

Compostagem de resíduos agrícolas

Francine Conceição de Andrade

Cláudio Brigano

Tatiane Cristina Dal Bosco

Resumo: A expansão da produção agrícola brasileira tem resultado também no aumento da geração de resíduos sólidos, sendo necessários estudos para viabilizar a sua destinação final adequada. A compostagem é uma técnica que pode ser empregada no tratamento dos resíduos orgânicos. No entanto, sua operação, em especial os revolvimentos para garantir a aeração do sistema, requer mão de obra e, muitas vezes, maquinários, o que pode dificultar/inviabilizar sua realização. Dessa maneira, o desenvolvimento de um sistema de fácil manejo dos resíduos orgânicos se torna necessário. Neste capítulo serão relatados os resultados do projeto que objetivou avaliar o processo de compostagem de resíduos orgânicos gerados em uma unidade de pesquisa agrícola, comparando dois sistemas: controlado (com aeração e irrigação) e natural (sem aeração e irrigação). Foram testados os seguintes tratamentos: T11 – Resíduos orgânicos da coleta seletiva + grãos de soja com palha de soja (controlado); T12 – Resíduos orgânicos da coleta seletiva + grãos de soja com palha de soja (natural); T21 – Resíduos orgânicos da coleta seletiva + grãos de soja com palha de trigo (controlado); T22 – Resíduos orgânicos da coleta seletiva + grãos de soja com palha de trigo (natural); T31 – Resíduos orgânicos da coleta seletiva + grãos de soja com poda de árvore (controlado); T32 – Resíduos orgânicos da coleta seletiva + grãos de soja com poda de árvore (natural); T41 – Resíduos orgânicos da coleta seletiva + grãos de soja + mistura de palhas de trigo com soja e poda de árvore (controlado); T42 – Resíduos orgânicos da coleta seletiva + grãos de soja + mistura de palhas de trigo com soja e poda de árvore (natural). O processo de compostagem foi conduzido em leiras por 120 dias, sendo realizados revolvimentos e regas quinzenalmente nos tratamentos controlados. As leiras foram monitoradas quanto ao teor de umidade, pH, condutividade elétrica, carbono total, nitrogênio total, relação C/N, redução de peso e volume. Analisou-se a qualidade final dos compostos gerados de acordo com a IN

Nº 25/2009 do MAPA. A umidade apresentou-se ideal nos tratamentos controlados e abaixo nos naturais. Os valores de pH dos compostos ao final do processo variaram entre 7,7 a 8,5. Houve diminuição da condutividade elétrica em todos os tratamentos ao longo do processo e os valores finais são considerados adequados para fins de adubação. Os tratamentos controlados apresentaram maiores valores de nitrogênio ao final da compostagem. A relação C/N diminuiu em todos os tratamentos, alcançando valores de 7,5/1 a 8,9/1, indicando compostos maturados. Houve redução de massa e volume nos tratamentos, com destaque para os tratamentos T31 e T32. Ao final da compostagem os compostos atenderam aos limites da IN Nº 25/2009 do MAPA no que se refere a pH, N, C, relação C/N, Mn e Ca. Os demais nutrientes estiveram abaixo dos limites mínimos estabelecidos pela normativa.

Palavras-chave: Resíduos da coleta seletiva. Grãos de soja. Palha de trigo. Palha de soja. Poda de árvores.

1 Introdução

Atualmente o Brasil está entre os maiores exportadores de produtos agropecuários. Esta atividade econômica contribui com 22,5% do PIB (Produto Interno Bruto) e 37% da força de trabalho (EMBRAPA, 2015).

Devido à ampliação da produção agrícola para suprir a demanda nacional e de exportação, a geração de resíduos sólidos neste setor econômico é impactante, uma vez que são gerados aproximadamente 290 milhões de toneladas de resíduos orgânicos por ano nas agroindústrias de base primária (IBGE, 2009).

Agroindústrias, cooperativas agroindustriais, grandes propriedades rurais e centros de pesquisa são os principais geradores desses resíduos sólidos. Basicamente nesses empreendimentos são gerados resíduos orgânicos de dois tipos: os resíduos agrícolas (resto de culturas e/ou de material de pesquisa) e os resíduos orgânicos do próprio empreendimento, gerados na rotina de trabalho, que se assemelham à fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos, por conter restos de frutas e alimentos.

