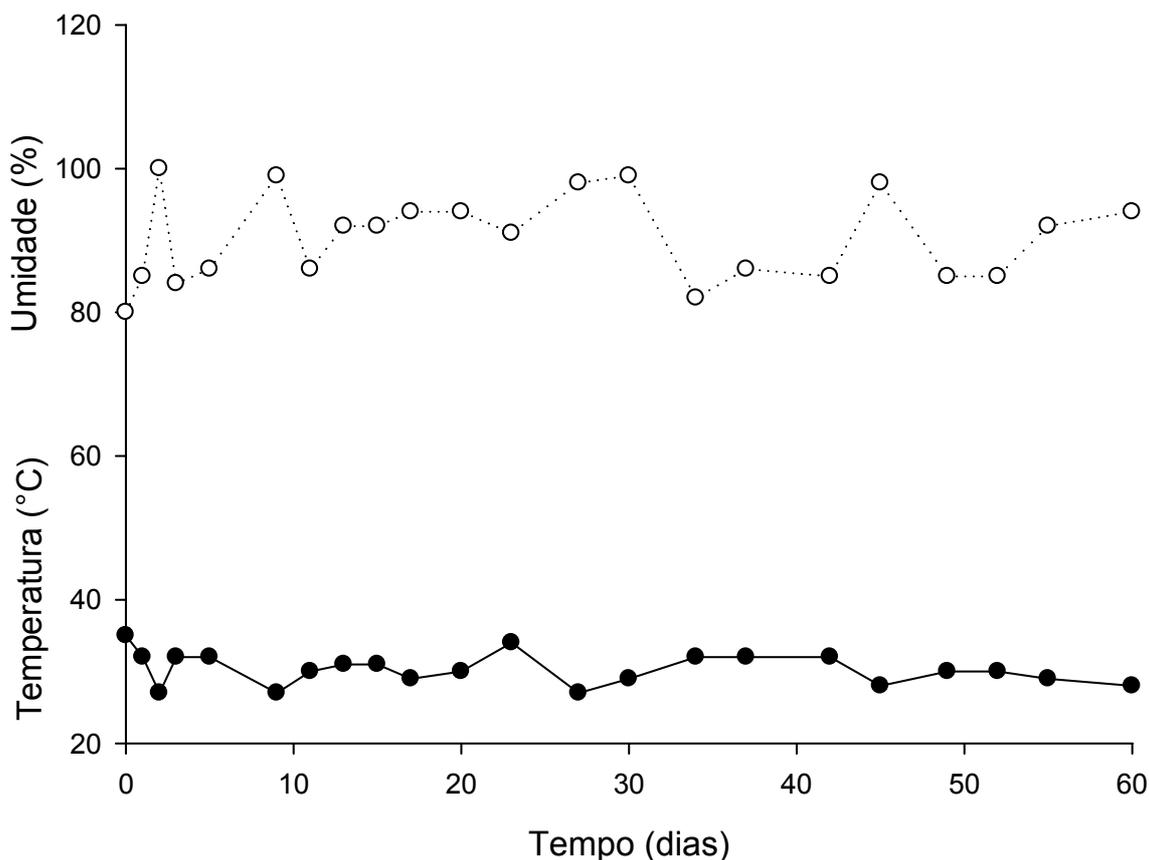


Figura 10 Valores médios de temperatura e umidade do ambiente durante a compostagem em campo

