

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUÍMICA APLICADA

BRUNA POMPERMAYER MEOTTI DE ALMEIDA

ESPECTROSCOPIA APLICADA AO MONITORAMENTO DAS MUDANÇAS
ESTRUTURAIS DE COMPOSTOS ORGÂNICOS OBTIDOS NA COMPOSTAGEM
DO LODO DE ETE

PONTA GROSSA
2013

BRUNA POMPERMAYER MEOTTI DE ALMEIDA

ESPECTROSCOPIA APLICADA AO MONITORAMENTO DAS MUDANÇAS
ESTRUTURAIS DE COMPOSTOS ORGÂNICOS OBTIDOS NA COMPOSTAGEM
DO LODO DE ETE

Dissertação apresentada para a
obtenção do título de Mestre em
Química Aplicada no Programa de
Pós-Graduação em Química Aplicada
da Universidade Estadual de Ponta
Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Sandro Xavier
de Campos

PONTA GROSSA

2013

BRUNA POMPERMAYER MEOTTI DE ALMEIDA

**"ESPECTROSCOPIA APLICADA AO MONITORAMENTO DAS MUDANÇAS
ESTRUTURAIS DE COMPOSTOS ORGÂNICOS OBTIDOS NA
COMPOSTAGEM DO LODO DE ETE"**

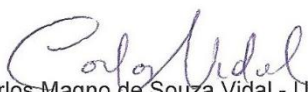
Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Química Aplicada da Universidade Estadual de Ponta Grossa, pela seguinte banca examinadora.



Orientador: Prof. Dr. Sandro Xavier de Campos - UEPG/PR



Profa. Dra. Elizabeth Weinhard de Oliveira Scheffer - UEPG/PR



Prof. Dr. Carlos Magno de Souza Vidal - UNICENTRO/PR

Ponta Grossa, 04 de Outubro de 2013.

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Setor de Tratamento da Informação BICEN/UEPG

A447 Almeida, Bruna Pompermayer Meotti de
Espectroscopia aplicada ao
monitoramento das mudanças estruturais de
compostos orgânicos obtidos na compostagem
do lodo de ete/ Bruna Pompermayer Meotti
de Almeida. Ponta Grossa, 2013.
66f.

Dissertação (Mestrado em Química
Aplicada - Área de Concentração: Química),
Universidade Estadual de Ponta Grossa.
Orientador: Prof. Dr. Sandro Xavier de
Campos.

1.Compostagem. 2.Lodo.
3.Espectroscopia. 4.Resíduos sólidos.
I.Campos, Sandro Xavier de. II.
Universidade Estadual de Ponta Grossa.
Mestrado em Química Aplicada. III. T.

CDD: 547

Para Moacir e Álida, Ederson e Manuela.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Sandro pela paciência, compreensão e ajuda.

Aos meus pais, Moacir e Álida por todo o suporte que sempre me deram e sei que sempre me darão. Eu não seria nada sem vocês. Obrigada.

Ao meu amor Ederson por realizar todos os meus sonhos. Obrigada pelo companheirismo e amor. Amo você.

A minha filha Manuela, por ser o melhor bebê do mundo e sempre colaborar com a mamãe. Você é minha vida.

Aos meus tios, Rosa e Anselmo por sempre estarem presentes e me ajudarem em tudo. Obrigada.

Aos meus queridos irmãos, Juliana e Matheus, que mesmo longe estão sempre comigo.

A Rosimara Zittel e Carmen Voigt pela ajuda com o trabalho. Obrigada de coração.

A indústria de alimentos Sadia pelo apoio.

RESUMO

Este trabalho teve por objetivo estudar o processo de compostagem de lodo de esgoto de uma indústria alimentícia com dois substratos diferentes, poda de jardinagem e serragem. Para o monitoramento e caracterização dos compostos obtidos foram utilizados métodos convencionais e espectroscópicos. Montou-se duas leiras, uma com lodo e serragem (LS) e outra com lodo e poda (LP), na proporção de 1:3 em volume. Acompanhou-se durante 210 dias o processo de compostagem com medições periódicas da temperatura, pH, umidade, análise elementar, germinação de sementes, teor de metais e análises espectroscópicas de UV/Vis e IV. Como resultado das análises realizadas pode-se concluir que os compostos obtidos na LS e LP estão estabilizados e maturados, porém com tempos diferentes de compostagem.

Palavras-chave: compostagem; lodo; espectroscopia; resíduos sólidos.

ABSTRACT

This dissertation aims to study the composting process of sewage sludge from a food industry with two different substrates, pruning and sawing and characterize the compounds obtained using conventional methods and spectroscopic techniques. It was created two piles, one with sawdust and sludge (SL) and another with sludge and pruning (LP) in a ratio of 1:3 by volume. It was followed for 210 days the composting process with periodic measurements of temperature, pH, moisture, elemental analysis, seed germination, metal content and spectroscopic analysis of UV / Vis and IR. THE CONCLUSION IS that the compounds obtained in LS and LP are stabilized and matured, but with different times of composting.

Keywords: Composting; sludge; spectroscopic; solid waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema do processo de compostagem.....	18
Figura 2 - Curva de temperatura durante a compostagem.....	20
Figura 3 - Leira com lodo e serragem (LS).....	34
Figura 4 - Leira com lodo e resíduos de poda (LP).....	35
Figura 5 - Variação da temperatura em função do tempo.....	39
Figura 6 - Variação da umidade em função do tempo.....	41
Figura 7 - Variação do pH em função do tempo.....	42
Figura 8 - Germinação de sementes de alface no composto da LS.....	45
Figura 9 - Germinação de sementes de alface no composto da LP.....	46
Figura 10 - Espectros de absorção UV/Vis de 200 a 400 nm da LS.....	48
Figura 11 - Espectros de absorção UV/Vis de 200 a 400 nm da LP.....	48
Figura 12 - Curvas da razão E_2/E_3 em função do tempo.....	49
Figura 13 - Curvas da aromaticidade total em função do tempo.....	50
Figura 14 - Espectros de absorção UV/Vis de 400 a 700 nm da LS.....	51
Figura 15 - Espectros de absorção UV/Vis de 400 a 700 nm da LP.....	51
Figura 16 - Curvas da razão E_4/E_6 em função do tempo.....	52
Figura 17 - Espectro de IV em diferentes tempos para LS.....	53
Figura 18 - Espectro de IV em diferentes tempos para LP.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais grupos de absorção no IV para substâncias húmicas.....	28
Tabela 2 - Metais: concentrações máximas permitidas.....	32
Tabela 3 - Concentrações de metais encontradas nos compostos da LS e LP.	46

SUMÁRIO

1	JUSTIFICATIVA.....	11
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	13
2.1	INTRODUÇÃO.....	13
2.2	PROCESSO DE COMPOSTAGEM.....	17
2.2.1	Parâmetros que influenciam a compostagem.....	19
2.2.2	Grau de maturação e estabilização do composto.....	23
2.2.3	Técnicas espectroscópicas utilizadas no monitoramento do processo de compostagem e na caracterização dos compostos obtidos.....	25
2.2.3.1	Absorção de Luz no UV/Vis.....	25
2.2.3.2	Infravermelho.....	27
2.2.4	Fitotoxicidade dos compostos.....	29
2.2.5	Metais.....	31
3	OBJETIVOS.....	33
3.1	OBJETIVO GERAL.....	33
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	33
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
4.1	MONTAGEM DO EXPERIMENTO.....	34
4.2	ANÁLISES FÍSICAS, QUÍMICAS E BIOLÓGICAS.....	35
4.2.1	Temperatura.....	35
4.2.2	Umidade.....	36
4.2.3	pH.....	36
4.2.4	Análise elementar.....	36
4.2.5	Germinação de sementes.....	36
4.2.6	Determinação de metais.....	37
4.3	ANÁLISES ESPECTROSCÓPICAS.....	37
4.3.1	Absorção de luz no UV/Vis.....	37
4.3.2	Infravermelho.....	38

5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
5.1	ANÁLISES FÍSICAS, QUÍMICAS E BIOLÓGICAS.....	39
5.1.1	Temperatura.....	39
5.1.2	Umidade.....	41
5.1.3	pH.....	42
5.1.4	Razão C/N.....	43
5.1.5	Germinação de sementes.....	44
5.1.6	Determinação de metais.....	46
5.2	ANÁLISES ESPECTROSCÓPICAS.....	47
5.2.1	Absorção de luz no UV/Vis.....	47
5.2.2	Infravermelho.....	53
6	CONCLUSÕES.....	56
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59

1 JUSTIFICATIVA

O lodo produzido por Estações de Tratamento de Esgotos (ETE) é considerado uma fonte potencial de riscos à saúde pública e ao ambiente. Dar uma disposição final adequada para o lodo ainda é um desafio para as empresas geradoras. O envio para um aterro sanitário é a maneira mais prática de solucionar essa questão, porém exige elevado custo e não é considerada a maneira mais segura ou a melhor do ponto de vista ambiental.

Uma alternativa ambientalmente correta e com baixo custo que vem sendo realizada por outros países há muito tempo é o reuso na agricultura. Algumas características do lodo de ETE como a alta concentração de nitrogênio e fósforo, o tornam um material agronomicamente interessante para aplicação no solo.

A sua utilização pode diminuir a adubação mineral e fornecer matéria orgânica ao solo (LOBO et al., 2013).

Entretanto, alguns lodos apresentam atributos que dificultam o uso agrônomo, por exemplo, o elevado teor de umidade, o mau cheiro e a presença de patógenos.

A compostagem, quando possível, constitui uma das melhores soluções para atenuar ou eliminar os fatores indesejáveis do lodo de ETE. Por meio dela ocorrem modificações no material primário como, conversão biológica da matéria orgânica putrescível para uma forma estabilizada, destruição de patógenos, redução da umidade e remoção de sólidos voláteis, obtendo-se assim uma substância que possa ser utilizada na agricultura sem restrições.

Quando mais estabilizada a matéria orgânica, após o processo de compostagem, melhor será sua qualidade para o uso agrônomo. Para identificar o

grau de estabilização é necessário acompanhar as mudanças ocorridas na constituição da matéria orgânica causadas pelo processo de humificação.

Vários autores concluíram que é necessário o cruzamento de várias técnicas para compreender o processo de transformação da matéria orgânica e avaliar a maturidade e estabilidade do composto.

Buscou-se nesse estudo um melhor entendimento por meio da utilização de técnicas químicas, físicas e espectroscópicas do processo de compostagem de lodo de ETE de uma indústria alimentícia, com o objetivo de obter um produto final altamente estabilizado e com maior valor agregado.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 INTRODUÇÃO

A geração, o tratamento e a disposição adequada de resíduos sólidos são grandes desafios para o desenvolvimento de uma sociedade sustentável.

A chegada da Política Nacional de Resíduos Sólidos no ordenamento jurídico brasileiro, e sua integração à Política Nacional de Meio Ambiente e à Política de Saneamento Básico, propicia o desenvolvimento da gestão de resíduos, porém implica a necessidade de mudanças nos sistemas adotados até agora.

O Brasil possui agora um sistema de regulação que estabelece de maneira ampla os princípios, os objetivos e as diretrizes aplicáveis à gestão integrada e ao gerenciamento dos resíduos sólidos, e que disciplina as responsabilidades dos geradores e do poder público (ABRELPE, 2012).

A reciclagem agrícola do lodo de esgoto doméstico no Brasil segue as determinações da resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) 375 de 2006.

Diante dessas responsabilidades as indústrias vêm buscando novas tecnologias que minimizem a utilização dos recursos naturais em seus processos produtivos, esforçando-se também para que seja cada vez menor o volume de resíduos produzidos.

Durante o processo produtivo são gerados resíduos sólidos e efluentes líquidos que, se forem despejados com os seus poluentes característicos, podem causar a alteração da qualidade nos corpos receptores e consequentemente a poluição e a degradação do meio ambiente. Para evitar que esta poluição seja

dissipada, é necessária a utilização de técnicas para o tratamento destes resíduos, o que na maioria das vezes implica em altos custos operacionais.

O tratamento dos efluentes industriais não se encerra com o advento da estação de tratamento de efluentes (ETE). Sua atividade também gera excedentes sólidos, denominados lodos, que devem ser gerenciados até sua correta destinação. Durante o projeto das ETES é comum os responsáveis pelo projeto não contemplarem o tratamento do lodo excedente. Como alternativa, acaba-se optando pela terceirização da coleta e tratamento destes resíduos sólidos, o que gera um alto custo (PRIMO, 2009).

Em virtude das dificuldades de se dar destino adequado aos resíduos de esgoto domésticos e industriais, vários países têm pesquisado alternativas para disposição final desses produtos. O esgoto, antes de passar por qualquer tipo de tratamento de estabilização e desinfecção, contém macro e micronutrientes e muitos microrganismos e parasitas. O manuseio e o emprego de esgoto e do lodo obtido para os mais variados fins sem prévio tratamento higienizante podem promover graves infecções ao homem e aos animais (PAULINO et al. 2001).

As alternativas mais comuns de disposição de lodo de esgoto, como aterros controlados e incineração, apresentam grave risco de poluição ambiental (ANDREOLI et al., 1997). A melhor alternativa é a reciclagem do resíduo na agricultura, uma vez que este atenda os parâmetros necessários com relação à concentração de patógenos e metais pesados (CETESB, 2013).

A utilização de lodo de esgoto é uma prática altamente promissora para o desenvolvimento de sistemas agrícolas sustentáveis.

As agências ambientais, cada vez mais exigentes, têm incentivado o uso agrícola do lodo, desde que apresente características adequadas a esta finalidade.

As principais exigências quanto às qualidades requeridas são a sua estabilização e higienização, as quais podem ser obtidas empregando-se mecanismos químicos, físicos e biológicos aplicados combinada ou isoladamente (BORGES et al., 2009).