A Lei nº 12.305/2010 prevê a responsabilidade dos geradores de resíduos sólidos quanto às etapas do gerenciamento, que incluem uma escala de prioridades pautada na não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final adequada dos rejeitos (BRASIL, 2010). Dessa maneira, o desenvolvimento de um sistema de fácil manejo e eficiente dos resíduos orgânicos se torna necessário, uma vez que, os empreendimentos encontram dificuldades na operação do processo de compostagem, especificamente na necessidade de revolvimentos, que demandam maquinários ou mão-de-obra.

Desta forma, o presente capítulo tem como objetivo relatar os resultados do projeto que buscou avaliar a técnica de compostagem para o tratamento dos diversos resíduos orgânicos agrícolas gerados numa unidade de pesquisa, bem como avaliar a eficiência do processo em estabilizar a matéria orgânica em dois sistemas: um que contou com o controle recomendado para o processo (aeração e umidade) e outro, ao natural. E ainda verificar a viabilidade de aplicação em solo dos fertilizantes obtidos, comparando os resultados finais de pH, umidade, nitrogênio total, carbono orgânico total, relação C/N, macronutrientes e micronutrientes com as especificações da IN N° 25/2009, do Ministério de Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA).

2 Material e métodos

O experimento foi realizado em uma unidade de pesquisa agrícola, localizada no município de Londrina-PR. Os resíduos utilizados para o processo de compostagem consistiram em restos de alimentos, cascas de frutas, verduras etc., provenientes do restaurante da unidade e matéria orgânica não contaminada de laboratórios de pesquisa (R1); grãos de soja (R2); palha de soja (R3); palha de trigo (R4); poda de árvore (R5) e mistura de palhas de soja e trigo com poda de árvore (R6).

Para realização do experimento montou-se quatro tratamentos com a mistura de resíduos ricos em nitrogênio, que são os restos de refeições, e grãos de soja, diversificando apenas os resíduos ricos em carbono (R3, R4, R5 e R6).

Para cada tratamento montou-se duas leiras semelhantes (quantidade/matéria orgânica), de modo a aplicar condições controladas de irrigação e revolvimento em uma das leiras (controlado) e na outra leira deixou-se ao natural (sem irrigação e revolvimento), totalizando, assim, oito leiras, conforme na Figura 5.1.



Figura 5.1 Esquema experimental utilizado.

Na confecção das leiras, o formato escolhido foi trapezoidal, com as dimensões de 1,25 m de largura e 1,5 m de comprimento e altura variável. A quantidade

de de resíduos utilizada correspondeu à quantidade de resíduos (R1) gerados na semana, onde se montou um tratamento por semana, totalizando assim um mês de montagem do experimento.

As montagens das leiras foram realizadas em camadas de resíduos, R1 e R2, intercaladas a algum resíduo palhoso (R3, R4, R5 e R6), conforme a Figura 5.2.

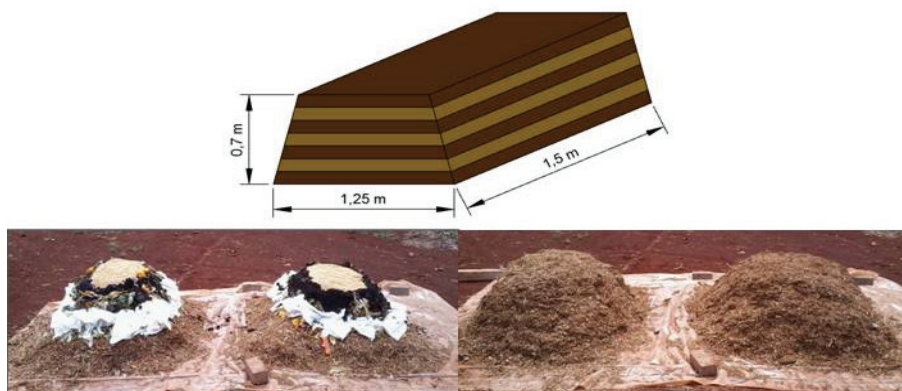


Figura 5.2 Esquema de montagem das leiras.

A quantidade média utilizada em cada leira foi cerca de 85 Kg de resíduo R1, que correspondeu à quantidade gerada em uma semana na unidade (Figura 5.3), 10 Kg de grão de soja e 57 Kg de resíduos palhosos (R3, R4, R5 e R6). Dessa maneira, a relação C/N média inicial dos tratamentos foi de 15/1.