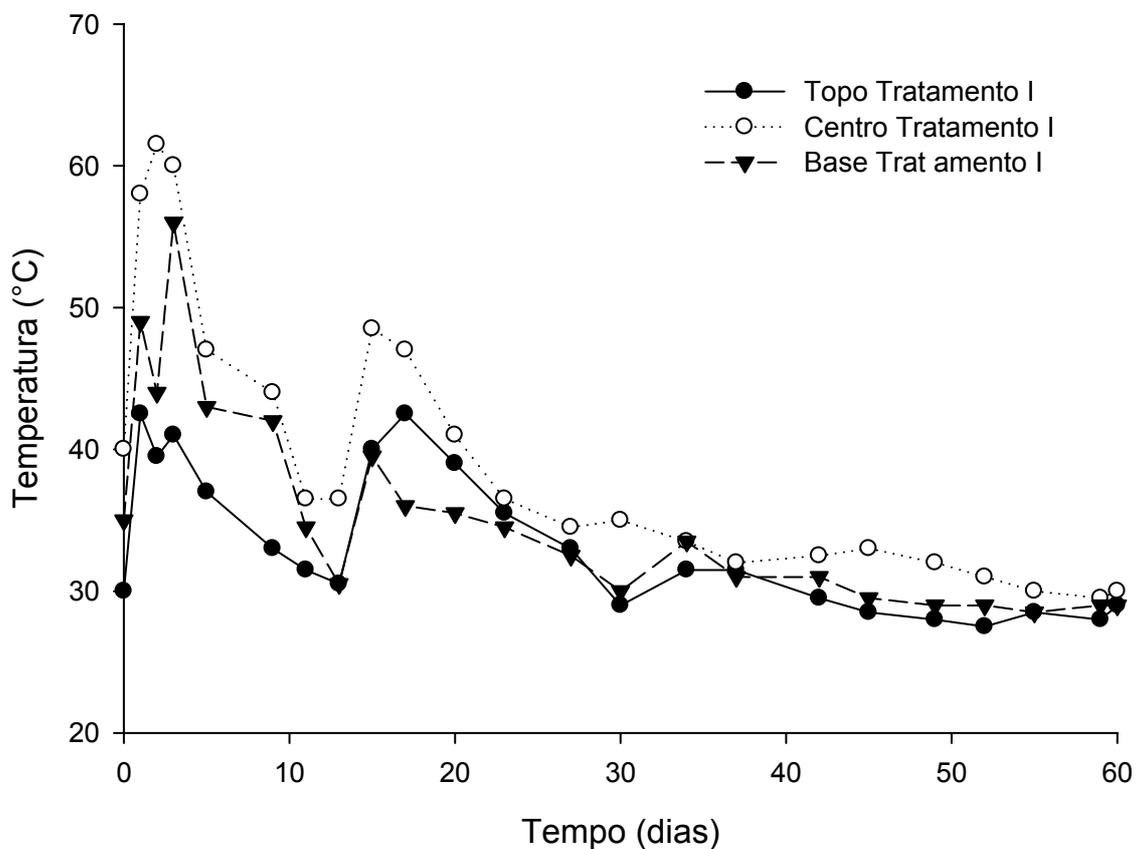


Figura 11 Temperatura média das pilhas de compostagem do tratamento I em campo

A Figura 12 ilustra o perfil da temperatura no topo, baricentro e base nas pilhas de compostagem do tratamento II em campo em cuja compostagem foi determinada a elevação da temperatura nos primeiros dias do processo, atingindo valores próximos a 60 °C no baricentro durante 5 dias; em seguida decaiu atingindo valores acima de 40 °C, após o revolvimento com 15 dias.

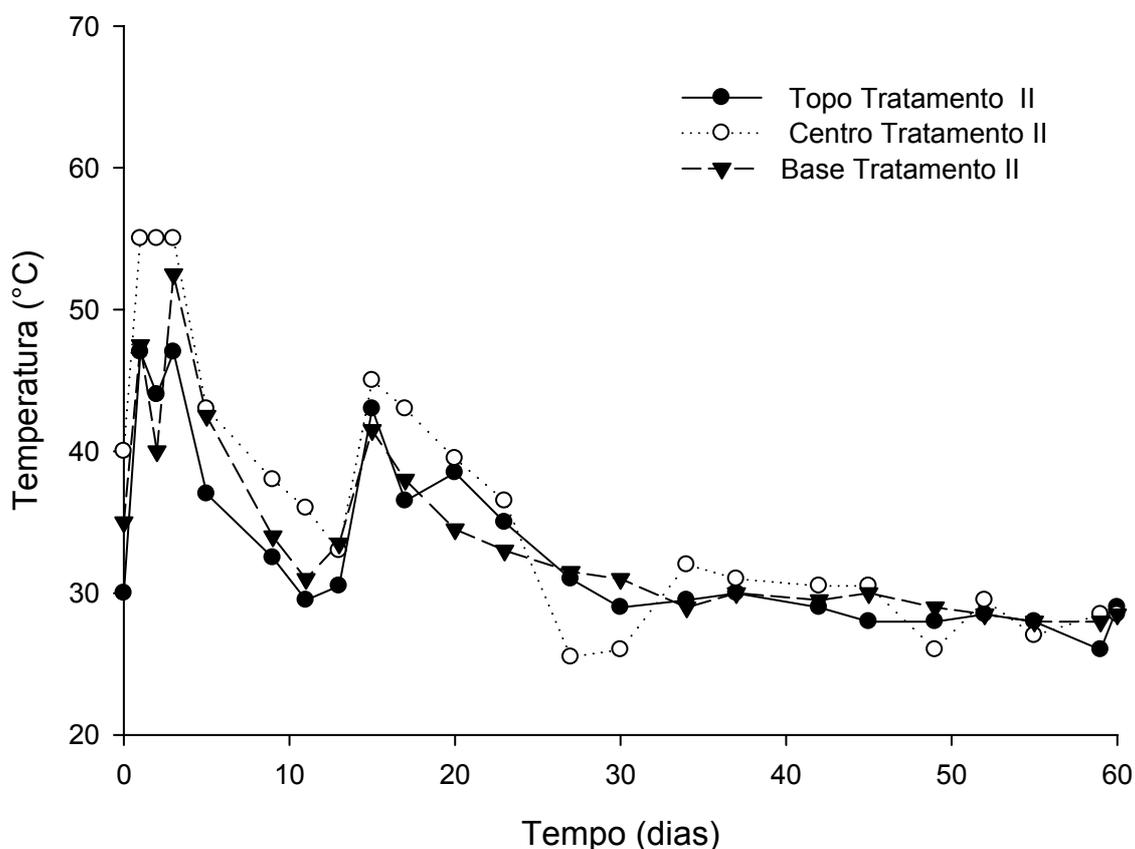


Figura 12 Temperatura média das pilhas de compostagem do tratamento II em campo

As Figuras 13 e 14 apresentam os perfis da temperatura no topo, baricentro e base das pilhas de compostagem nos tratamentos III e IV, respectivamente, em campo. A temperatura atingiu valores em torno de 55 °C nos primeiros quatro dias cujo valor em seguida, foi decrescendo até atingir cerca de 30 °C, elevando-se em torno de 45 °C depois do revolvimento das pilhas de compostagem, com 15 dias.

A temperatura média da compostagem em campo apresentou elevação desse parâmetro em todos os tratamentos (I, II, III, IV), atingindo a variação de 40 - 60 °C durante os primeiros dias de compostagem, diminuindo gradativamente até 30 °C com 15 dias cuja temperatura voltou a subir (40 °C) após o primeiro revolvimento, retornando a 30 °C com 30 dias de compostagem. Considerando que Pereira-Neto (2010) ressaltou a necessidade de 30 dias em fase termofílica para sanitizar a massa em compostagem, a compostagem em campo, realizada nesse trabalho, não apresentou a fase termofílica característica; logo, a sanitização da massa não procedeu.