A reciclagem do lodo de esgoto constitui uma solução de longo alcance para a destinação deste resíduo, podendo ser utilizado no cultivo de grandes culturas, silvicultura, floricultura, paisagismo ou na recuperação de áreas degradadas (OLIVEIRA; MATTIAZZO, 2001; SILVA et al., 2005; MARQUES et al., 2007).

Outros aspectos positivos são os benefícios como alterações na fertilidade do solo (COLODRO; ESPÍNDOLA, 2006). Do ponto de vista agrônômico o composto obtido da compostagem do lodo de esgoto apresenta, em sua constituição, quantidades significativas de nutrientes ao desenvolvimento das plantas, podendo ser uma excelente alternativa para a recuperação de áreas degradadas (TRANNNIN et al., 2005).

Um dos objetivos da utilização de lodo na agricultura, por exemplo, é o fornecimento de nutrientes, particularmente nitrogênio e fósforo. Para Outwater (1994), a alternativa da reciclagem agrícola tem o grande benefício de transformar um resíduo em um importante insumo agrícola que fornece matéria orgânica e nutrientes ao solo, trazendo também vantagens indiretas ao homem e ao ambiente, como a redução dos efeitos adversos à saúde causados pela incineração e a diminuição da dependência de fertilizantes químicos.

Para que o composto possa ser empregado com segurança no beneficiamento de solos, algumas medidas devem ser tomadas, como determinar as concentrações de componentes potencialmente tóxicos, particularmente dos metais pesados no composto.

A compostagem surge como uma tecnologia eficaz para a estabilização e higienização do lodo de ETE, uma vez que reduz em aproximadamente 50% o volume e a massa dos resíduos, além de gerar um produto estável que pode ser benéfico para a agricultura (SÁNCHEZ-MODENERO et al., 2002; CHEFETZ et al., 1996).

Lima et al. (2001), referenciando diversos autores (Berton, 2000; Melo & Marques, 2000; Deschamps & Favaretto, 1999; Dionísio et al., 1999; Miyazawa et al., 1999; Berton, 1994; Logan, 1994 e Glória, 1992), diz que a compostagem de efluentes é um exemplo de tecnologia mais limpa. Efluentes, quer sejam industriais ou domésticos, podem gerar um lodo rico em matéria orgânica.

O composto obtido melhora as características físicas, químicas e biológicas do solo, o que aumenta a eficiência dos adubos minerais, reduzindo o uso de fertilizantes químicos, prolongando a vida útil do solo e permitindo uma produção maior e com melhor qualidade (OLIVEIRA et al., 2005).

A aplicação do material compostado ao solo é, teoricamente, a forma mais sustentável de utilizar esse resíduo, pois promove alterações benéficas no meio onde é aplicado e um melhor crescimento das plantas. Essa premissa, entretanto, necessita ser testada, caso a caso, em virtude das diferenças de composição de cada material (EMBRAPA, 2013).

Tendo o processo natural de transformação da matéria orgânica, a compostagem pode ser considerada uma versão acelerada da decomposição da matéria orgânica no solo, sendo obtida através do fornecimento de condições favoráveis à atividade microbiana, como por exemplo, temperatura, umidade, pH e aeração (PROVENZANO et al., 2001).

Estudar o processo de compostagem tem sua importância aliado a identificação do grau de humificação do composto que pode ser considerado um índice para medida de sua estabilização, sendo que, quanto mais humificada a matéria orgânica melhor será sua qualidade para uso na agricultura (FIALHO, 2007). Para acompanhar o processo de compostagem são utilizadas diferentes análises físicas e químicas: pH, relação C/N e temperatura, como também pode ser monitorado através de técnicas espectroscópicas (Absorção de luz no UV/Vis e Infravermelho).

Assim, as mudanças ocorridas na constituição da matéria orgânica, causadas pelo processo de humificação são usadas para propor indicies de estabilização e critérios de qualidade do composto final (SÁNCHEZ-MODENERO et al., 2002). Praticamente todo resíduo orgânico pode ser estabilizado e higienizado pela compostagem.

2.2 PROCESSO DE COMPOSTAGEM

A compostagem pode ser definida como um processo biológico de oxidação aeróbia e exotérmica de um substrato orgânico no estado sólido, caracterizando-se pela produção de CO₂, vapor de água, liberação de substâncias minerais e formação de matéria orgânica estável denominada húmus (BERNAL et al., 1998a).

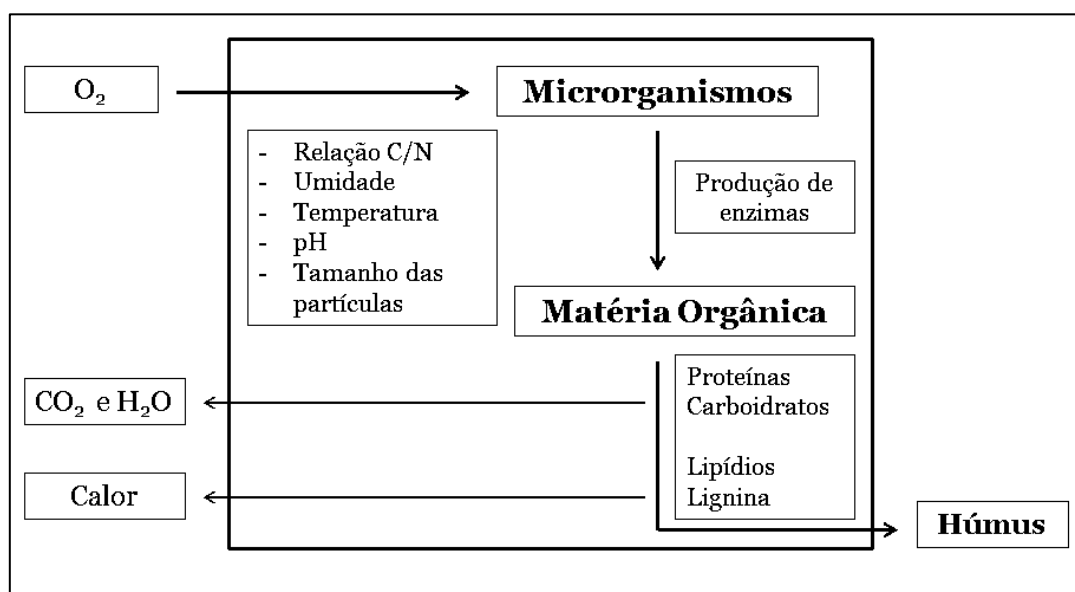
Para Carvalho et al. (2002) a compostagem é um processo de biooxidação aeróbia, exotérmica, de um substrato orgânico heterogêneo, realizada por uma população complexa de microrganismos, caracterizada por ter como produto final água e CO₂, com liberação de matéria orgânica que se estabiliza após a maturação.

A higienização do substrato é função da elevação da temperatura durante a fermentação e do tempo de exposição do substrato.

Os microrganismos encontrados na matéria orgânica são capazes de produzir as enzimas necessárias à degradação dos substratos (TUOMELA et al., 2000).

Segundo Bettiol e Camargo (2000), os componentes orgânicos biodegradáveis passam por sucessivas etapas de transformações sob a ação de diversos grupos de microrganismos, resultando em um processo bioquímico altamente complexo, mostrado na Figura 1:

Figura 1 - Esquema do processo de compostagem.



Fonte: FIALHO, 2007

Para Heck et al. (2013) o processo de compostagem pode ser um recurso viável para o tratamento de lodo de esgoto doméstico ou industrial com o posterior reaproveitamento do produto final.

Esse processo tem se constituindo em uma ótima alternativa no tratamento de lodos com a finalidade agronômica, uma vez que esse processo permite o controle de microrganismos patogênicos e pode produzir um insumo agrícola de boa qualidade (COSTA et al. 2005).

Segundo Vaz e Gonçalves (2002), a reciclagem de lodo de esgoto para utilização agronômica é a forma mais adequada para a reciclagem dos seus nutrientes, contribuindo para a diminuição dos problemas ambientais e atuando como fertilizante e condicionador do solo.

2.2.1 Parâmetros que influenciam a compostagem

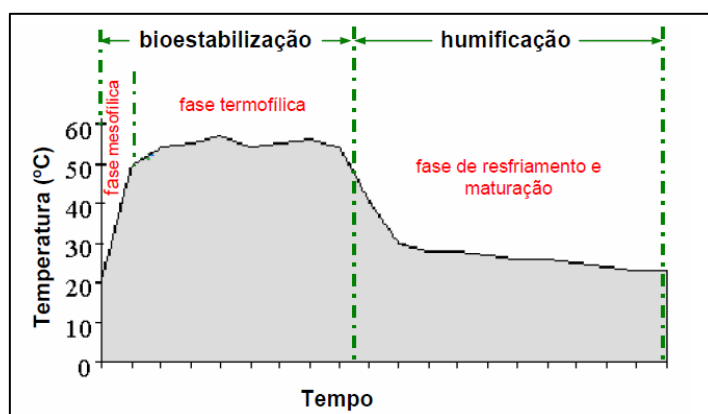
As variáveis ambientais que influenciam no processo são o teor de umidade, a aeração, o balanço de nutrientes e o pH (TIQUIA et al., 1997; JEONG e KIM, 2001; VAN GINKEL et al., 2002; LIANG et al., 2003). A temperatura caracteriza a rapidez do processo de biodegradação, a eliminação de patógenos e é consequência da atividade microbiana. (BETTIOL; CAMARGO, 2000; SILVA, 2004). Cada espécie microbiana tem uma temperatura ótima de crescimento, na qual ocorre sua multiplicação máxima. A variação de temperatura durante a compostagem determina os diferentes tipos de microrganismos que irão predominar e define as diferentes etapas do processo (KEENER et al., 2000).

São quatro fases importantes durante o processo de compostagem definidas de acordo com a temperatura (BERNAL et al., 1998a; TRAUTMANN, 2005):

- **Fase Mesofílica:** predominam temperaturas moderadas, até cerca de 40°C. Tem duração média de dois a cinco dias. Nessa fase predominam bactérias e fungos mesófilos que degradam compostos simples, como açúcares, aminoácidos e proteínas;

- **Fase Termofílica:** ocorre quando o material atinge sua temperatura máxima ($> 40^{\circ}\text{C}$) e é degradado mais rapidamente. Pode ter duração de poucos dias a vários meses, variando conforme as características do material a ser compostado. Nessa fase há predominância de fungos termófilos, bactérias e actinomicetes que degradam gorduras, celulose, hemicelulose e lignina.
- **Fase de Resfriamento:** é marcada pela queda da temperatura para valores da temperatura ambiente, devido à redução da atividade microbiana pela escassez de substratos orgânicos biodegradáveis. Microrganismos mesófilos presentes degradam os açúcares restantes, celulose e hemicelulose (KEENER et al., 2000).
- **Fase de Maturação:** é o período de estabilização. Produz um composto maturado, altamente estabilizado e humificado, sem toxicidade, denominado húmus. Pode ter duração de semanas ou meses. As fases da compostagem são ilustradas na Figura 2:

Figura 2 - Curva de temperatura durante a compostagem.



Fonte: TRAUTMANN e OLYNCIW, 2005.

A indicação do início do processo de compostagem é a elevação da temperatura do substrato. Logo após a montagem da leira, a temperatura pode ser menor do que a temperatura ambiente, devido ao resfriamento provocado pela

evaporação da água. Nos dias seguintes, a decomposição do composto começa a gerar calor e a temperatura começa a subir. Nessa ascensão tem-se inicialmente a fase mesofílica, seguida de outra, mais quente, denominada termofílica que é ideal para desinfecção.

Para Khiehl (1998) na fase mesofílica a decomposição do composto ocorre mais rapidamente, pois as bactérias são mais eficientes nessa fase do que na termofílica. Entretanto, na fase termofílica os microrganismos patogênicos são eliminados com maior segurança.

O controle da temperatura pode ser feito através de revolvimentos periódicos do composto, provocando resfriamento por evaporação e ventilação.

O transporte dos nutrientes dissolvidos, necessários para as atividades físicas e metabólicas dos microrganismos, é feito pela água, logo o controle do teor de umidade também é um fator determinante no processo (FIALHO, 2007).

A umidade ideal para o processo de compostagem gira em torno de 50% a 65%. A atividade microbiana é inibida em níveis de umidade menores que 30% (LIANG et al., 2003; TIQUIA, 2005). Um teor de umidade acima de 65% caracteriza anaerobiose, pois o movimento de oxigênio é inibido, resultando em uma lenta decomposição (DAS; KEENER, 1997; KIEHL, 1998).

É fundamental que a concentração de O_2 esteja ideal durante todo o processo. Deve manter-se entre 15% e 20% (MILLER, 1992). Uma aeração adequada é necessária para manter temperaturas abaixo de 60° C, acima desse valor os microrganismos presentes estariam ameaçados. Além disso, remove o excesso de umidade e de gás carbônico e fornece O_2 para os processos biológicos. A aeração pode ser facilitada por meio de revolvimentos periódicos do material compostado (MANCINI et al., 2007).

A remoção do excesso de gás carbônico é importante, pois o teor do gás existente no interior da leira pode chegar a concentrações cem vezes maiores que seu conteúdo normal na atmosfera. Com a falta de oxigênio na leira, haverá formação e acúmulo de dióxido de carbono e metano, componentes característicos da fermentação anaeróbia, caracterizada pela produção de maus odores e pelo maior tempo de cura em relação ao processo aeróbio (KIEHL, 1998; PRIMO, 2009).

Quando a leira é revolvida, o composto entra em contato com a atmosfera rica em oxigênio, suprimindo momentaneamente as necessidades de aeração do processo biológico (FERNANDES, 1999).

Durante as fases da compostagem, como a temperatura, o nível de pH também varia. Porém, estas variações não são consideradas um fator crítico do processo, pois ocorrem naturalmente devido a um fenômeno conhecido como auto regulação, efetuado pelos microrganismos. Normalmente deve situar-se numa faixa de 6,0 a 9,0.