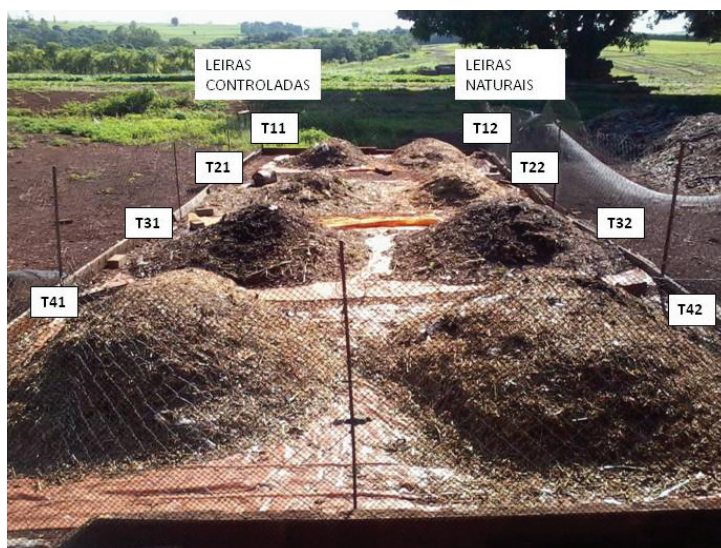


Figura 5.3 Configuração do experimento.

O monitoramento dos tratamentos aconteceu durante 120 dias após a montagem das leiras e as variáveis monitoradas ao longo do processo de compostagem estão apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 Variáveis monitoradas durante o processo de compostagem.

Variáveis	Tratamentos Controlados	Tratamentos Naturais	Métodos
Temperatura	Diário	Diário	Termômetro tipo espeto
Revolvimento e Irrigação	A cada 15 dias	Não se aplica	Mecanizado/ mangueira
Redução de Massa/volume	Início e final	Início e final	Balança/ cubicagem
Análises físico-químicas ¹	10°,30°,60°,90°,120° dia	10°,30°,60°,90°,120° dia	–
Análise nutricional ²	Final	Final	–

Nota¹: pH, umidade, condutividade elétrica, relação C/N, carbono e nitrogênio total.

Nota²: Macronutrientes e micronutrientes.

A temperatura da leira foi medida com o auxílio de um termômetro digital tipo espeto em seis pontos, diariamente (Figura 5.4). Já o monitoramento da temperatura ambiente aconteceu por meio de dados obtidos na estação meteorológica situada a uma distância de 500 metros do local do experimento.

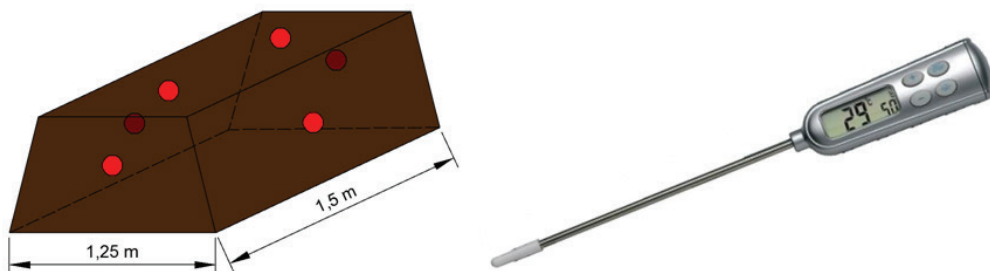


Figura 5.4 Monitoramento da temperatura nos pontos de medição.

Os revolvimentos dos tratamentos controlados ocorreram a cada 15 dias, com auxílio de uma Mini-Carregadeira Bob Cat®, sempre após a leitura das temperaturas. Para avaliar a necessidade de correção de umidade utilizou-se o “teste da mão”, que consistiu em bolear o composto e perceber a umidade aparente excedente ou não (NUNES, 2009). Caso necessário, as regas ocorreram com auxílio de uma mangueira.

O volume e a massa foram determinados no início da montagem da leira e ao final do processo, respectivamente, pelo método da cubicagem (com auxílio de um tambor de volume conhecido) e pesagem em balança da marca Welmy®. Os resultados foram expressos em base seca.