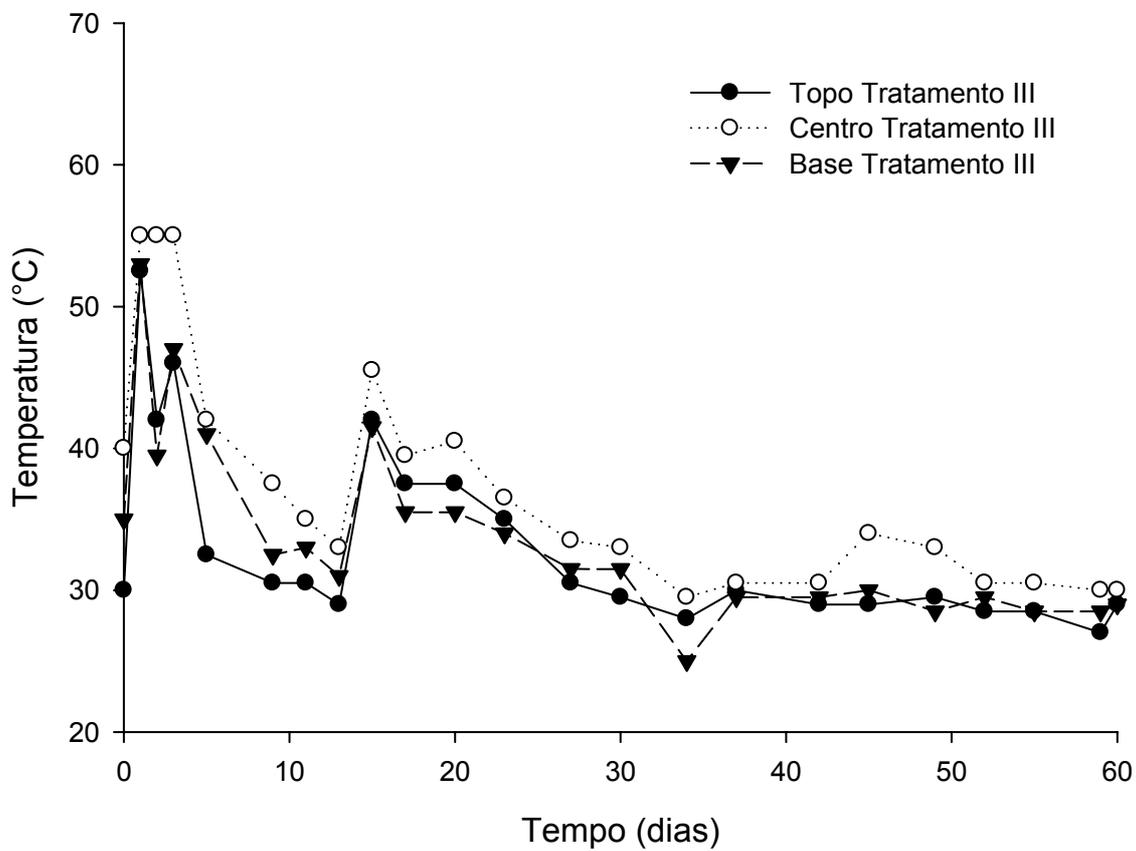


Figura 13 Temperatura média das pilhas de compostagem do tratamento III em campo

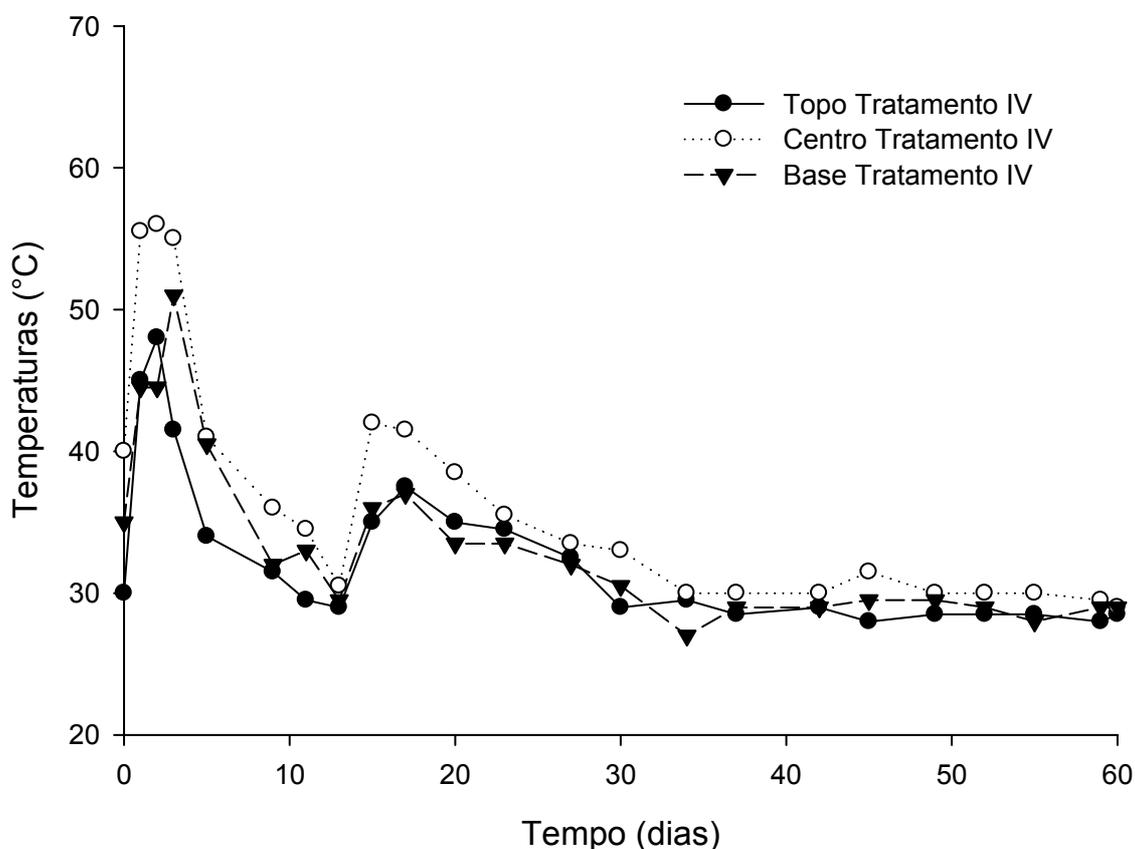


Figura 14 Temperatura média das pilhas de compostagem do tratamento IV em campo

pH

A Figura 15 ilustra os valores médios de pH nos tratamentos I, II, III e IV durante o processo de compostagem em campo, na presença de cal a 25 %, considerando o peso do lodo de esgoto. No início da compostagem (13 dias), foi determinado pH em torno de 9,0 durante todo o processo no tratamento I que continha cal. Na outra compostagem também submetida à calagem (tratamento III), foi determinado pH 8,2 no início do processo cujo valor aumentou para pH 9,0, permanecendo até o final do experimento (60 dias).