Entre os nutrientes necessários ao desenvolvimento bacteriano, o carbono e o nitrogênio são os mais importantes. O carbono como fonte de energia e o nitrogênio sendo imprescindível para a síntese celular. Por essa razão o acompanhamento da relação C/N durante todas as etapas do processo de compostagem é fundamental. A razão C/N considerada adequada no início do processo encontra-se na faixa de 25/1 a 35/1, devendo chegar, no final do processo, a uma razão em torno de 12/1 (BISHOP; GODFREY, 1983; MANCINI et al., 2007).

Segundo PRIMO (2009), quando se prepara uma leira com diferentes materiais é possível misturá-los de maneira a melhorar a relação C/N. Conhecendo-se as relações dos materiais a serem empregados é recomendável utilizar resíduos que corrijam relações mais elevadas.

O tamanho das partículas também é determinante para a eficiência do processo. O lodo de esgoto tem a tendência de se adensar, transformando-se em uma massa compacta dificultando o movimento de gases e líquidos dentro da leira. Para corrigir essa característica indesejada o lodo é misturado com agentes estruturantes que apresentam partículas de dimensões adequadas para a aeração, como serragem de madeira, folhas, cascas de árvores, bagaço de cana, entre outros (CARVALHO, 2002). Segundo Fernandes (1999), a granulometria adequada fica em torno de 25 e 75 mm pra se obter bons resultados.

De modo geral, resíduos vegetais como a serragem e poda são os agentes estruturantes mais utilizados na compostagem do lodo de esgoto, pois apresentam características como: granulometria que confere boa integridade estrutural à massa em compostagem, facilitando a difusão do ar; baixo teor de umidade; capacidade para absorver o excesso de umidade do lodo e baixo teor de nitrogênio que permite equilibrar a relação C/N da mistura final (FERNANDES, 1999).

Geralmente as pilhas de compostagem são feitas utilizando-se 3 a 4 partes de resíduo fibroso (rico em carbono) para 1 parte de lodo de esgoto (resíduo mais rico em nitrogênio), em volume.

Também se deve considerar os aspectos práticos, como a disponibilidade do resíduo, distâncias de transporte e características desejadas no produto final.

2.2.2 Grau de maturação e estabilização do composto

É fundamental que o composto, para ser utilizado no solo, apresente um elevado grau de estabilidade e maturidade, o que caracteriza um conteúdo de matéria orgânica estável, ausente de compostos fitotóxicos e patógenos.

Para Gao et al. (2010) a estabilidade refere-se tipicamente a atividade microbiana e pode ser definida pelo índice de respiração ou pela conversão das espécies químicas.

A maturidade refere-se à quantidade de degradação das substâncias orgânicas fitotóxicas e é geralmente medida pela o índice de germinação (GUO et al., 2012; GAO et al, 2010).

A maturidade e a estabilidade do composto referem-se a propriedades específicas do material. A maturidade refere-se à falta de fitotoxidade e estabilidade se refere ao nível de atividade biológica do composto (PULLICINO, 2002).

Bernal et al. (1998a) relaciona a estabilidade com a atividade microbiana e define a maturidade como matéria orgânica estável, ausente de fitotoxidade e de patógenos.

Segundo Chen (2003) a maturidade ou estabilidade de um composto reflete o grau de decomposição da matéria orgânica.

Para garantir que o composto seja utilizado na agricultura, sem causar riscos ambientais, métodos rápidos para avaliar a sua fitotoxidade são essenciais. A fitotoxidade do composto pode ser determinada através de testes de germinação.

A estabilidade da matéria orgânica natural é um conceito relativo sendo que sua definição ainda é desafio. A busca de parâmetros requer uma série de determinações físicas, químicas e espectroscópicas (FIALHO, 2007).

Ainda não há um consenso quanto ao uso de parâmetros para determinar índices de estabilização de compostos. Algumas propostas baseiam-se nas características físicas do material que indicam o estágio da decomposição, porém dizem pouco sobre o grau de maturação do composto. Parâmetros químicos como razão C/N, análise elementar e testes de fitotoxidade também são empregados para

monitorar o processo de compostagem (BERNAL et al., 1998c; HSU; LO 1999; SÁNCHEZ-MODENERO et al., 2002; GRIGATTI et al., 2004; TIQUIA, 2005; SENESI et al., 2007; FIALHO, 2007).

Com o intuito de aprofundar o estudo das transformações químicas ocorridas durante o processo de compostagem, métodos espectroscópicos como, Ressonância Magnética Nuclear de C^{13} , Absorção de luz na região do UV – VIS e espectroscopia no Infravermelho, estão sendo cada vez mais utilizados para monitorar o processo (DORES-SILVA et al. 2013).

2.2.3 Técnicas espectroscópicas utilizadas no monitoramento do processo de compostagem e na caracterização dos compostos obtidos

2.2.3.1 Absorção de Luz no UV/Vis

As radiações ultravioletas, faixa de comprimento de onda entre 200 nm a 400 nm, e as de luz visível, faixa de comprimento de onda entre 400 nm a 800 nm, provocam transições eletrônicas onde os elétrons ligantes (σ e π) e os não ligantes (n) são promovidos do estado fundamental para os estados excitados σ^* e π^* , denominados antiligantes (SILVERSTEIN et al., 2007).

As transições que ocorrem são observadas na forma de picos. As intensidades desses picos são proporcionais à probabilidade de ocorrência da transição e à concentração da molécula na amostra. Pode ocorrer a formação de bandas de absorção UV/Vis, devido às associações dos estados rotacionais e vibracionais. A posição da banda de absorção corresponde ao comprimento de onda da radiação que possui a energia necessária para que ocorra a transição eletrônica. Já a intensidade da banda de absorção depende de dois fatores: a probabilidade de interação entre a radiação e o sistema

eletrônico, e a diferença entre os estados fundamental e excitado (SILVERSTEIN et al., 2007).

Segundo Chen et al. (1977) a absorção das substâncias húmicas no UV/Vis sofre influência do pH, que deve situar-se entre 7,0 e 8,0, do tipo de solvente e da concentração salina.

Para o estudo do grau de humificação de um determinado composto utiliza-se a razão E_4/E_6 , que é a razão entre as absorbâncias em 465 e em 665 nm. A razão E_4/E_6 fornece informações sobre o grau de condensação da cadeia carbônica que está relacionada com o grau de humificação das substâncias húmicas. Logo, se a razão E_4/E_6 é baixa, indica um alto grau de condensação dos constituintes aromáticos e quando é alta sugere a presença de mais estruturas alifáticas (OUATMANE et al., 2002; HUANG, et al., 2004; FIALHO, 2007).

Valores para a razão E_4/E_6 , encontrados a partir da compostagem de resíduos orgânicos, variam entre 6,3 e 7,5 (OUATMANE et al., 2002).

Contudo, a razão E_4/E_6 , não deve ser utilizada como único parâmetro, pois varia de acordo com os materiais utilizados na compostagem (HUANG, et al., 2004).

Pajczkowska et al. (2003), utilizaram a espectroscopia de absorção no UV/Vis para estudar a compostagem de lodo de fábrica de papel e serragem e verificaram um aumento na razão E_4/E_6 durante o processo de humificação.

Pedra et al. (2007), também verificou o aumento da razão E_4/E_6 durante o processo de compostagem de lodo de esgoto.

Fuentes et al. (2007), afirmam que valores obtidos pelo uso da espectroscopia de absorção de radiação UV/Vis têm fornecido dados uteis para o acompanhamento da evolução de grau de humificação de materiais orgânicos extraídos da compostagem de lodo de esgoto.

2.2.3.2 Infravermelho

O aperfeiçoamento do uso de técnicas espectroscópicas para o estudo da matéria orgânica vem demonstrando o forte potencial da espectroscopia no infravermelho (IV) para o entendimento dos processos relacionados com a dinâmica da matéria orgânica (DIAS et al., 2009).

A radiação infravermelha tem número de onda entre 14.290 cm^{-1} e 200 cm^{-1} , está situada entre a região do visível e das microondas, dentro do espectro eletromagnético.

Radiações infravermelhas ao serem absorvidas por uma molécula são convertidas em energia de rotação molecular, formando um espectro com uma série de linhas separadas, e em energia de vibração molecular, originando um espectro formado por uma série de bandas. Essas bandas de vibração-rotação são utilizadas na espectroscopia de infravermelho, principalmente as situadas na faixa de 4000 cm^{-1} a 400 cm^{-1} . As frequências e os comprimentos de onda relacionam-se às massas relativas e a geometria dos átomos e às constantes de força das ligações (SILVERSTEIN, 2007).

Os espectros obtidos de substâncias húmicas apresentam uma variedade de bandas que podem indicar diferentes grupos funcionais. São observadas mudanças nas regiões de estruturas alifáticas, aromáticas e de polissacarídeos (STEVENSON, 1994; FIALHO, 2007).

A Tabela 1 traz os principais grupos de absorção no infravermelho para substâncias húmicas:

Tabela 1 - Principais grupos de absorção no IV para substâncias húmicas.

Número de onda	Atribuições
$3395\text{-}3400\text{ cm}^{-1}$	Estiramento OH ligado e estiramento N-H
2930 cm^{-1}	Estiramento CH alifático
$1705\text{-}1716\text{ cm}^{-1}$	Estiramento C=O de acetona e de ácidos COOH

1630-1650 cm^{-1}	Estiramento assimétrico C-O dos íons carboxilato COO^- Estiramento C=C dos anéis aromáticos Estiramento C=O Deformação N-H das amidas primárias
1510 cm^{-1}	Deformação N-H de amida secundária Estiramento C=C dos aminoácidos
1450 cm^{-1}	Deformação C-H dos $-\text{CH}_2$ e $-\text{CH}_3$
1420 cm^{-1}	Estiramento assimétrico C-O Deformação O-H Deformação C-O-H dos COOH Estiramento simétrico dos íons COO^-
1230 cm^{-1}	Estiramento simétrico C-O Deformação OH dos COOH
1125 cm^{-1}	Estiramento C-O de álcoois, éteres, ésteres e COOH
1035 cm^{-1}	Estiramento C-O de polissacarídeos

Fonte: CAMPOS, 2004

Devido à sobreposição das bandas os resultados da espectroscopia de infravermelho devem ser utilizados em conjunto com outras técnicas.

Maia et al (2012) utilizou Infravermelho para estudar o processo de compostagem de lodo de indústria de papel e serragem em diferentes tempos de compostagem e encontrou grupos característicos de compostos humificados.

Martins (2009) também fez uso de espectros de IV para estudar a matéria orgânica presente em solos sob adição de efluente de esgoto tratado e encontrou espectros típicos para compostos humificados.

2.2.4 Fitotoxicidade dos compostos

Ensaio de fitotoxicidade têm recebido grande atenção pelos órgãos ambientais do mundo. Germinação de sementes e crescimento de plantas são as

técnicas mais comuns utilizadas para avaliar a fitotoxicidade de compostos (TIQUIA, 2010).

A utilização de ensaios biológicos para o monitoramento da fitotoxicidade de extratos, frações e compostos químicos isolados tem sido frequentemente incorporada à identificação e monitoramento de substâncias potencialmente tóxicas (NOLDIN et al., 2003).

Testes de germinação empregados para avaliar a qualidade ambiental representam uma alternativa para complementar as análises químicas, além de apresentarem baixo custo e a possibilidade de serem realizados continuamente (ŽALTAUSKAITĖ; ČYPAITĖ, 2008; WILKE et al., 2008; RODRIGUES et al., 2013).

Barros et al. (2011) utilizaram estudos de germinação com sementes de milho para observar sintomas de toxidez de compostos de lodo de esgoto.

Duarte et al. (2011) observaram o crescimento de mudas de *Acacia mangium* cultivadas em solos contendo substrato de lodo de esgoto.

Dentre os principais fatores que afetam a germinação têm-se a luz, a temperatura, a disponibilidade de água e o oxigênio.

Apesar da maioria das sementes se apresentarem indiferentes à luminosidade, algumas germinam somente com extensa exposição à luz e outras com breve exposição, Certas sementes germinam somente no escuro e outras necessitam de um longo ou curto fotoperíodo diário. (VIEIRA; CARVALHO, 1994).

A temperatura pode afetar as reações bioquímicas que determinam todo o processo germinativo. As sementes apresentam capacidade germinativa em limites bem definidos de temperatura, variável de espécie para espécie. (SOUZA, 2005)

Ainda segundo Vieira e Carvalho (1994), entre os fatores do ambiente, a água é o fator que mais influencia o processo de germinação. A absorção de água

promove a reidratação dos tecidos, intensificando a respiração e todas as outras atividades metabólicas, resultando no fornecimento de energia e nutrientes necessários para a retomada de crescimento por parte do eixo embrionário. O excesso de umidade impede a penetração do oxigênio e reduz todo o processo metabólico, resultando no decréscimo na germinação.

Plantas sensíveis às substâncias tóxicas podem ser utilizadas como organismos teste para a avaliação e monitoramento de contaminantes ambientais.

A alface (*Lactuca sativa*) está entre as espécies mais utilizadas para avaliar a fitotoxicidade de efluentes domésticos e industriais e seus derivados (ŽALTAUSKAITĖ; ČYPAITĖ, 2008; ANDRADE et al., 2010) sendo esta espécie recomendada por agências internacionais.

Souza (2005) cita que a vantagem do uso da alface nos estudos de fitotoxicidade reside na sensibilidade da espécie, mesmo em baixas concentrações de substâncias tóxicas, além de apresentar germinação rápida, em aproximadamente 24 horas.

Segundo Ding et al. (2009), a alface tem sido amplamente utilizada em testes de fitotoxicidade devido à sua sensibilidade e representatividade, e ainda por ser amplamente cultivada no mundo todo.