Para a coleta das amostras dos resíduos orgânicos foram tomadas três partes dos resíduos de diferentes pontos. Em seguida, realizou-se uma homogeneização e retirou-se cerca de 200 g da amostra.

Já as coletas de amostras dos compostos ocorreram a partir da retirada de seis pontos da leira: dois pontos no topo, dois pontos no meio e dois pontos na base. As amostras foram homogeneizadas e reduzidas pelo método de quarteamento manual, segundo ABNT NBR 10007 (2004). Em seguida, as amostras foram armazenadas em sacos plásticos, encaminhadas ao laboratório, congeladas (refrigeração a uma temperatura de -4°C) para as análises de C, N, C/N e nutrientes.

A determinação de pH e condutividade elétrica foi realizada em água. Pesou-se 10 g da amostra úmida em um recipiente plástico de 100 mL e adicionou-se 50 mL de água deionizada. A mistura foi levada para um agitador de movimento circular horizontal por 30 minutos a 150 rpm. Em seguida, o material foi deixado em repouso por 1 hora. Fizeram-se as medições no sobrenadante da solução: do pH com peagâmetro calibrado da marca Techall® e da condutividade elétrica com um condutivímetro calibrada marca Jencons®, modelo 4010 (TEDESCO et al., 1995).

Para a umidade, 10 g das amostras foram pesadas em um béquer previamente seco, o qual foi levado para uma estufa com ventilação forçada, a 105°C por 24 horas.

Após a secagem a massa do béquer foi verificada novamente (SILVA, 2009). Assim, a umidade foi calculada pela Equação 1:

$$U (\%) = \left(\frac{\text{massa úmida} - \text{massa seca}}{\text{massa úmida} - \text{massa béquer}} \right) * 100 \quad (1)$$

Onde:

U = Umidade

Massa úmida = Massa do béquer + amostra úmida

Massa seca = Massa do béquer + amostra seca

Massa béquer = Massa do béquer

C total e N foram determinadas pelo método da combustão seca em um analisador de carbono orgânico total (TOC). Inicialmente as amostras foram secas em estufa por mais de 48h a uma temperatura de 45 a 60°C , moídas em um moinho e, passadas em peneiras (Figura 5.5) com malha de 0,500 mm. Até o momento da análise, ficaram em estufa a 60°C , para retirar a umidade remanescente.



Figura 5.5 Moagem e peneiramento das amostras.

Das amostras secas realizadas em duplicata, foram pesadas 20 mg em uma balança analítica da marca METTLER TOLEDO®, do modelo “Classic”, com precisão de pesagem de 0,00001g e acondicionadas e seladas em cápsulas de estanho.

Na sequência as amostras submetidas ao analisador de carbono orgânico total (TOC), da marca Termo Scientific®, modelo FLASH 2000 Series foram incineradas em temperatura aproximada de 950°C, por 5 minutos, em um tubo de quartzo de combustão, onde foi utilizado como carregador o gás O₂, com 99,998% de pureza. Após a combustão, toda a matéria orgânica foi convertida em CO₂ e através de um sensor infravermelho foi possível detectar a quantidade de C e N elementares existentes na amostra (adaptado de CARMO; SILVA, 2012).

Para a determinação dos nutrientes (macro e micro) dos compostos, foi adaptado o método SW 846 – 3051A da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América (US–EPA, 2007), feita a digestão das amostras pela técnica de aquecimento por microondas e, posteriormente, a determinação dos elementos P, K, Ca, Mg, S, B, Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni e Zn pela técnica de ICP–OES (*Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry*).

As análises foram realizadas em triplicata e o procedimento consistiu em pesar cerca de 0,2500 g das amostras moídas e secas (40 – 45 °C por 48 horas em estufa com ventilação) em uma balança analítica de precisão (de 0,1000 g). Com auxílio de uma espátula as amostras foram transferidas para os tubos de digestão do tipo Teflon®, específico do forno de microondas.

Em seguida, foram adicionados 6 mL de ácido nítrico (HNO_3) 1:1 e 2 mL de peróxido de hidrogênio (H_2O_2), deixando os tubos abertos e em repouso por 24 horas em capela de exaustão. Após este período, os tubos foram fechados e a solubilização foi efetuada nos digestores com aquecimento por microondas da marca CEM Corporation, modelo Mars Xpress, série MD-4848, com potência máxima de 1600W, a uma pressão de 130 psi (9 atm), temperatura aproximada de 175 °C, com tempo de rampa (Ramp) de 10 minutos e sob pressão (hold) por 15 minutos.