Na compostagem em campo contendo apenas poda urbana, lodo de esgoto e esterco bovino (tratamentos II e IV), foi determinado inicialmente pH em torno de 8,0, variando na faixa de pH 7,6 – 8,7 durante o processo.

Não foi evidenciada a fase acidófila no início do processo de compostagem como cita a literatura. Ressalta-se que a primeira amostra foi coletada com 13 dias de compostagem. A degradação dos resíduos de poda de árvores, lodo de esgoto e

esterco bovino pode conduzir à formação de matéria orgânica húmica, independente dos tratamentos em condição de neutralidade ou alcalino, conforme foi determinado nas amostras em compostagem neste trabalho (BIDONE, 2001).

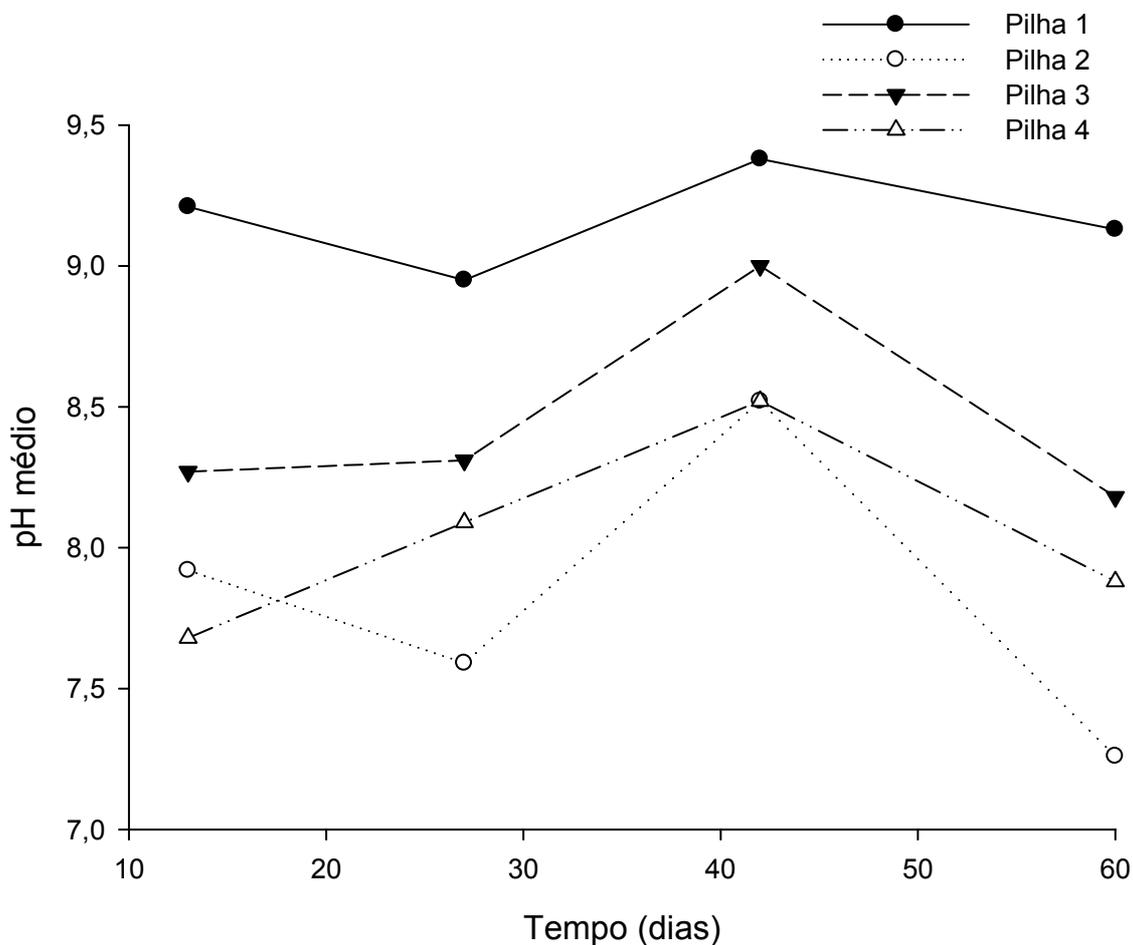


Figura 15 Valores médios de pH das pilhas de compostagem em campo

Umidade

A Figura 16 apresenta a umidade nos tratamentos I, II, III, IV, durante o processo de compostagem em campo. Os valores médios de umidade variaram entre 54 a 64 % (tratamento I), 56 a 64 % (tratamento II), 59 a 61 % (tratamento III) e 52 a 62 % (tratamento IV) durante o processo.

Segundo Pereira-Neto (2010) e Bidone (2001), a umidade durante a compostagem deve ser em torno de 55 %. Kiehl (1985) considera o valor mínimo de 40 % e o máximo de 60 % da faixa de umidade ideal para biodegradação aeróbia de resíduos sólidos.

Logo, os processos de degradação dos resíduos de poda de árvores, lodo de esgoto e esterco bovino realizados em campo apresentaram umidade conforme a literatura.