2.2.5 Metais

A utilização do lodo na agricultura, mesmo depois de estabilizado, requer uma análise criteriosa a respeito do seu conteúdo de metais uma vez que pode apresentar um risco ao meio ambiente e a população se os níveis desses parâmetros não estiverem dentro do permitido na legislação.

Os principais elementos químicos dentro deste conceito são: Ag, As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb, Se e Zn. O termo metal pesado é utilizado para alguns elementos químicos (massa específica maior que 5 g/cm^3) que contaminam o meio ambiente e podem provocar diferentes níveis de dano à biota quando em altas concentrações (PRIMO, 2009). Apesar de este termo ser amplamente utilizado na literatura alguns autores defendem que, ao invés de metais pesados, deve-se utilizar o termo metais que podem ser potencialmente tóxicos, dando o sentido de relatividade para esse termo.

O comportamento químico dos metais no solo é bastante complexo e influenciado por diferentes tipos de reações, tais como adsorção, complexação, precipitação, oxidação e redução, que definem a biodisponibilidade desses elementos para as plantas, a solubilidade e lixiviação nos solos, logo, o seu potencial de risco para a saúde humana e para o meio ambiente (EPA, 1992).

Um solo é considerado poluído quando o teor de metais do mesmo atinge níveis 3 a 5 vezes superiores aos teores originais (FERNANDES et al., 2001). O teor de metais deve ser monitorado no lodo de ETE e no composto final da compostagem, os valores não devem ultrapassar os descritos na Tabela 2 (CONAMA 375, 2006):

Tabela 2 – Metais: concentrações máximas permitidas.

Substâncias Inorgânicas	Concentração Máxima permitida no lodo de esgoto ou produto derivado (mg/kg, base seca)
Arsênio	41
Bário	1300
Cadmio	39
Chumbo	300
Cobre	1500

Cromo	1000
Mercúrio	17
Molibdênio	50
Níquel	420
Selênio	100
Zinco	2800

Fonte: CONAMA 375, 2006

Junio et al. (2011) estudou os teores de metais presentes em solos fertilizados com composto de lodo de esgoto e observou que aplicações de doses de composto de lodo de esgoto de até 75 Mg ha^{-1} não aumentaram os teores de Cu, Zn, Pb, Cd, Ni e Cr acima dos limites críticos estabelecidos pela legislação.

Gomes et al. (2013) estudou o uso de lodo de esgoto como substrato para produção de mudas de *Tectona grandis* L. dando ênfase para a concentração de metais encontrada no lodo de esgoto de ETE e concluiu que o uso do lodo de esgoto para a produção de mudas é viável e promissor.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Estudar o processo de compostagem do lodo da Estação de Tratamento de Esgoto de uma indústria de alimentos utilizando métodos convencionais e técnicas espectroscópicas para avaliação das transformações da matéria orgânica no decorrer do processo até a detecção do período de maturação e estabilização dos compostos.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Construir e operar um sistema piloto de compostagem utilizando os resíduos gerados na estação de tratamento de efluentes (ETE) de uma indústria alimentícia, resíduos de poda e jardinagem e serragem;
- Caracterizar as transformações físicas e químicas durante o processo de compostagem e a qualidade do composto produzido;
- Caracterizar as variações da matéria orgânica no início e no decorrer do processo de compostagem utilizando técnicas espectroscópicas: Infravermelho e Absorção de Luz no Ultravioleta/Visível;
- Caracterizar o composto final em relação à concentração de metais segundo resolução CONAMA 375 (2006) e verificar sua viabilidade para disposição na agricultura.
- Avaliar a fitotoxicidade do composto final através de teste de germinação com sementes de alface (*Lactuca sativa*).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MONTAGEM DO EXPERIMENTO

O experimento foi montado nas dependências da Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Optou-se pelo sistema de leiras revolvidas, onde o lodo é misturado com um agente estruturante, distribuído em leiras triangulares que são periodicamente revolvidas. Montaram-se as leiras em função do volume de resíduos, na proporção 1:3 de lodo para resíduos de poda e também 1:3 de lodo para serragem (FERNANDES, 1999).

Em peso, utilizou-se na LS, 106 Kg de lodo e 43 Kg de serragem. Na LP utilizou-se 95 Kg de lodo e 20 Kg de resíduos de poda.

Foram montadas duas leiras, conforme as Figuras 3 e 4, com 1,0 m de altura e 1,0 m de comprimento.

Figura 3 - Leira com lodo e serragem (LS).



Fonte: A autora

Figura 4 - Leira com lodo e resíduos de poda (LP).



Fonte: A autora

A superfície onde as leiras foram montadas foi recoberta com uma lona para impedir o contato com o solo e facilitar o processo de revolvimento.

4.2 ANÁLISES FÍSICAS, QUÍMICAS E BIOLÓGICAS

Para o monitoramento do processo de compostagem foram coletadas amostras, a cada 15 dias, em pontos aleatórios, no interior e na superfície das leiras.

4.2.1 Temperatura

As medidas de temperatura foram realizadas diariamente, a partir do dia 6 de abril de 2012 até o dia 1 de novembro de 2012. Utilizou-se um termômetro de mercúrio, com graduação de -10 °C a 110 °C.

Efetuar-se as medidas introduzindo o termômetro, no interior das leiras, em três pontos diferentes, a aproximadamente 18 cm de profundidade.

4.2.2 Umidade

O teor da umidade foi determinado pela diferença na massa da amostra antes e depois do material ser seco em estufa a 60° C até massa constante.

4.2.3 pH

Para as medidas de pH pesou-se 0,5 g de amostra seca a 60° C e adicionou-se 5 ml de solução de CaCl_2 , 0,01 mol L^{-1} . Agitou-se a mistura por 30 minutos em agitador orbital e a leitura de pH foi realizada em pHmetro. (RAIJ et al., 2001).

4.2.4 Análise elementar

A análise química elementar dos elementos carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre, foi realizada no aparelho CHNS-O da marca Fisions, EA 1108 do Instituto de Química de São Carlos – SP.

4.2.5 Germinação de sementes

Para o teste de germinação utilizou-se sementes de alface que foram colocadas em placas de Petri. Em cada placa colocou-se papel-filtro embebido com água deionizada e

adicionou-se 25g dos compostos finais obtidos da LS e LP. Na placa controle utilizou-se solo vegetal indicado para culturas de hortaliças. Adicionou-se, em cada placa, 10 sementes de alface. Cobriram-se as placas com filme plástico com pequenos furos. Deixaram-se as placas a temperatura e luz ambiente por 10 dias. Realizou-se o teste em triplicata.

Ao final dos 10 dias contaram-se quantas sementes germinaram em cada placa (TECNOTRATER, 2007).

4.2.6 Determinação de metais

Para a digestão das amostras utilizou-se o método EPA 3050B. Pesou-se 0,5g das amostras e adicionou-se 5 ml de HNO_3 concentrado. As amostras foram digeridas em Bloco Digestor Microcontrolado Tecnal modelo 040/25 por 2 horas. Adicionou-se 1,5 ml de H_2O_2 30% e deixou-se reagir por 1 hora, em seguida adicionou-se 5 ml de HCl concentrado. Os extratos obtidos foram transferidos para balões volumétricos de 50 ml e aferidos com água ultrapura. Realizou-se o branco e a triplicata de cada amostra.

Quantificaram-se os metais cobre (Cu), manganês (Mn), zinco (Zn), ferro (Fe), chumbo (Pb), cromo (Cr), cobalto (Co), prata (Ag) e cádmio (Cd). As leituras foram realizadas no espectrofotômetro de absorção atômica de chama, marca VARIAN modelo 240FS, do Complexo de Laboratórios Multiusuários (C-Labmu) da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG).

4.3 ANÁLISES ESPECTROSCÓPICAS

4.3.1 Absorção de luz no UV/Vis

A absorção no UV/Vis foi realizada no aparelho Varian Cary 50 BIO da Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Dissolveu-se 0,02 g da amostra em 10 ml de solução de bicarbonato de sódio (NaHCO_3) $0,05 \text{ mol L}^{-1}$ e determinaram-se as razões entre as absorbâncias lidas a 465 nm e 650 nm (E_4/E_6) e 250 nm e 365 nm (E_2/E_3) (CAMPOS, 2004).

4.3.2 Infravermelho

As análises de infravermelho foram realizadas com um espectrômetro de IV marca SHIMADZU, modelo IR PRESTIGE 21, da Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Preparadas pastilhas com 1 mg de amostra e 100 mg de KBr. Segundo Fialho (2007) devem-se realizar varreduras com 4 cm^{-1} de resolução nos espectros.

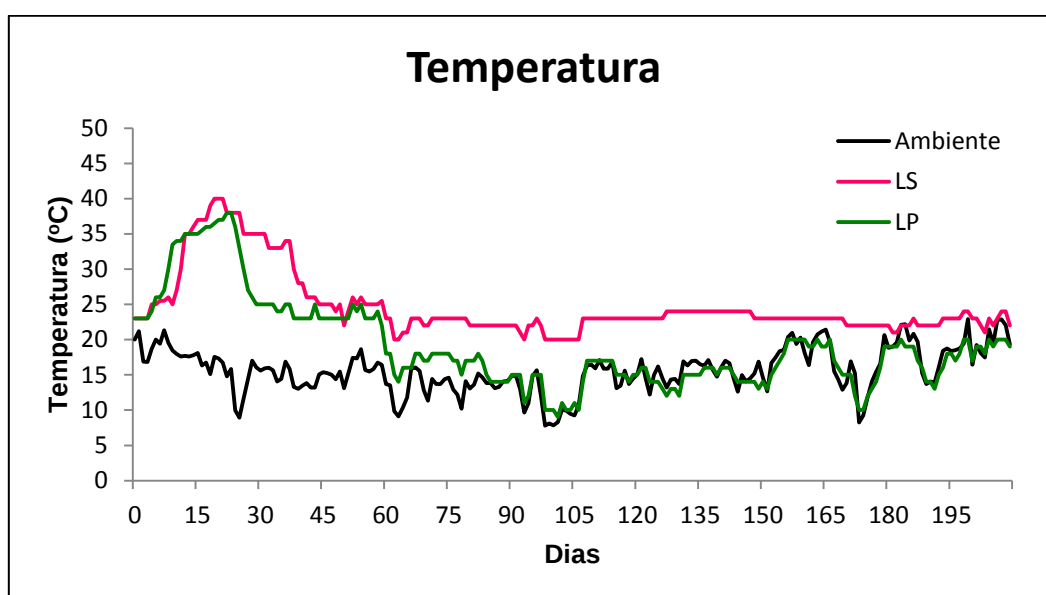
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ANÁLISES FÍSICAS, QUÍMICAS E BIOLÓGICAS

5.1.1 Temperatura

A temperatura foi monitorada a partir do primeiro dia após a montagem das leiras, do dia 6 de abril de 2012, até o dia 01 de novembro de 2013. A Figura 5 traz as curvas de temperatura, na LS e na LP, durante os dias monitorados:

Figura 5 - Variação da temperatura em função do tempo.



Fonte: A autora

A ação dos microrganismos está diretamente ligada à temperatura. O aumento de temperatura indica a evolução do processo de compostagem da matéria orgânica. Inicialmente observa-se um aumento significativo da temperatura. Na LS a temperatura alcançou um pico de 40°C nos dias 20, 21 e 22. A LP obteve

um pico de 38°C nos dias 23 e 24. Observa-se, portanto que a compostagem nas duas leiras não alcançou a fase termofílica, mantendo-se na fase mesofílica. Na LS houve queda na temperatura a partir do dia 27, marcando o início da fase de resfriamento do processo, demonstrando uma diminuição das atividades biológicas.

A partir do dia 60 observam-se temperaturas praticamente constantes até o final do processo, em média 23°C, sendo esta a fase de maturação e estabilização do processo. No dia 26 observou-se o início da fase de resfriamento na LP, seguido por temperaturas praticamente iguais as ambientes. A grande redução de volume observado na LP pode ter levado a perda do calor do interior da leira para o ambiente.

O fato de as curvas de temperatura não atingirem a fase termofílica pode ser devido ao volume de material não ter sido suficiente para manter temperaturas elevadas (FIALHO, 2007).

Na LS observou-se que a temperatura manteve-se acima de 35°C durante aproximadamente de 30 dias.

O parâmetro temperatura é frequentemente usado para controlar a eficiência do processo de compostagem e tem sido a chave dos fatores ambientais que afetam a atividade biológica. Em geral, para cada grupo de organismos existe uma temperatura ambiente ótima e qualquer desvio desse valor manifesta-se por um declínio no crescimento e na atividade do organismo (GOLUEKE, 1977).

Na fase mesofílica da compostagem, com temperaturas entre 15°C a 45°C, as bactérias mesofílicas são mais eficientes do que as termofílicas e a compostagem é mais rápida quando em condições mesofílicas.

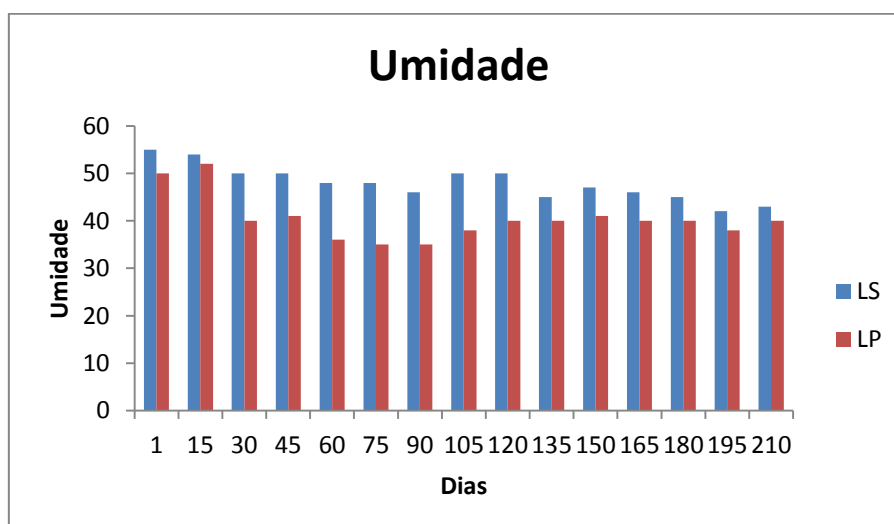
A fase termofílica, com temperaturas acima dos 45°C, a grande vantagem reside no fato de ser possível eliminar os microrganismos patogênicos através da elevação da temperatura.