Após o término da programação, os tubos foram resfriados durante 20 minutos até alcançar uma pressão de cerca de 10 psi (69 kPa), sendo realizada a abertura dos tubos em capela com sistema para exaustão de gases. Na sequência, foram transferidos os extratos para tubos volumétricos, completando-se com água destilada o volume para 30 mL (diluição).

A determinação dos teores dos elementos de interesse da IN N° 25/2009 do MAPA, foi realizada em espectrofotômetro de emissão óptica com fonte de indução de plasma acoplada individualmente (ICP-OES), marca Perkin-Elmer®, modelo Optima 3000, sequencial, com vista Axial ou Radial, alimentado com amostrador automático Perkin Elmer, AS-90 plus.

2.1 Análises estatísticas

Realizou-se comparação das médias entre os tratamentos controlado e natural através do teste t – Student, utilizando o Microsoft Excel®. Entre os tratamentos (T1, T2, T3 e T4) foram realizadas análises de variância ao nível de 5% de significância, utilizando-se o software SISVAR® 5.4 e as médias foram comparadas pelo teste de Scott-Knott.

3 Resultados e discussão

A compostagem consiste de um processo biológico e aeróbico e as condições em que os microrganismos se encontram norteiam a aceleração e a eficiência na degradação da matéria orgânica. Para isso, alguns fatores são fundamentais, dentre eles a temperatura, a relação C/N, a umidade, a granulometria do material (SALVATOR & SABEE, 1995; DÍAZ et al., 2002; BROWN et al., 2008).

Na Figura 5.6 nota-se, de modo geral, que todos os tratamentos apresentaram comportamentos semelhantes. As temperaturas médias variaram entre 40°C a 70°C na fase termófila, e entre 27°C a 40°C na fase mesófila, sempre acima da ambiente, demonstrando a intensa atividade microbiana na degradação da matéria orgânica (KIEHL, 2004; PUYUELO, GEA & SÁNCHEZ, 2010; KULCU, 2015).



Figura 5.6 Comportamento das temperaturas média e máxima, no interior das leiras e precipitação ao longo dos 120 dias do processo de compostagem.

Nota ⁽¹⁾: T11 – CS, grãos de soja com palha de soja (controlado); T12 – CS, grãos de soja com palha de soja (natural); T21 – CS, grãos de soja com palha de trigo (controlado); T22 – CS, grãos de soja com palha de trigo (natural); T31 – CS, grãos de soja com poda de árvore (controlado); T32 – CS, grãos de soja com poda de árvore (natural); T41 – CS, grãos de soja com mistura de palhas de trigo com soja e poda de árvore (controlado); T42 – CS, grãos de soja com mistura de palhas de trigo com soja e poda de árvore (natural).

Quando se comparam as leiras que receberam o manejo (controlado) com as naturais, fica evidente que as fases termófilas e mesófilas ocorreram em períodos distintos, ou seja, em tratamentos controlados como os T11, T31 e T41 a diminuição de temperaturas rumo à fase mesófila aconteceu mais rapidamente. A explicação deve-se ao fato de que as leiras que receberam aeração tiveram uma decomposição acelerada da fração compostável, segundo Stanley & Turner (2010), ao passo que nos tratamentos ao natural (T12, T32 e T42) a permanência de temperaturas elevadas durante um período longo, demonstra ainda grande quantidade de material biodegradável (MORENO et al., 2013).

A umidade é essencial para vida microbiana e com relação aos valores ideais para o processo, a faixa porcentual deve situar-se entre 40 e 60% (STANLEY & TURNER, 2010). Dessa maneira quando se analisam os dados médios na Tabela 5.2, percebe-se que os teores de umidade variam, e nos primeiros 15 dias não diferiram significativamente ($\alpha=0,05$) nos tratamentos T12, T22, T32 e T42, que compreendem as leiras que não receberam manejo e mostraram as menores médias, porém dentro ou próximo da faixa ideal. E quando o processo foi finalizado os maiores valores observados foram para T11, T21 e T41, com teores de umidade considerados acima da faixa ideal para o processo.

Tabela 5.2 Comparação dos valores médios de umidade entre os oito tratamentos.