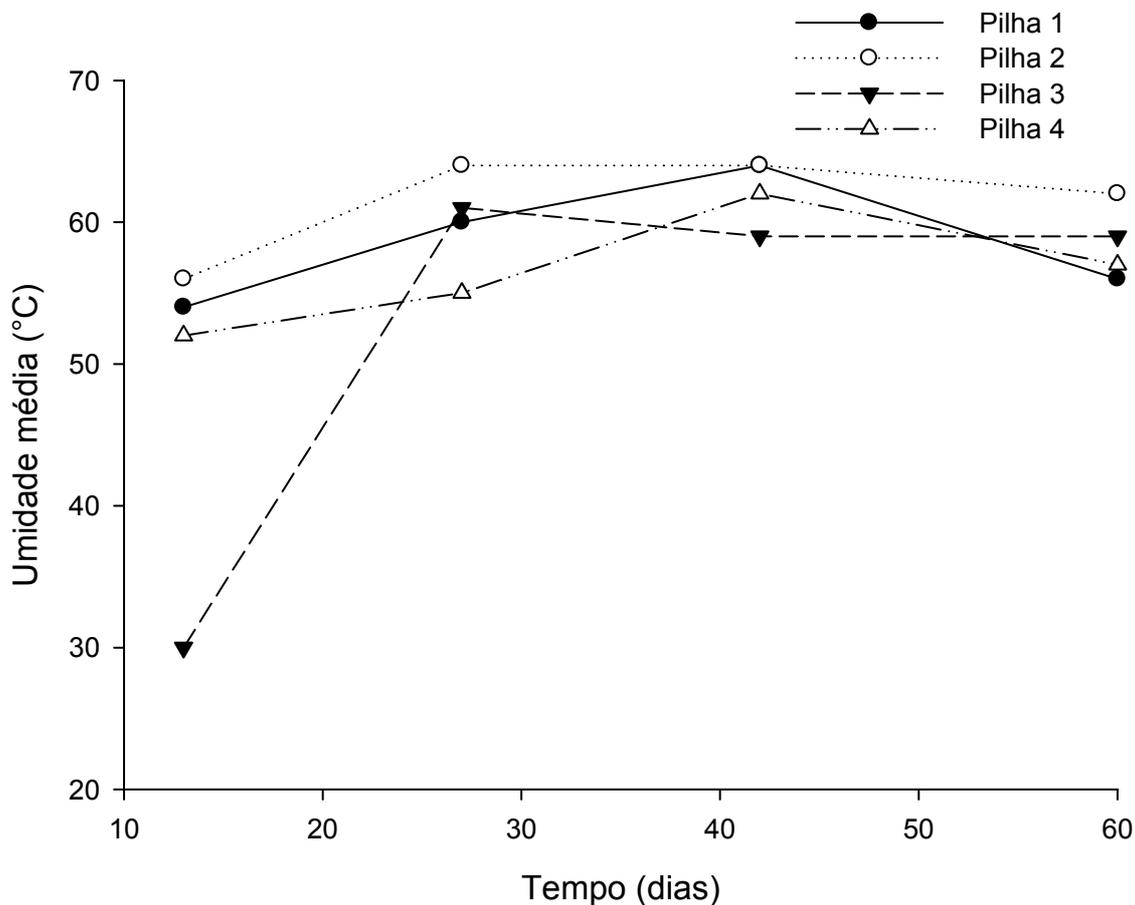


Figura 16 Umidade média das pilhas de compostagem em campo

Controle microbiológico

As Tabelas 9, 10, 11 e 12 apresentam as composições microbiológicas dos quatros tratamentos de compostagem de poda de árvores, lodo de esgoto e esterco bovino realizadas em campo.

No controle microbiológico da compostagem em campo dos resíduos, foi determinada a presença de coliformes totais e termotolerantes para valores maiores que 2×10^9 NMP/kg, independente do tratamento realizado (I, II, III ou IV), na presença ou ausência de cal.

Tabela 9 Composição microbiológica média da compostagem de poda de árvores, lodo de esgoto e esterco bovino na presença de cal, realizadas em campo (tratamento I)

Parâmetros	Tempo (dias)			
	15	30	40	60
Coliformes totais (NMP/kg)	$> 2 \times 10^9$			
Coliformes termotolerantes (NMP/kg)	$> 2 \times 10^9$			
Bactérias heterotróficas (UFC/kg)	3×10^9	1×10^9	2×10^9	7×10^9
Leveduras (UFC/kg)	4×10^5	2×10^6	1×10^7	ND
Fungos filamentosos (UFC/kg)	2×10^5	2×10^7	2×10^8	3×10^7

Tabela 10 Composição microbiológica média da compostagem de poda de árvores, lodo de esgoto e esterco bovino, realizadas em campo (tratamento II)

Parâmetros	Tempo (dias)			
	15	30	40	60
Coliformes totais (NMP/kg)	$> 2 \times 10^9$			
Coliformes termotolerantes (NMP/kg)	$> 2 \times 10^9$			
Bactérias heterotróficas (UFC/kg)	3×10^9	4×10^9	1×10^9	4×10^9
Leveduras (UFC/kg)	5×10^6	4×10^8	1×10^6	1×10^7
Fungos filamentosos (UFC/kg)	3×10^4	1×10^7	1×10^8	4×10^7

Tabela 11 Composição microbiológica média da compostagem de poda de árvores, lodo de esgoto e esterco bovino na presença de cal, realizadas em campo (tratamento III)

Parâmetros	Tempo (dias)			
	15	30	40	60
Coliformes totais (NMP/kg)	$> 2 \times 10^9$			
Coliformes termotolerantes (NMP/kg)	$> 2 \times 10^9$			
Bactérias heterotróficas (UFC/kg)	3×10^9	3×10^9	3×10^8	7×10^9
Leveduras (UFC/kg)	4×10^5	3×10^8	2×10^6	1×10^7
Fungos filamentosos (UFC/kg)	3×10^4	2×10^7	2×10^8	4×10^7

Tabela 12 Composição microbiológica média da compostagem de poda de árvores, lodo de esgoto e esterco bovino, realizadas em campo (tratamento IV)

Parâmetros	Tempo (dias)			
	15	30	40	60
Coliformes totais (NMP/kg)	$> 2 \times 10^9$			
Coliformes termotolerantes (NMP/kg)	$> 2 \times 10^9$			
Bactérias heterotróficas (UFC/kg)	5×10^8	1×10^9	2×10^8	5×10^9
Leveduras (UFC/kg)	3×10^5	5×10^6	2×10^6	2×10^6
Fungos filamentosos (UFC/kg)	4×10^5	1×10^7	3×10^8	4×10^7

As bactérias heterotróficas atingiram valores máximos de $10^8 - 10^9$ UFC/kg, durante a degradação da massa de compostagem nesses tratamentos realizados em campo. Os fungos filamentosos foram também determinados durante a compostagem, tendo os valores máximos variado entre $10^4 - 10^8$ UFC/kg, enquanto que, as maiores contagens de colônias de leveduras variaram entre $10^5 - 10^7$ UFC/kg.