Altas temperaturas por um curto espaço de tempo, ou baixas temperaturas por longos períodos são igualmente eficientes na eliminação dos microrganismos patogênicos nos resíduos orgânicos (GOLUEKE, 1977).

5.1.2 Umidade

O teor de umidade foi monitorado a cada 15 dias e os resultados estão apresentados na Figura 6. A umidade na LS manteve-se entre 42 e 45%. Para a LP observou-se valores baixos de umidade durante o processo, a umidade manteve-se entre 35 e 52%. Assim como a perda de calor na LP, a baixa umidade pode ser explicada pela redução no volume de massa da leira.

Figura 6 - Variação da umidade em função do tempo.



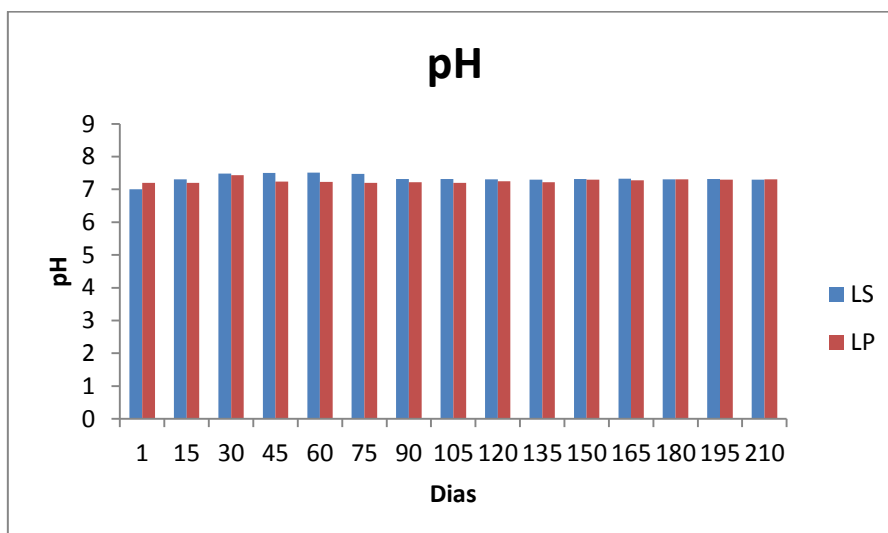
Fonte: A autora

Lelis (1999); Lelis et al., (1999) e Pereira Neto (1996) verificaram que a maior velocidade de degradação ocorre quando a matéria orgânica é compostada com teores de umidade situados entre 40 e 60%. A faixa ideal de umidade para processo de compostagem é entre 40 e 60% para Liang et al., (2003) e Tiquia (2005).

5.1.3 pH

Os valores de pH foram monitorados quinzenalmente. Observa-se na Figura 7 que os valores de pH nas LS e LP mantiveram-se próximos a neutralidade durante todo o processo. Valores entre 7 e 8 são considerados ideais para compostos estabilizados, assim os valores observados estão de acordo com o esperado.

Figura 7 - Variação do pH em função do tempo.



Fonte: A autora

Heck et al. (2013) observou, durante o processo de compostagem de lodo de ETE, variação do pH entre 6,7 e 7,5. Resultados semelhantes foram encontrados em trabalhos de Kalamdhad & Kazmi (2009) e Yang et al. (2008).

5.1.4 Razão C/N

A principal influencia da relação C/N está relacionada ao tempo de degradação dos resíduos. Quanto maior esta relação, maior será o tempo de decomposição, e quanto menor for esta relação menor será o tempo de decomposição (INÁCIO; MILLER, 2009).

Na construção de uma pilha de compostagem é frequente utilizar uma mistura de materiais ricos em carbono com outros ricos em nitrogênio. Os materiais ricos em carbono fornecem a matéria orgânica e a energia para a compostagem e os materiais nitrogenados aceleram o processo de compostagem, porque o nitrogênio é necessário para o crescimento dos microrganismos. Genericamente, quanto mais baixa é a relação C/N mais rapidamente termina a compostagem.

O lodo, de forma geral, é um resíduo rico em nitrogênio, apresentando relação C/N entre 5/1 e 11/1. Assim, necessita de um material estruturante rico em carbono e pobre em nitrogênio, para que a mistura apresente relação C/N em torno de 20/1 ou 30/1 (PINTO, 2010; FERNANDES, 1999).

De modo geral, para a compostagem do lodo de esgoto, um bom agente estruturante deve apresentar baixo teor de nitrogênio para permitir equilibrar a relação C/N da mistura final.

A relação C/N do substrato serragem usado na LS é de aproximadamente 490/1 favorecendo o uso desse substrato, rico em carbono, para a compostagem do lodo de esgoto. Para o substrato de poda, usado na LP a razão C/N é de 46/1. (FERNANDES et al., 1988).

A razão C/N é um indicador da capacidade de degradação dos resíduos pelos microrganismos, sendo considerada a faixa entre 25 a 40 como a ideal para o início do processo de biodecomposição (FIALHO, 2007; TUOMELA, et al., 2000).

No entanto, pesquisas recentes têm realizado com sucesso compostagem com baixas razões de C/N iniciais. Compostagem com proporções iniciais de C/N inferiores podem aumentar a quantidade de material tratado (GAO et al., 2010).

Estudos de sucesso com baixa razão C/N inicial foram feitos por Kumar et al (2010) que estudaram a compostagem de resíduos de poda e comida com razão C/N inicial de 19,6; Huang et al (2004) compostaram, com uma razão C/N inicial de 15, estrume de porco e serragem; Zhu (2007) obteve compostos estáveis através da compostagem de dejetos suínos e palha de arroz com razão C/N inicial de 20; também Ogunwande et al. (2008) estudou a compostagem de esterco de galinha e serragem com razão C/N de 20.

Observou-se para a LP uma razão C/N de 10,5 com 180 dias de compostagem. Os baixos índices de umidade e temperatura observados na LP podem ser fatores determinantes para que o processo chegasse a um valor de C/N adequado com mais tempo de compostagem.

Para a LS observou-se uma razão C/N de 16,77, com 90 dias de compostagem, o que está de acordo com os resultados de UV/Vis e IV, que, com este tempo de compostagem, mostram que o composto já estava estabilizado.

5.1.5 Germinação de sementes

Obteve-se uma taxa de germinação de 87,5% para compostos da LS e de 62,5% para LP.

A taxa de germinação da LP de 62,5% pode ser relacionada com a menor razão C/N encontrada para esse composto. GUO et al (2012) concluiu que a taxa de germinação em compostos com menor razão C/N é mais baixo, sugerindo que o tempo de compostagem para obtenção de composto maturado é maior. Este resultado também é semelhante ao encontrado por Huang et al. (2004).

Para LS, a taxa de germinação de 87,5% observada mostra um composto maturado com 100 dias de compostagem, o que está de acordo com os resultados da razão C/N, UV/Vis e Infravermelho encontrados.

Segundo Tiquia e Tam, (1998) uma taxa de germinação superior a 80% indica compostos livres e maduros.

As Figuras 8 e 9 mostram as sementes germinadas de alface nos compostos obtidos da LS e LP:

Figura 8 - Germinação de sementes de alface no composto da LS.



Fonte: A autora

Figura 9 - Germinação de sementes de alface no composto da LP.



Fonte: A autora

5.1.6 Determinação de metais

Determinou-se a quantidade dos metais: cobre, manganês, zinco, ferro, chumbo, cromo, cobalto, prata e cádmio, nos compostos da LS e LP com 100 dias de compostagem. A concentração dos metais encontradas nas amostras da LP e LS e os limites permitidos pela CONAMA 375 de 2006, que dispõe sobre o uso agrícola do lodo de esgoto e seus derivados, estão descritos na Tabela 3:

Tabela 3 - Concentrações de metais encontradas nos compostos da LS e LP.

Substâncias Inorgânicas	Concentração na LP (mg/kg)	Concentração na LS (mg/kg)	Concentração Máxima permitida (mg/kg)
Manganês	135,4812 ± 0,0698	224,9339 ± 0,1155	**
Ferro	4141,0616 ± 0,0043	21473,4822 ± 0,0665	**
Cádmio	*	*	39

Chumbo	$3,5584 \pm 0,4302$	$50,2485 \pm 0,2355$	300
Cobre	$22,4143 \pm 0,0255$	$21,6485 \pm 0,0634$	1500
Cromo	*	*	1000
Cobalto	$11,1882 \pm 0,0180$	$12,1345 \pm 0,0788$	**
Prata	*	*	**
Zinco	$458,5810 \pm 0,0564$	$261,6275 \pm 0,0226$	2800

Fonte: A autora

*Abaixo do limite de detecção.

**Não consta.

Dos metais estudados nenhum apresentou concentrações superiores às permitidas pela Resolução CONAMA 375 de 2006. O composto obtido, do ponto de vista deste parâmetro, atende as exigências para ser utilizado na agricultura.

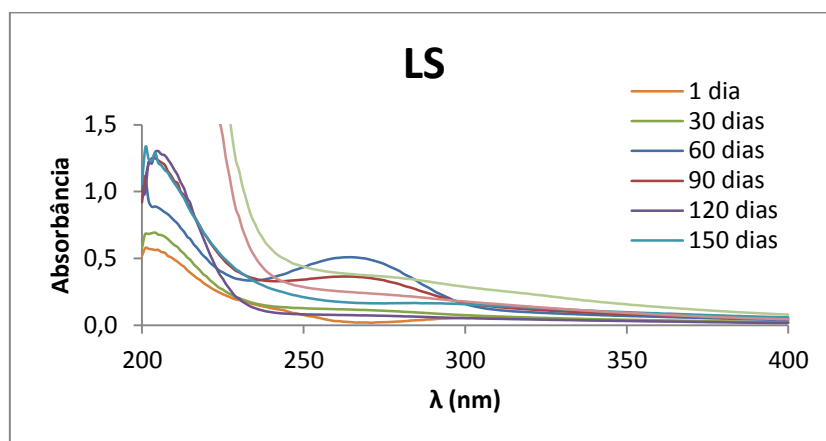
5.2 ANÁLISES ESPECTROSCÓPICAS

5.2.1 Absorção de luz no UV/Vis

Nos espectros de UV/Vis de compostos húmicos as bandas a serem avaliadas são acima de 600 nm, que é um indicativo de composto humificado com um alto grau de estruturas aromáticas e condensadas; entre 400 e 500 nm, que corresponde ao material orgânico no início da humificação; e próximo a 280 nm, observada devido à lignina e quinonas presentes nos materiais no início da transformação (ZBYTNIEWSKI e BUSZEWSKI, 2005).

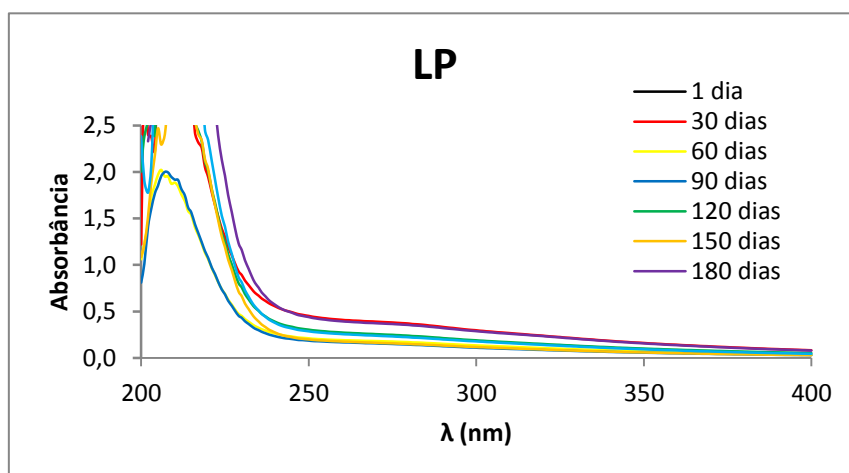
As Figuras 10 e 11 mostram as curvas de absorção de UV/Vis da LS e LP, respectivamente, em intervalos de tempo de 30 dias, na faixa de 200 nm a 400 nm.

Figura 10 - Espectros de absorção UV/Vis de 200 a 400 nm da LS



Fonte: A autora

Figura 11 - Espectros de absorção UV/Vis de 200 a 400 nm da LP.



Fonte: A autora

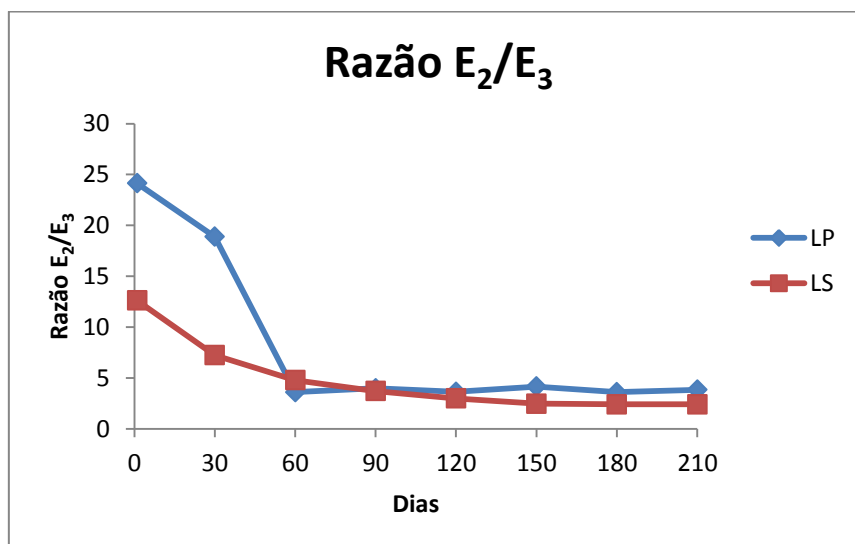
Como foi observado por FIALHO (2007) há uma tendência de aumento da intensidade de absorção em função do tempo. Pode-se observar nos espectros das duas leiras, mais evidenciado na LS 60 e 90 dias, um ombro em aproximadamente 270 nm, que corresponde a moléculas de lignina.