Umidade (%)									
Tratamentos ⁽¹⁾	T11	T12	T21	T22	T31	T32	T41	T42	
Período (dias)	Média	Média	Média	Média	Média	Média	Média	Média	CV (%)
15	52,26Ba	48,08Aa	57,56Bb	36,15Aa	53,15Ba	40,56Aa	70,05Cb	41,59Aa	11,85
30	57,44Ca	57,60Ca	53,96Cb	26,81Aa	57,80Cb	36,19Ba	55,05Ca	52,47Ca	12,24
60	47,02Ba	53,31Ca	64,57Da	54,83Ca	49,92Cb	30,19Aa	64,93Db	41,48Ba	8,35
90	61,14Bb	29,07Aa	69,28Db	57,07Ba	65,37Cb	33,15Aa	72,21Da	65,38Ca	6,01
120	70,74Ca	50,88Ba	68,41Cb	27,68Aa	59,22Ba	57,67Ba	73,16Cb	36,19Aa	10,48

Nota ⁽¹⁾: T11 – CS, grãos de soja com palha de soja (controlado); T12 – CS, grãos de soja com palha de soja (natural); T21 – CS, grãos de soja com palha de trigo (controlado); T22 – CS, grãos de soja com palha de trigo (natural); T31 – CS, grãos de soja com poda de árvore (controlado); T32 – CS, grãos de soja com poda de árvore (natural); T41 – CS, grãos de soja com mistura de palhas de trigo com soja e poda de árvore (controlado); T42 – CS, grãos de soja com mistura de palhas de trigo com soja e poda de árvore (natural).

Nota ⁽²⁾: Letras iguais maiúsculas entre as colunas dos tratamentos implicam em equivalência estatística dos valores ao nível de 5% de significância, pelo teste Scott-Knott.

Nota ⁽³⁾: Letras iguais minúsculas entre as colunas dos tratamentos natural e controlado implicam em equivalência estatística dos valores ao nível de 5% de significância, pelo teste t-student.

De modo geral, nos tratamentos controlados os valores de umidade estiveram dentro ou acima da faixa proposta pela literatura, devido ao recebimento de regas, ao passo que nos tratamentos naturais apresentaram valores inferiores, mesmo recebendo água da chuva. Este fato não foi observado para a leira ao natural de poda de árvore (T32), onde ocorreram os menores valores de umidade comparados ao demais ao longo do processo, devido ao material de mistura apresentar característica de hidrorrepelência e difícil degradação, o que exige assim, uma atividade microbiana e fase termófila mais intensa (de 104 dias) (LÓPEZ-GONZÁLEZ et al., 2015).

Os valores de pH são considerados altos. Aos 15 dias após o início da compostagem os tratamentos já alcançaram valores básicos ou alcalinos. Estudo realizado por Kurola et al. (2011) com compostagem de resíduos urbanos com cinzas, em tambores, resultou em pH próximo a 8 após 30 dias de processo.

Tabela 5.3 Comparação dos valores médios pH entre os oito tratamentos.

pH									
Tratamentos ⁽¹⁾	T11	T12	T21	T22	T31	T32	T41	T42	
Período (dias)	Média	Média	Média	Média	Média	Média	Média	Média	CV (%)
15	8,11Ca	8,66Db	6,79Aa	7,47Ba	8,00Ca	7,61Ba	8,67Db	7,85Ca	2,47
30	8,68Ca	8,89Db	8,48Bb	7,51Aa	8,46Ba	8,64Ca	8,34Ba	8,57Ba	1,08
60	2,26Aa	5,93Bb	8,39Db	7,27Ca	8,32Da	8,49Da	8,50Da	7,92Da	4,78
90	8,36Da	8,63Db	7,50Aa	8,00Bb	7,68Aa	8,27Ca	7,86Ba	8,11Ca	1,74
120	8,22Ca	8,47Db	8,15Cb	7,56Aa	7,56Aa	7,93Ba	7,78Ba	7,59Aa	1,78

Nota ⁽¹⁾: T11 – CS, grãos de soja com palha de soja (controlado); T12 – CS, grãos de soja com palha de soja (natural); T21 – CS, grãos de soja com palha de trigo (controlado); T22 – CS, grãos de soja com palha de trigo (natural); T31 – CS, grãos de soja com poda de árvore (controlado); T32 – CS, grãos de soja com poda de árvore (natural); T41 – CS, grãos de soja com mistura de palhas de trigo com soja e poda de árvore (controlado); T42 – CS, grãos de soja com mistura de palhas de trigo com soja e poda de árvore (natural).