Na compostagem de poda urbana, lodo de esgoto e esterco na presença de cal (tratamentos I e III), não ocorreu sanitização da massa de resíduos. Ressalta-se que a quantidade da cal utilizada foi apenas 25 % em relação ao peso do lodo de esgoto. Ficou evidenciada a necessidade de utilizar maior concentração de cal para higienizar a massa em compostagem.

Nas contagens microbiológicas dos fungos, foram determinados os menores números de colônias de leveduras e de fungos filamentosos na presença de cal devido ao valor elevado de pH; no tratamento I quando o pH atingiu valores em torno de 9,0, as ordens de grandeza das contagens dos fungos foram as menores. Ressalta-se que no tratamento III em campo, o pH atingiu o valor máximo de 8,5. Por outro lado, os valores de pH na compostagem em laboratório foram maiores, atingindo pH 12 (Figura 9) porque foi utilizado o dobro do percentual de cal nas pilhas.

Britto-Júnior et al. (2009) acompanharam compostagem de folhagens e lodo de esgoto, realizadas em pilhas de volume aproximado de $2,6 \text{ m}^3$ e diâmetro de

2,0 m, em período ensolarado (outubro a maio) com avaliação de bactérias e fungos. Foram utilizadas diferentes proporções desses resíduos orgânicos, sendo identificados os gêneros de fungos filamentosos: *Trichoderma*, *Aspergillus*, *Penicillium*, *Rhizopus* e *Helminthosporium*, independente da presença e das concentrações dos dois resíduos: lodo de esgoto e folhagem. As coletas das amostras foram realizadas com 90 dias de compostagem cuja massa apresentou no final, temperatura mesófila.

Magrini et al. (2009) analisaram a microbiota durante a compostagem de resíduos sólidos; foram determinados fungos filamentosos, bactérias e leveduras em quantidade crescente desses micro-organismos; isso é esses autores determinaram a maior quantidade de fungos filamentosos. Dentre os gêneros dos fungos filamentosos isolados na fase final de maturação, destacaram-se *Aspergillus*, *Dactylium* e *Rhizopus*.

Atividade enzimática

A Figura 17 a, b, c e d ilustra resultados positivos das atividades enzimáticas: celulases, proteases, fenoloxidasas e tanases, respectivamente, determinadas em extratos obtidos das amostragens de compostagem de poda de árvores, lodo de esgoto e esterco bovino em campo.

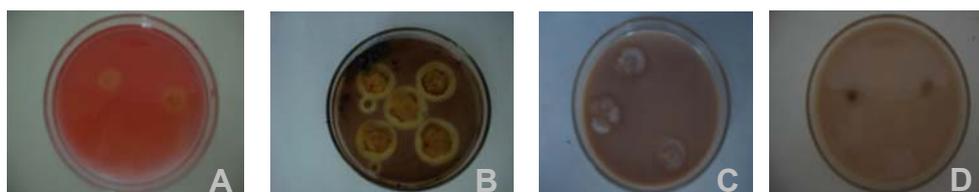


Figura 17 Atividades enzimáticas positivas em compostagem em campo:

a) celulases, b) proteases, c) fenoloxidasas e d) tanases

Nos experimentos de compostagem em campo, as atividades de proteases e celulases atingiram o percentual de 92 % das amostras analisadas. As enzimas fenoloxidasas e tanases foram determinadas em 100 % das amostras investigadas. Na fase ativa de degradação dos resíduos, entre 10 e 30 dias, foram visualizados os maiores halos de ação enzimática com coloração intensa.

Os fungos são responsáveis pela produção de grande parte das enzimas hidrolíticas e oxidativas. Um dos mais importantes ciclos de carbono na natureza é a

biodegradação de materiais lignocelulósicos, especificamente da madeira, sob condições controladas e com fungos pré-selecionados. Esse processo biotecnológico tem aplicação industrial recente, sendo denominado de biopolpação (ESPOSITA, AZEVEDO, 2004).

As enzimas necessárias na degradação de materiais lignocelulósicos, como madeira, palha e casca são produzidas pelos fungos das classes dos Ascomicetos, Deuteromicetos e Basidiomicetos. Os materiais lignocelulósicos são constituídos por celulose, poliose, lignina e sais minerais; os fungos de decomposição branca são os organismos mais presentes na biodegradação desses materiais na natureza. A velocidade de decomposição é bastante variada, dependendo da temperatura, umidade e biodiversidade fúngica. Na realidade, são vários grupos de enzimas que degradam a lignina, no entanto a atuação e a função de cada grupo no processo de oxidação ainda não foram elucidadas (ESPOSITO, AZEVEDO, 2004).

2.4.4 Caracterização do produto final

A Tabela 13 apresenta a caracterização do húmus obtido durante a compostagem de poda urbana e lodo de esgoto, realizada em laboratório e em campo. Com relação ao produto final da compostagem, foram especificadas as caracterizações físico-químicas e microbiológicas com 60 dias de degradação.

Considerando os resultados determinados do pH da compostagem em laboratório e em campo, o composto com 60 dias atingiu a humificação desejada apenas em um experimento em campo (tratamento II) na ausência de cal. Kiehl (1985) enfatizou que o composto com o pH entre os valores 6,0 e 7,6, encontra-se na fase de bioestabilização ou seja semicura; com o pH superior a 7,6, caracteriza o composto semicurado ou bioestabilizado, caminhando para cura ou humificação.