Korshin et al. (1997) diz que grupos aromáticos com vários graus e tipos de substituição, incluindo fenóis e vários ácidos aromáticos monossustituídos e polissustituídos, são as moléculas de matéria orgânica que apresentam a maior

parte dos cromóforos com absorção na região do ultravioleta ($\lambda < 400$ nm). Essas moléculas estão associadas com a fração húmica da matéria orgânica.

A relação entre as intensidades de absorção em 250 e 365 nm, que correspondem às moléculas mais simples (menos humificadas), foram observadas através das razões E_{250}/E_{365} . A Figura 12 traz as curvas da razão E_2/E_3 para LS e LP em função do tempo.

Figura 12 - Curvas da razão E_2/E_3 em função do tempo.



Fonte: A autora

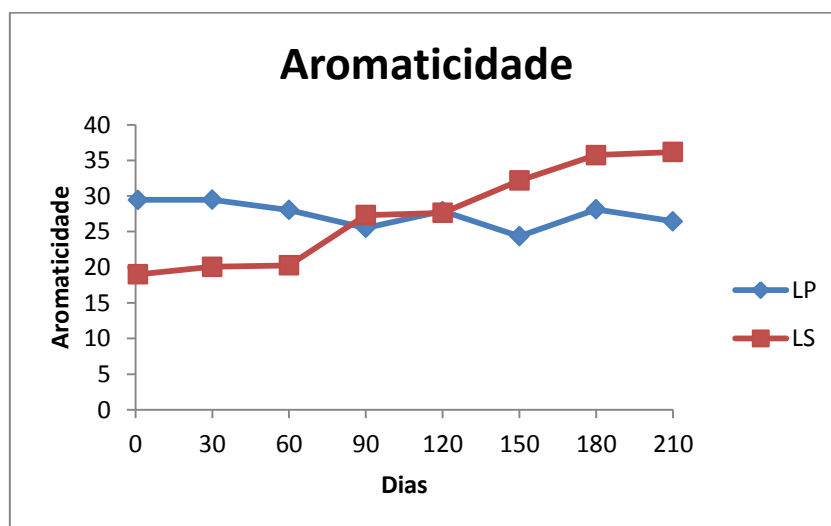
Observa-se uma redução na razão E_2/E_3 nas duas leiras, houve, portanto, a degradação das moléculas com estruturas menos condensadas (FIALHO, 2007), o que se encontra associado à estabilização da matéria orgânica. Para a LP observa-se uma tendência de estabilização completa desse parâmetro a partir dos 60 dias de compostagem. Para a LS a estabilização se dá a partir dos 90 dias de compostagem.

Peuravuori e Pihlaja (1997) sugerem uma equação para determinar o grau de aromaticidade total das estruturas presentes nos compostos utilizando a razão E_2/E_3 :

$$\text{Aromaticidade} = 52,5 - 6,78 \cdot E_2/E_3$$

A Figura 13 apresenta as curvas de aromaticidade total, em função do tempo, para a LP e LS:

Figura 13 - Curvas da aromaticidade total em função do tempo.

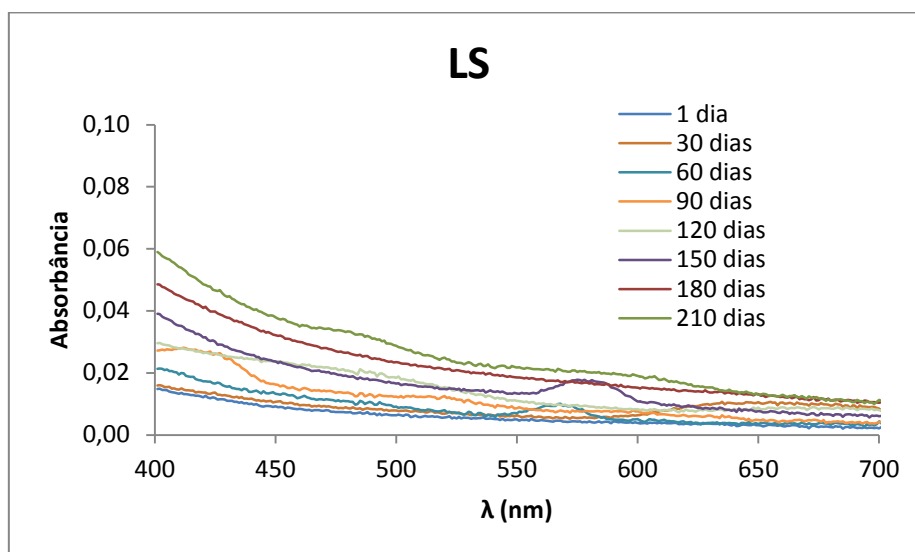


Fonte: A autora

Observa-se um aumento da aromaticidade total na LS em função do tempo, que está relacionado com a degradação e estabilização da matéria orgânica durante o processo (FIALHO, 2007; KORSHIN; CHI-WANG; BENJAMIN, 1997; PEURAVUORI; PIHLAJA, 1997). A LP não apresentou variações conclusivas desse índice.

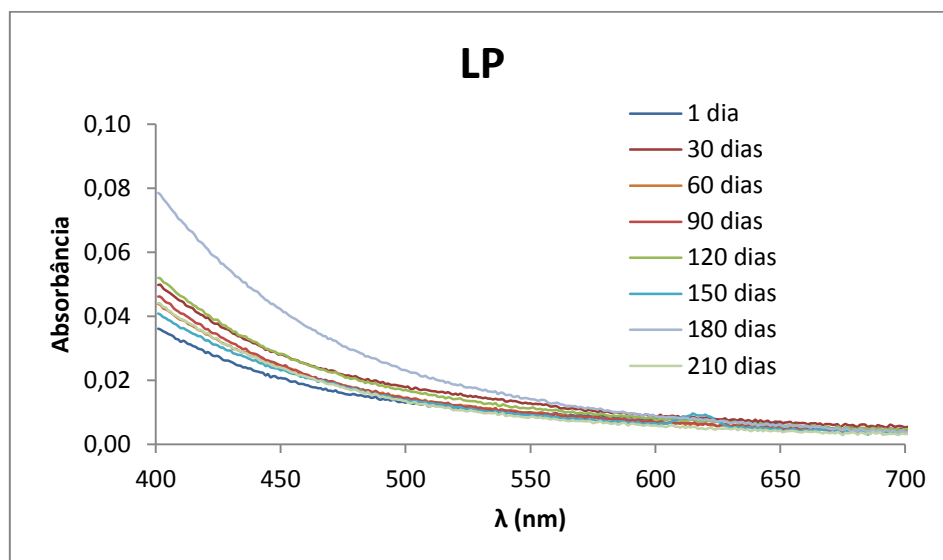
As Figuras 14 e 15 apresentam as curvas de absorção de UV/Vis, em vários tempos diferentes, na faixa de 400 nm a 700 nm para a LP e LS, respectivamente:

Figura 14 - Espectros de absorção UV/Vis de 400 a 700 nm da LS.



Fonte: A autora

Figura 15 - Espectros de absorção UV/Vis de 400 a 700 nm da LP.

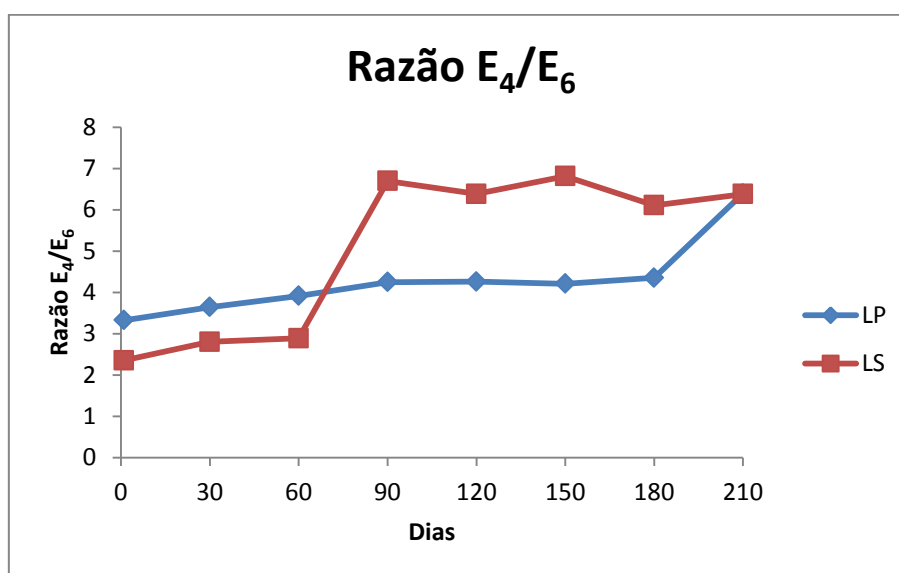


Fonte: A autora

Observa-se nesses espectros da LP e LS que também houve um aumento da intensidade de absorção em função do tempo.

A partir das curvas de absorção calculou-se a razão E_{465}/E_{665} para a LS e LP, que relaciona a intensidade de absorção nos comprimentos de onda de 465 e 665 nm. Como mostra a Figura 16 observou-se um aumento dessa relação em função do tempo. Na LS pode-se dizer que a estabilização desse parâmetro deverá ocorrer após 90 dias de compostagem. Na LP com 180 dias de processo ainda observa-se a elevação deste parâmetro.

Figura 16 - Curvas da razão E_4/E_6 em função do tempo.



Fonte: A autora

Valores para a razão E_4/E_6 entre 6,3 e 7,5 foram encontrados para compostos produzidos a partir da compostagem de resíduos orgânicos segundo Ouattmane et al. (2002). Para LS, em 90 dias de compostagem encontrou-se o valor de 6,69 e para LP o valor encontrado foi de 6,39 em 210 dias de compostagem.

Jerzykiewicz et al. (1999); Baddi et al. (2004) e Fuentes et al. (2006) observaram um aumento da razão E_4/E_6 em função do tempo de compostagem. Isso se dá devido ao processo de oxidação e ao aumento do conteúdo de estruturas

aromáticas com grupos funcionais oxigenados (CHEFETZ et al., 1996; CHEFETZ et al., 1998b). Senesi et al. (2007) associa a alta razão E_4/E_6 com a presença de moléculas orgânicas de baixa massa molecular ou estruturas mais alifáticas com alto conteúdo de grupos funcionais, como os carboxílicos.

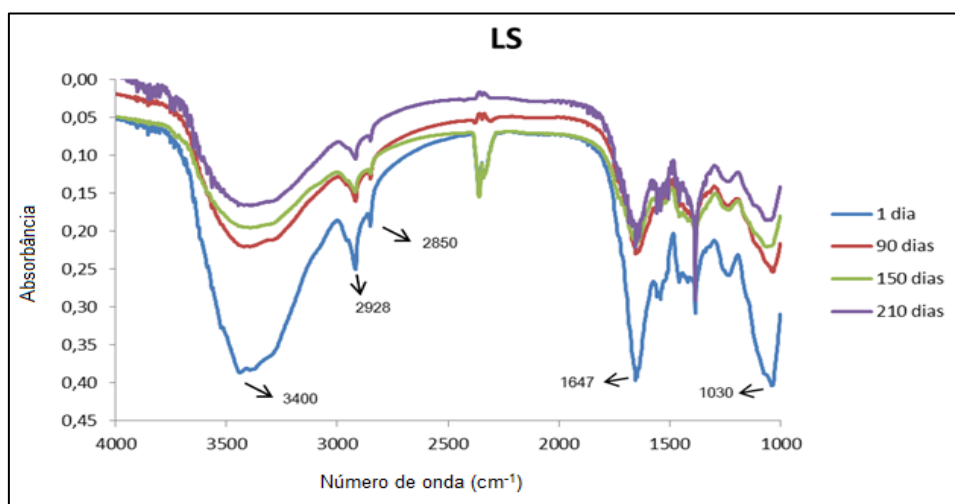
Pajaczowska et al. (2003), verificaram que o valor da razão E_4/E_6 aumenta durante o processo de humificação de lodo de esgoto, caracterizando um aumento de grupos funcionais oxigenados.

Em estudo semelhante, Pedra et al. (2007), também constataram o aumento da razão E_4/E_6 durante o processo de compostagem de lodo de esgoto.

5.2.2 Infravermelho

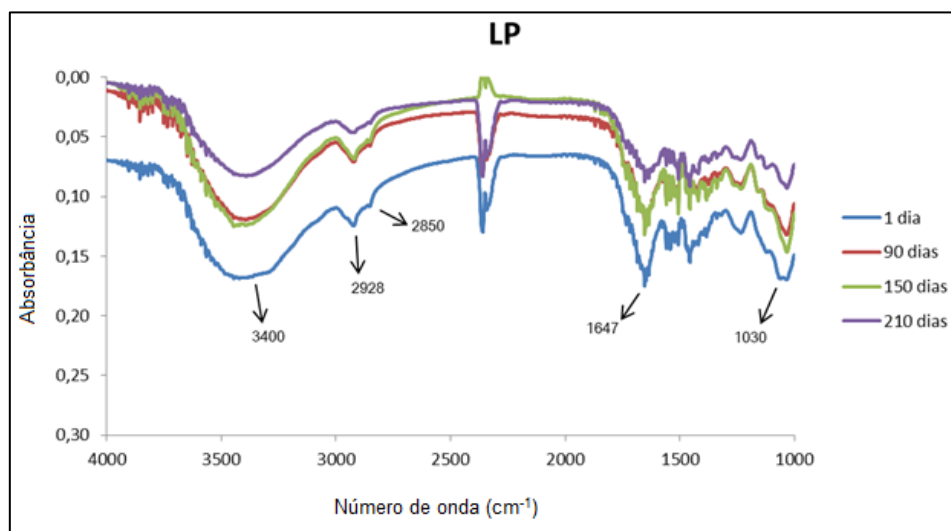
As Figuras 17 e 18 apresentam os espectros de absorção de IV para LS e LP, respectivamente, em diferentes tempos:

Figura 17 - Espectro de IV em diferentes tempos para LS.



Fonte: A autora

Figura 18 - Espectro de IV em diferentes tempos para LP.



Fonte: A autora

Observaram-se bandas características nos espectros da LS e LP. Segundo Skoog et al., 2002; Stevenson, 1994; Silverstein et al., 2007 e Mikki et al., 1997, essas bandas podem ser atribuídas aos grupos:

- 3386- 3412 cm^{-1} : estiramento de OH e NH;
- 2928 - 2930 cm^{-1} : estiramento assimétrico de C alifático;
- 2750 - 2850 cm^{-1} : estiramento de C do grupo CHO (aldeído);
- 1630 - 1652 cm^{-1} : estiramento C=C dos anéis aromáticos, estiramento C=O e deformação N-H das amidas primárias e estiramento assimétrico C-O dos íons COO^- ;
- 1010 - 1135 cm^{-1} : estiramento C-O de polissacarídeos.

Os espectros da LS e a LP apresentam uma banda larga na região de 3.400 cm^{-1} devido ao estiramento OH; em 2.928 cm^{-1} uma banda referente ao estiramento assimétrico de C alifático; e em 2850 cm^{-1} uma banda que corresponde ao estiramento de C do grupo CHO (aldeído).

Na região de 1.647 cm^{-1} observa-se uma banda característica de aromáticos, atribuída ao estiramento C=C do anel, às vibrações de anel aromático conjugado com C=O e/ou COO^- e em 1.030 cm^{-1} observa-se uma banda relativa ao estiramento C-O de polissacarídeos.

Maia et al. (2012) observou, nos espectros de IV de substâncias obtidas da compostagem de lodo de esgoto e serragem, grupos hidroxila, aromático, carboxilato e alquila.

Martins (2009) observou resultados semelhantes quando estudou os espectros de IV de solos tratados com efluentes de esgoto tratado.

Na LS houve uma diminuição na intensidade de absorção na faixa de 2928 cm^{-1} , correspondente às cadeias alifáticas no tempo de 90 dias de compostagem, o que está de acordo com o tempo de estabilização visto nos espectros de UV/Vis para o tempo de 90 dias para LS (razão E_2/E_3 e razão E_4/E_6) e para a relação C/N que no tempo de 90 dias já apresentou valor ideal para composto estabilizado. Para esse tempo, a temperatura também indicava que o processo já estava em fase de estabilização.

Na LP observou-se uma diminuição na intensidade de absorção na faixa de 2928 cm^{-1} no tempo de 60 dias, correspondendo com o tempo de estabilização encontrado no parâmetro razão E_2/E_3 . Porém para o parâmetro razão E_4/E_6 , o valor adequado para composto estabilizado só foi atingido com 210 dias de compostagem, assim como um valor adequado da razão C/N, que foi atingido com 180 dias de processo.

Houve uma intensa diminuição do pico em 1.030 cm^{-1} na LP e LS, indicando a degradação dos carboidratos, o que está de acordo com o processo de estabilização da matéria orgânica (FIALHO, 2007).

6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos através do monitoramento do processo e da análise dos compostos obtidos da compostagem do lodo de esgoto de uma indústria de alimentos com resíduos de poda e jardinagem e serragem pode-se concluir que houve a degradação da matéria orgânica e sua estabilização e maturação.

O processo não atingiu temperaturas correspondentes à fase termofílica, isso por ser devido à quantidade de resíduos utilizados na montagem das leiras não ter sido suficiente para manter o calor nas mesmas.

A umidade na LS manteve-se dentro dos valores considerados ideais para o processo de compostagem. Na LP observaram-se valores um pouco abaixo do recomendado, o que pode ter resultado num tempo maior de compostagem para obtenção do composto estabilizado para LP.

O pH não apresentou variações significativas durante o processo para as duas leiras estudadas.

Na LP a razão C/N de 10,5 observada com 180 dias de compostagem indica a provável interferência dos baixos índices de umidade e temperatura observados nessa leira, fazendo com que o processo chegasse a um valor de C/N adequado com mais tempo de compostagem.

Para a LS observou-se uma razão C/N de 16,77, com 90 dias de compostagem, o que está de acordo com os resultados de UV/Vis e IV, que, com este tempo de compostagem, mostram que o composto já estava estabilizado.

A taxa de germinação da LP foi de 62,5% podendo ser relacionada com a menor razão C/N encontrada para esse composto. Para LS, a taxa de germinação encontrada foi de 87,5% mostrando um composto maturado com 100 dias de

compostagem, estando em concordância com os resultados da razão C/N, UV/Vis e IV.

O teor dos metais estudados nos compostos da LP e LS estavam abaixo das concentrações máximas permitidas pela Resolução CONAMA 375 de 2006. Portanto, conclui-se que, do ponto de vista deste parâmetro, os compostos atendem as exigências para serem utilizados na agricultura.

Observou-se uma redução na razão E_2/E_3 nas duas leiras associado à estabilização da matéria orgânica. Para esse parâmetro, com 60 dias de compostagem, o composto da LP estava estabilizado, o que não está de acordo com outros parâmetros estudados. Para a LS a estabilização se dá a partir dos 90 dias de compostagem, o que está em consonância com os outros parâmetros estudados.

No composto obtido da LS observou-se um aumento da aromaticidade total em função do tempo, que está relacionado com a estabilização da matéria orgânica. Os resultados encontrados da aromaticidade total do composto da LP não apresentaram variações conclusivas.

Nos compostos da LS e LP observou-se o aumento da razão E_4/E_6 em função do tempo de compostagem devido ao aumento no número de grupos funcionais oxigenados presentes, característico para o processo de compostagem de lodo de esgoto. Segundo esse parâmetro o composto da LS estava estabilizado com 90 dias de compostagem; já para o composto da LP a estabilização deu-se com 210 dias de compostagem.

Para o composto da LS, observando os resultados obtidos, conclui-se que com 90 dias de compostagem o composto estava estabilizado e maturado. Já para o composto da LP acredita-se que a estabilização ocorreu com um tempo maior de compostagem, após os 180 dias.

Pode-se concluir finalmente que ambos os compostos obtidos encontram-se estabilizados e maturados, porém com diferentes tempos de compostagem. A leira com serragem como substrato (LS) apresentou um melhor resultado, sendo a mistura mais indicada para o processo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil – 2010**. São Paulo, 2011.

ANDREOLI, C.V.; FERNANDES, F.; DOMASZAK, S.C. **Reciclagem agrícola do lodo de esgoto**. SANEPAR, Curitiba, 1997.

ATKINS, P.; JONES, L. **Princípios de química: questionando a vida moderna e o meio ambiente**. 3ª edição, Ed. Bookman, Porto Alegre, 2006.

BARROS, I. T.; ANDREOLI, C. V.; JUNIOR, I. G. S.; COSTA, A. C. S. **Avaliação agrônômica de biossólidos tratados por diferentes métodos químicos para aplicação na cultura do milho**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental, V.15, N.6, 2011.

BERNAL, M. P.; PAREDES, C.; SÁNCHEZ-MODENERO, M. A.; CEGARRA, J. **Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes**. Bioresource Technology, V. 63, p. 91-99, 1998c.

BERNAL, M. P.; SÁNCHEZ-MODENERO, M. A.; PAREDES, C.; ROIG, A. **Carbon mineralization from organic wastes at different composting stages during their incubation with soil**. Agriculture Ecosystems & Environment, V. 69, p. 175–189, 1998a.

BETTIOL, W; CAMARGO, O. A. **Impacto ambiental do uso do lodo de esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, p. 312, 2000.

BISHOP, P. L., GODFREY, C. **Nitrogen transformation during sewage composting**. Biocycle, V. 24, p. 34–39, 1983.

BORGES, E. S. M.; GODINHO, V. M.; BEJAR, D. O.; CHERNICARO, C. A. L. **Thermal treatment of anaerobic sludge utilizing biogas produced in UASB reactors: evaluation of system self-sustainability and the effect on sludge hygienization and dehydration**. Engenharia Sanitária Ambiental. V. 14 N. 3, 2009.

CAMPOS, S. X. **Influência das substâncias húmicas de diferentes massas molares na coagulação, floculação e sedimentação no tratamento de água**. 2004. 123 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 2004.

CARRIJO, O. A.; VIDAL, M. C.; REIS, N. V. B.; SOUZA, R. B.; MAKISHIMA, N. **Produtividade do tomateiro em diferentes substratos e modelos de casas de vegetação**. Horticultura Brasileira, V. 22, N.1, p. 05-09, Brasília, 2004.

CARVALHO, P.C.T.; MELFI, A.J.; MELO, W.J.; MARQUES, M.O. **Biossólidos na agricultura**. 2ª edição, São Paulo, ABES, 2002.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL **Aplicação de biossólidos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas**: Critérios para projeto e operação: Norma P 4230, São Paulo, 1999.

CHEFETZ, B.; HATCHER, P. G.; HADAR, Y.; CHEN, Y. **Characterization of dissolved organic matter extracted from composted municipal solid waste**. Soil Science Society of America, V. 62, p. 326-332, 1998a.

CHEFETZ, B.; HATCHER, P. G.; HADAR, Y.; CHEN, Y. **Chemical and biological characterization of organic matter during composting of municipal solid waste**. Journal of Environmental Quality, V. 25, p. 776-785, 1996.

CHEN, Y. **Nuclear magnetic resonance, infra-red and pyrolysis: application of spectroscopic methodologies to maturity determination of composts**. Compost Science & Utilization, V. 11, N. 2, p. 152-168, 2003.

CHEN, Y.; SENESI, N.; SCHNITZER, M. **Information provided on humic substances by EJEa ratios**. Soil Science Society of America, V. 41, p. 352-358, 1977.

COLODRO, G.; ESPÍNDOLA, C. R. **Alterações na fertilidade de um latossolo degradado em resposta à aplicação de lodo de esgoto**. Scientiarum Agronomy, V. 28, 2006.

CONAMA. *Conselho Nacional do Meio Ambiente - Resolução nº 375 de 2006*.

COSTA, M.S.S. de M.; COSTA, L.A. de M.; SESTAK, M.; OLIBONE, D.; SESTAK, D.; KAUFMANN, A.V.; ROTTA, S.R. **Compostagem de resíduos da indústria de desfibrilação de algodão**. Engenharia Agrícola, V. 25, N. 2. Jaboticabal, 2005.

DAS, K.; KEENER, H. M. **Moisture effect on compaction and permeability in composts**. J. Environ. Eng. 123, p. 275–281, 1997.

DIAS, B.; SILVA C. A.; SOARES, E. M. B.; BETTIOL, W.; GUERREIRO, M. C.; BELIZÁRIO, M. H. **Infravermelho na caracterização de ácidos húmicos de latossolo sob efeito de uso contínuo de lodo de esgoto**. Revista Brasileira de Ciências do Solo. V. 33, N. 4. Viçosa, 2009.

DING, L.; JING, H.; QIN, B.; QI, L.; LI, J.; WANG, T.; LIU, G. **Regulation of cell division and growth in roots of *Lactuca sativa* L. seedlings by the ent-kaurene diterpenoid rhabdosin B**. Journal of Chemical Ecology, V. 36, N. 5, 2009.

DORES-SILVA, P. R.; LANDGRAF, M. D.; REZENDE, M. O. **Processo de estabilização de resíduos orgânicos: vermicompostagem versus compostagem**. Química Nova, V. 36, N. 05. São Paulo, 2013.

DUARTE, R.F; SAMPAIO, R. A.; JUNIOR, D. S. B.; SILVA, H. P.; PARREIRAS, N. S.; NEVES, J. M. G. **Crescimento inicial de mudas de *Acacia mangium* cultivadas em mantas de fibras de coco contendo substrato de lodo de esgoto**. Revista Árvore, V. 35, N. 1, Viçosa, 2011.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Environmental Regulations and Technology Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge - **EPA 625/R – 92/013 de 1992**.

FERNANDES, F.; SOUZA, S. G. de. *Estabilização de Lodo de Esgoto*. In: ANDREOLI, C. V. (Coord.). *Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final*. Rio de Janeiro: ABES, 2001.

FERNANDES, P. A. L. **Estudo comparativo e avaliação de diferentes sistemas de compostagem de resíduos sólidos urbanos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Coimbra: Universidade de Coimbra, 1999.

FIALHO, L. L. **Caracterização da matéria orgânica em processo de compostagem por métodos convencionais e espectroscópicos**. Tese (Doutorado em Ciências – Química Analítica) – São Carlos: Instituto de Química de São Carlos - Universidade de São Paulo, 2007.

FIESP (**Federação das Indústrias do Estado de São Paulo**), 2009. Disponível em: http://www.fiesp.com.br/ambiente/area_tematicas/residuos.aspx. Acesso em: 25 de janeiro de 2012.

FUENTES, M.; BAIGORRI, R.; GARCIA, J. M. **The complementary use of ¹H NMR, ¹³C NMR, FTIR and size exclusion chromatography to investigate the principal structural changes associated with composted organic materials with diverse origin**. Organic Geochemistry, V. 38, 2007.

GAO, M., LI, B., YU, A., LIANG, F., YANG, L., SUN, Y. **The effect of aeration rate on forced-aeration composting of chicken manure and sawdust**. Bioresour Technol, 2010.