O composto obtido nos experimentos apresentou características adequadas em relação à umidade, atingindo valores na faixa de 57 a 68 %. Segundo a literatura, a umidade do produto final em torno de 55 % favorece o crescimento dos micro-organismos enquanto que para maior estabilidade durante o armazenamento do húmus é necessário que o teor de água não atinja valores elevados (PEREIRA-NETO, 2010; BIDONE, 2001).

O húmus obtido durante 60 dias de compostagem apresentou relação C:N de 12:1 a 16:1 nos experimentos em laboratório enquanto nas compostagens em campo, os valores determinados foram C:N variando de 9:1 a 13:1. Os maiores valores foram determinados na presença de poda de árvores em maior quantidade. Considerando que a faixa da relação C:N recomendada por Pereira-Neto (2010) é de 10:1 a 15:1, os processos de degradação dos resíduos de poda de árvores e lodo de esgoto nesse trabalho tendem a atingir a humificação, ideal para sua utilização como adubo.

A sanitização do húmus em compostagem no laboratório foi atingida nos tratamentos em que foi utilizado a cal 50 % p/p com relação à quantidade de lodo de esgoto. Pode-se observar a ausência de coliformes totais e coliformes termotolerantes, além das *Salmonellas*.

No composto obtido em campo foi utilizado cal numa concentração menor e a duração da fase termófila foi insuficiente para eliminação dos micro-organismos patogênicos. Nesses experimentos, a temperatura máxima de 60 °C foi mantida por um curto período, durante apenas 5 dias.

A presença de micro-organismos no húmus obtido a partir de lodo de esgoto e poda de árvores em ordens de grandeza de 10^9 UFC/kg para o número total de bactérias e 10^7 UFC/kg para os fungos filamentos e as leveduras compõem a microbiota que irá atuar durante a aplicação do húmus no solo (FERNÁNDEZ et al., 2008).

Leitão et al. (2009) realizaram compostagem com esterco bovino de gado leiteiro e folhas de cajueiro e de mangueira em diferentes proporções do material triturado. Os resultados obtidos mostraram que os valores médios da relação C:N foram diminuindo de acordo com as proporções, ou seja, quanto maior a quantidade de esterco, menor os valores desta relação. Pode-se observar que a relação C:N das pilhas com material triturado apresentou valores que variaram entre 19:1 e 26:1 no início do processo, atingindo valores de 10:1 a 20:1 com 60 dias de compostagem.

Moura et al. (2009) confirmaram a ausência de *Escherichia coli* em compostagem de poda de árvores e resíduos de restaurante em pilhas com pequena quantidade de material. Durante o processo, a temperatura foi mantido abaixo dos valores recomendados pela literatura, mas o processo ocorreu de forma adequada.

A compostagem pode ocorrer em temperaturas em torno do ambiente (28 °C), sendo necessário um período maior de biodegradação.

Tabela 13 Caracterização do húmus obtido na compostagem de poda de árvores e lodo de esgoto em laboratório (tratamentos A, B e C) e em campo (tratamentos I, II, III e IV)

Parâmetro	Tratamento de compostagem						
	Laboratório			Campo			
	A	B	C	I	II	III	IV
pH	8,3	9,0	9,5	9,1	7,2	8,4	7,6
Umidade (%)	68	57	59	57	60	57	58
Carbono (%)	23	15	15	26	18	36	30
Nitrogênio (%)	1,4	1,1	1,3	2,6	2,1	2,2	2,3
Relação C:N	16:1	14:1	12:1	10:1	9:1	16:1	13:1
Coliformes totais (NMP/kg)	5×10^7	ausência	ausência	$> 2 \times 10^9$			
Coliformes termotolerantes (NMP/kg)	5×10^5	ausência	ausência	$> 2 \times 10^9$			
Contagem padrão de bactérias (UFC/kg)	6×10^9	2×10^8	2×10^8	7×10^9	4×10^9	7×10^9	5×10^9
Leveduras (UFC/kg)	1×10^6	ausência	3×10^5	ND	1×10^7	1×10^7	2×10^6
Fungos filamentosos (UFC/kg)	1×10^7	2×10^5	6×10^5	3×10^7	4×10^7	4×10^7	4×10^7
<i>Salmonellas</i> (10 g)	presença	ausência	ausência	presença	presença	presença	presença

2.5 CONCLUSÕES

- Poda de árvores urbanas e lodo de esgoto são biodegradados por processo de compostagem;
- sanitização da massa de lodo de esgoto ocorre na presença de cal a 50 % p/p em compostagem;
- pequeno volume da pilha, relação C:N menor do que 30:1 e composição química de lodo de esgoto na compostagem de poda de árvores e lodo de esgoto não favorecem a fase termófila e aumentam o tempo de biodegradação dos resíduos;
- resíduos de poda de árvores em torno de 10 cm de tamanho na presença de lodo de esgoto não são biodegradados totalmente em 60 dias de compostagem;
- bactérias, leveduras e fungos filamentosos estão presentes em resíduos sólidos, durante a compostagem e no húmus obtido a partir de poda de árvores e lodo de esgoto;
- enzimas hidrolíticas e oxidativas produzidas por micro-organismos durante a compostagem apresentam atividades enzimáticas cujos maiores percentuais são na fase ativa de degradação dos componentes dos resíduos;
- compostagem de poda de árvores e lodo de esgoto apresenta importância econômica com relação ao reaproveitamento de resíduos orgânicos com melhoria da qualidade do solo.

2.6 REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Resíduos sólidos - classificação. NBR 10004. São Paulo. 2004.

APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 18. ed., Washington: APHA, 1998.

BARATTA-JÚNIOR, A. P. **Utilização do composto de resíduos da poda da arborização urbana em substratos para produção de mudas**. 2007. 53 f. Dissertação (Mestrado Ciências Ambientais e Florestais) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.

BARCELLAR, C. A.; ROCHA, A. A.; LIMA, M. R.; POHLMANN, M. Efeito residual do lodo de esgoto alcalinizado em atributos químicos e granulométricos de um cambissolo húmico. **Scientia Agrária**, v. 2 n. 1-2, p. 87-91, 2001.