GIL, V. M.; GERALDES, C. F. G. C. **Ressonância magnética nuclear: fundamentos, métodos e aplicações**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1987.

GRIGATTI, M.; CIAVATTA, C.; GESSA, C. **Evolution of organic matter from sewage sludge ad garden trimming during composting.** Bioresource Technology, V. 91, p. 163-169, 2004.

GUO, R.; LI, G.; JIANG, T.; SCHUCHARDT, F.; CHEN T.; ZHAO, Y.; SHEN, Y. **Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost.** Bioresource Technology, 2012.

HECK, K.; MARCO, E. G.; HAHN, A. B. B.; KLUGE, M.; SPILKI, F. R.; VAN DER SAND, S. **Temperatura de degradação de resíduos em processo de compostagem e qualidade microbiológica do composto final.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental, V. 17, N. 1, 2013.

HSU, J. H.; LO, S. L. **Chemical and spectroscopic analysis of organic matter transformations during composting of pig manure.** Environmental Pollution, V. 104, p. 189-196, 1999.

HUANG, G.F.; WONG, J.W.C.; WE, Q.T.; NAGAR, B.B. **Effect of C/N on composting of pig manure with sawdust.** Waste Manage, 2004.

INÁCIO, C.T, MILLER, P.R.M. **Compostagem: Ciência e pratica aplicadas a gestão de resíduos.** Embrapa Solos. Rio de Janeiro, 2009.

JEONG, Y. K.; KIM, J. S. **A new method for conservation of nitrogen in aerobic composting processes.** Bioresource Technology, V. 79, p. 129-133, 2001.

JOURAIPHY, A.; AMIR, S.; GHAROUS, M. E.; REVEL, J. C.; HAFIDI, M. **Chemical and spectroscopic analysis of organic matter transformation during composting of sewage sludge and green plant waste.** International Biodeterioration & Biodegradation, V. 56, p. 101-108, 2005.

JUNIO, G. R. Z.; SAMPAIO R. A.; SANTOS, G. B.; NASCIMENTO, A. L.; PRATES, F. B. S.; FERNANDES, L. A. **Metais pesados em milho fertilizado com fosfato natural e composto de lodo de esgoto.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental, V. 15, N. 10, 2011.

KALAMDHAD, A. S.; KAZMI, A. A. **Rotary drum composting of different organic waste mixtures.** Waste Management & Research, V. 27, 2009.

KEENER, H. M.; DICK, W. A.; HOITINK, H. A. J. **Composting and beneficial utilization of composted by-product materials.** In: Dick, W.A. (Ed.), Land Application of Agricultural, Industrial, and Municipal By-Products. Soil Science Society of America, Inc., Madison, p. 315–341, 2000.

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

KUMAR, M.; OU YAN L.; LIN J.G. **Co-composting of green waste and food waste at low C/N ratio.** Waste Manage, 2010

LELIS, M. P. N. e PEREIRA NETO, J. T. A Influência da Umidade na Velocidade de Degradação e no Controle de Impactos Ambientais da “compostagem”. **Anais.** Artigo apresentado no XX Congresso ABES, Rio de Janeiro, 1999.

LELIS, M. P. N. **Influência da Umidade na Velocidade de Degradação e no Controle de Impactos Ambientais da Compostagem.** Dissertação. Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 1998.

LIANG, C.; DAS, K. C.; McCLENDON, R. W. **The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend.** Bioresource Technology, V. 86, p. 131-137, 2003.

LIMA, J. S.; BASTOS, H. F.; ESPÍRITO SANTO, A. A. **Uso de biossólido na recuperação de áreas degradadas no entorno da Caraíba.** Metais. Salvador, 2001.

LOBO, T. F.; FILHO, H. G.; BULL, L. T.; MOREIRA, L. L. Q.; MARTINS R. L. *Effect of management and levels of sewage sludge on soil fertility after three applications.* Bioscience Journal, V. 29, N. 2, 2013.

LÓPEZ, M. J.; ELORRIETA, M. A.; VARGAS-GARCIA, M. C.; SUAREZ-ESTRELLA, F.; MORENO, J. **The effect of aeration on the biotransformation of lignocellulosic wastes by white-rot fungi.** Bioresource Technology, V. 81, p. 123-129, 2002.

MAIA, C.M.B.F.; FUKAMACHI, C.R.B.; PICCOLO, A. MANGRICH, A. S. **EPR and DRIFT spectroscopic characterization of humic fractions during composting of sawdust and paper mill sludge.** Pesquisa Florestal Brasileira, V. 32, N. 70, Colombo, 2012.

MANCINI, *et al.* **Análises termogravimétricas de composto orgânico produzido com restos de comida e lixo de jardim.** Belo Horizonte: ABES, 2007.

MARQUES, M. O.; NOGUEIRA, T. A. R.; FONSECA, I. M.; MARQUES, T. A. **Teores de Cr, Ni, Pb e Zn em Argissolo Vermelho tratado com lodo de esgoto e cultivado com cana-de-açúcar.** Revista de Biologia e Ciências da Terra, V. 7, 2007.

MARTINS, B. H. **Estudos espectroscópicos de matéria orgânica e ácidos húmicos de solos sob adição de efluente de esgoto tratado**. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo – Instituto de Química de São Carlos. São Carlos, 2009.

MILLER, F. C. Composting as a process based on the control of ecologically selective factors. In: Metting, F.B., Jr. (Ed.), **Soil Microbial Ecology, Applications in Agricultural and Environmental Management**. Marcel Dekker, Inc., New York, pp. 515–544, 1992.

OGUNWANDE, G.A.; OSUNADE, K.O.; ADEKALU, K.O.; OGUNJIMI, L.A.O. **Nitrogen loss in chicken litter compost as affected by carbon to nitrogen ratio and turning frequency**. Bioresour Technol, 2008.

OLIVEIRA, A. M. G.; AQUINO, A. M. de; CASTRO NETO, M. T. de. **Compostagem caseira de lixo orgânico doméstico**. Circular Técnica, N. 76, Rio de Janeiro: Embrapa, 2005.

OLIVEIRA, F. C.; MATTIAZZO, M. E. **Metais pesados em latossolo tratado com lodo de esgoto e em plantas de cana-de-açúcar**. Scientia Agrícola, V. 58, 2001.

OUATMANE, A.; D'ORAZIO, V.; HAFIDI, M.; SENESI, N. **Chemical and physicochemical characterization of humic acid-like materials from composts**. Compost Science Land Utilization, V. 10, N. 1, p. 39-46, 2002.

PAJACZKOWSKA, J.; SULKOWSKA, A.; SULKOWSKA, W. W.; JEDRZEJCZYK, A. **Spectroscopic study of the humification process during sewage sludge treatment**. Journal of Molecular Structure, V. 651-653, 2003.

PAULINO, R.C. et al. **Tratamento anaeróbio de esgoto e sua eficiência na redução da viabilidade de ovos de helmintos**. Revista da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical, Uberaba, V. 34, 2001.

PEDRA, F.; PLAZA, C.; PÓLO, A. **Effects of municipal solid waste compost and sewage sludge on chemical and spectroscopic properties of humic acids from a sandy haplic podzol and a clay loam calcic vertisol in Portugal**. Waste Management, V. 28, 2007.

PEREIRA NETO, J. T. **Manual de Compostagem**. Belo Horizonte, 1996

PINTO, M. T. Higienização de lodos. In: ANDREOLLI, C. V.; SPERLING, M.V.; FERNANDES, F. **Lodos de esgoto: tratamento e disposição final**. UFMG. Belo Horizonte. Companhia de Saneamento do Paraná. 4ª Edição, 2010.

PRIMO, M. **Análise da viabilidade de compostagem própria dos resíduos sólidos provenientes da estação de tratamento de efluentes em uma indústria de alimentos.** Monografia (Especialização em Gestão Ambiental) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2009.

PROVENZANO, M. R.; OLIVEIRA, S. C.; SILVA, M. R. S.; SENESI, N. **Assessment of maturity degree of composts from domestic solid wastes by fluorescence and Fourier transform infrared spectroscopies.** Journal of Agricultural and Food Chemistry, V. 49, p. 5874-5879, 2001.

PULLICINO, D. S. **Chemical and spectroscopic analysis of organic matter transformations during composting of municipal solid waste.** Degree of master of science, Department of Chemistry, University of Malta. Malta: University of Malta, 2002.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. **A Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais.** Campinas: Instituto Agrônômico, 2001.

RODRIGUES, L. C. A.; BARBOSA, S.; PAZIN, M.; MASELLI, B. S.; BEIJO, L. A.; KUMMROW, F. **Fitotoxicidade e citogenotoxicidade da água e sedimento de córrego urbano em bioensaio com *Lactuca sativa*.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental. V. 17, N. 10, 2013.

ROSA, A. H.; SIMÕES, M. L.; OLIVEIRA, L. C.; ROCHA, J. C.; MARTIN-NETO, L.; MILORI, D. M. B. P. **Multimethod study of the degree of humification of humic substances extracted from different tropical soil profiles in Brazil's Amazonian region.** Geoderma, V. 27, p. 1-10, 2005.

SÁNCHEZ-MONEDERO, M. A.; CEGARRA, J.; GARCÍA, D. ROIG, A. **A Chemical and structural evolution of humic acids during organic waste composting.** Biodegradation, V. 13, p. 361-371, 2002.

SENESE, N.; PLAZA, C.; BRUNETTI, G.; POLO, A. **A comparative survey of recent results on humic-like fractions in organic amendments and effects on native soil humic substances.** Soil Biology & Biochemistry, V. 39, p. 1244-1262, 2007.

SILVA, C. J. C.; LIMA, M. G. S.; CARVALHO, C. M.; ELOI, W. M.; PEDROZA, M. M.; SILVA, C. J. C. **Efeito do lodo de estação de tratamento de despejos de curtume na fase inicial do crescimento do milho.** Revista de Biologia e Ciências da Terra, V. 5, 2005.

SILVA, W. T. L. **Método de aproveitamento bioossólido proveniente de lodo de esgoto residencial através de processo de compostagem seguido de biodigestão anaeróbia**. Embrapa Instrumentação Agropecuária, p. 50, São Carlos, 2004.

SILVERSTEIN, R. N.; WEBSTER, F. X.; KIEMLE, D. J. **Identificação espectrométrica de compostos orgânicos**. 7ª edição, Editora LTC, Rio de Janeiro, 2007.

SOUZA, S. A. M. **Biotestes na Avaliação da Fitotoxicidade de Extratos Aquosos de Plantas Medicinais Nativas do Rio Grande do Sul**. Monografia. Curso de Ciências Biológicas do Instituto de Biologia da Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2005.

STEVENSON, F. J. **Humus chemistry: genesis, composition, reactions**. 2ª edição, 1994.

TIQUIA, S. M. **Microbiological parameters as indicators of compost maturity**. Journal of Applied Microbiology, V. 99, p. 816-828, 2005.

TIQUIA, S. M. **Reduction of compost phytotoxicity during the process of decomposition**. Chemosphere, 2010.

TIQUIA, S. M.; TAM, N. F. Y.; HODGKISS, I. J. **Effects of turning frequency on composting of spent pig-manure sawdust litter**. Bioresource Technology, V. 62, p. 37-42, 1997.

TIQUIA, S.M., TAM, N.F.Y. **Elimination of phytotoxicity during co-composting of spent pig-manure sawdust litter and pig sludge**. Bioresour Technol, 1998.

TRANNIN, I. C. B.; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S. **Avaliação agrônômica de um bioossólido industrial para cultura do milho**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, V. 40, 2005.

TRAUTMANN, N.; OLYNCIW, E. Compost Microorganisms. In: CORNELL Composting, **Science & Engineering**, 2005. Disponível em: <<http://compost.css.cornell.edu/microorg.html>>. Acesso em: 25 de janeiro de 2012.

TUOMELA, M.; VIKMAN, M.; HATAKKA, A.; ITAVAARA, M. **Biodegradation of lignin a compost environment: a review**. Bioresource Technology, V. 72, p. 169-183, 2000.

VAN GINKEL, J. T.; VAN HANEGHEM, I. A.; RAATS, P. A. C. **Physical properties of composting material: gas permeability, oxygen diffusion coefficient and thermal conductivity.** Biosystems Engineering. V. 81, N. 1, p. 113-125, 2002.

VAZ, L. M. S.; GONÇALVES, J. L. M. **Uso de biossólidos em povoamento de eucalipto: efeito em atributos químicos do solo, no crescimento e na absorção de nutrientes.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, V. 26, 2002.

VIEIRA, R.D.; CARVALHO, N.M. **Testes de vigor de sementes.** São Paulo. Funep, 1994.

WILKE, B. M.; RIEPERT, F.; KOCH, C.; KÜHNE, T. **Ecotoxicological characterization of hazardous wastes.** Ecotoxicology and Environmental Safety. V. 70, 2008.

WILLIAMS, S. **Official methods of analysis of the associations official analytic chemists.** 14^a edição, 1984.

YANG, Y.; ZHANG, X.; YANG, Z.; XI, B.; LIU, H. **Turnover and loss of nitrogenous compounds during composting of food wastes.** Frontiers of Environmental Science & Engineering in China, V.2, 2008.

ŽALTAUSKAITĖ, J.; ČYPAITĖ, A. **Assessment of landfill leachate toxicity using higher plants** Assessment of landfill leachate toxicity using higher plants. Environmental Research - Engineering and Management, V. 46, 2008.

ZBYTNIIEWSKI, R.; BUSZEWSKI, B. **Characterization of natural organic matter (NOM) derived from sewage sludge compost. Part 1: chemical and spectroscopic properties.** Bioresource Technology, V. 96, p. 471-478, 2005.

ZHU, N. **Effect of low initial C/N ratio on aerobic composting of swine manure with rice straw.** Bioresour Technol, 2007.