BIDONE, F. R. A. **Resíduos Sólidos Provenientes de Coletas Especiais: Eliminação e Valorização**. Rio de Janeiro: ABES. 2001. 240p.

BRITTO-JÚNIOR, A. O. S.; MOTA, F. S. B.; SILVA, L. A.; LEITÃO, V. P. M. **Atuação dos micro-organismos no processo de compostagem de folhagens e lodo de esgoto**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 25., 2009, Recife. **Anais ...** Cd-rom. Recife: ABES, 2009.

CAMPOS, F. S. **Uso de lodo de esgoto na reestruturação de um latossolo vermelho degradado**, 2006. 103 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Engenharia, São Paulo.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Manual de métodos de análises de solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA. 1997. 400p.

ESPOSITO, E.; AZEVEDO, J. L. **Fungos**: uma introdução à biologia, bioquímica e biotecnologia. Caxias do Sul: EDUCS. 2004. 510p.

FERNÁNDEZ, M. T. H.; IZQUIERDO, C. G.; STAMFORD, N. P.; MORENO, M. C. M. Enzimas que actúan en la materia orgánica del suelo. In: FIGUEIREDO, M. V. B.; BURITY, H. A.; STAMFORD, N. P.; SANTOS, C. E. R. S. **Microorganismos e Agrobiodiversidade**: o novo desafio para agricultura, Guaíba-RS: Agrolivros, 2008. p. 351-375.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2006. Disponível em: <<http://ibge.gov.br>>. Acesso em: 01 jun. 2009.

IPA – Instituto Agrônomo de Pernambuco. Precipitação Pluviométrica da cidade de Carpina. 2010.

KIEHL, J. E. Análise de fertilizantes orgânicos. In: _____. **Fertilizantes orgânicos**. 33. ed., São Paulo: Agronômica CERES, 1985, p. 426-430.

LEITÃO, V. P. M.; MOTA, S.; SILVA, L. A.; SILVA, J. C. C. Acompanhamento da relação carbono/nitrogênio na produção de composto orgânico de folhas de cajueiro, de mangueira e esterco bovino. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 25., 2009, Recife. **Anais ...** Cd-rom. Rio de Janeiro: ABES, 2009.

MAGRINI, F. E.; SARTORI, C. V.; VENTURIN, L. Avaliação microbiológica, pH e umidade de diferentes fases de maturação do biofertilizante Bokashi. **Brasileira de Agroecologia**, Brasil, v. 4, p. 431- 453, 2009.

MEDEIROS, A. C.; SILVA, M. M. P.; SOUZA, J. T.; OLIVEIRA, M. G.; OLIVEIRA, I. S. Avaliação do processo de compostagem de resíduos sólidos orgânicos desenvolvido em escolas municipais de Campina Grande/PB.: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 25., 2009, Recife. **Anais ...** Cd-rom. Rio de Janeiro: ABES, 2009.

MOURA, J. S.; BARROS, R. M.; CALHEIROS, H. C.; TIAGO-FILHO, G.L.; SILVA, F. G. B. Avaliação do processo de compostagem de resíduos urbanos: o caso dos resíduos do restaurante e de poda de um campus universitário. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 25., 2009, Recife. **Anais ...** Cd-rom. Rio de Janeiro: ABES, 2009.

PEREIRA-NETO, J. T. **Manual de compostagem - processo de abaixo custo.** Minas Gerais: UFV. 2010. 81p.

PROSAB – Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. **Manual Prático para a Compostagem de Biossólidos.** eds. Fernandes, F. e Silva, S. M. C. P. Londrina: Universidade Estadual de Londrina. 1996, 91p.

RICCI, A. B.; PADOVANI, V. C. R.; PAULA-JÚNIOR, D. R. **Uso de solo de Esgoto Estabilizado em um Solo Decapitado. I – Atributos Físicos e Revegetação.** 2010. 542 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade de Campinas –FEAGRI /UNICAMP. Campinas , São Paulo.

SALVADOR, J. T. De. **Reciclagem agrícola de lodo de esgoto tratado no Paraná pelo processo N-viro:** efeitos em solos, plantas, água de percolação e a possibilidade da alteração de sua relação Ca:Mg. 2006. Tese (Doutorado em Agronomia - Produção Vegetal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

SANTOS, R. C.; CAMPOS, J. F.; PINHEIRO, C. D.; TOLON, Y. B.; SOUZA, S. R. L.; BARACHO, M.; CARMO, E. L. de. Composting plants as alternative to the problematic one of the dumpsters in the urban way. **Enciclopédia biosfera,** Minas Gerais, n. 2, p. 37, 2006.

SUSZEK, M.; SAMPAIO, S. C.; SANTOS, R. F.; NUNES, O. L. G. S.; GOMES, S. D.; MALLMANS, L. S. Uso de água residuária na suinocultura na bioestabilização de resíduos verdes urbanos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** v. 9, p. 176-180, 2005.

CAPÍTULO III

3 CONCLUSÕES GERAIS

- Processo de compostagem de poda de árvores e lodo de esgoto por aeração é eficaz na produção de composto orgânico para utilização na agricultura, proporcionando uma boa alternativa para destinação final do lodo;
- atividades microbiológicas de enzimas hidrolíticas e oxidativas são responsáveis pela degradação dos componentes de poda de árvores e lodo de esgoto na compostagem;
- produção de húmus a partir de resíduos orgânicos diminui a quantidade de resíduos sólidos descartados no ambiente além de reduzir o consumo de fertilizantes químicos;
- compostagem de poda de árvores e lodo de esgoto tem importância sob o ponto de vista agrônomo, pois uma quantidade considerável de nutrientes retorna para o ambiente na forma mineral e orgânica, proporcionando melhorias químicas, físicas e biológicas no solo;
- compostagem de poda de árvores e lodo de esgoto é um processo satisfatório do ponto de vista tecnológico para tratamento de resíduos sólidos.