Nota ⁽²⁾: Letras iguais maiúsculas entre as colunas dos tratamentos implicam em equivalência estatística dos valores ao nível de 5% de significância, pelo teste Scott-Knott.

Nota ⁽³⁾: Letras iguais minúsculas entre as colunas dos tratamentos natural e controlado implicam em equivalência estatística dos valores ao nível de 5% de significância, pelo teste t-student.

Observa-se aos 60 dias de compostagem que os tratamentos T21, T31, T32, T41 e T42 apresentaram valores semelhantes estatisticamente, ao passo que os T11 e T12 apresentaram pH inferiores. A explicação pode se dar pelo material de base usado (palha de soja) que proporcionou uma fermentação com formação

de ácidos orgânicos. Como o pH é um dos parâmetros utilizados para indicar a maturidade do composto, no final, indiferente do manejo dado ou da mistura de resíduos, assumiu valores dentro da faixa tida como ideal, de 5 a 8, para fertilizantes orgânicos (MAPA, 2009).

A condutividade elétrica é um parâmetro que tende a diminuir no processo de compostagem. Segundo Kayıçioğlu & Okur (2011) o processo com resíduos de tabaco diminuiu a condutividade em 32 e 46% nos compostos finais. Com 30 dias é possível observar o decaimento e a equivalência estatística entre os valores de todos os tratamentos, comprovando a conversão da matéria orgânica para a sua fração mineralizada.

Do início do processo até o final, a diminuição da condutividade elétrica foi de 3 a 4 vezes mais nos tratamentos controlados, comparando-os aos tratamentos ao natural, uma vez que as regas realizadas podem ter ocasionado a solubilização e a lixiviação dos sais.

Tabela 5.4 Comparação dos valores médios de condutividade elétrica entre os oito tratamentos.

Condutividade elétrica (mS.cm ⁻¹)									
Tratamentos ⁽¹⁾	T11	T12	T21	T22	T31	T32	T41	T42	
Período (dias)	Média	Média	Média	Média	Média	Média	Média	Média	CV (%)
15	2,82Ba	2,68Ba	4,58Ca	4,33Ca	2,26Aa	4,14Cb	2,22Aa	5,07Db	8,06
30	2,51Aa	3,37Aa	3,43Aa	3,42Aa	2,14Aa	2,85Aa	2,51Aa	3,85Ab	25,40
60	2,26Aa	5,93Bb	3,47Aa	6,25Bb	2,44Aa	3,91Aa	3,15Aa	3,67Aa	26,56
90	1,74Aa	4,95Db	2,87Ba	1,02Aa	0,94Aa	6,19Eb	1,48Aa	3,53Cb	16,52
120	1,12Aa	4,25Cb	0,92Aa	3,83Cb	0,84Aa	2,50Bb	1,16Aa	3,35Cb	18,01

Nota ⁽¹⁾: T11 – CS, grãos de soja com palha de soja (controlado); T12 – CS, grãos de soja com palha de soja (natural); T21 – CS, grãos de soja com palha de trigo (controlado); T22 – CS, grãos de soja com palha de trigo (natural); T31 – CS, grãos de soja com poda de árvore (controlado); T32 – CS, grãos de soja com poda de árvore (natural); T41 – CS, grãos de soja com mistura de palhas de trigo com soja e poda de árvore (controlado); T32 – CS, grãos de soja com mistura de palhas de trigo com soja e poda de árvore (natural).

Nota ⁽²⁾: Letras iguais maiúsculas entre as colunas dos tratamentos implicam em equivalência estatística dos valores ao nível de 5% de significância, pelo teste Scott-Knott.

Nota ⁽³⁾: Letras iguais minúsculas entre as colunas dos tratamentos natural e controlado implicam em equivalência estatística dos valores ao nível de 5% de significância, pelo teste t-student.

As quantidades de C conforme Tabela 5.5, não apresentaram uma queda gradual, e alteraram estatisticamente entre os tratamentos nos diferentes períodos, uma vez que a baixa relação C/N dos resíduos iniciais geralmente resulta em menor produção de CO₂ e, assim, menor perda de carbono na leira (HORWATH & ELLIOT, 1996).

Uma degradação eficiente no processo de compostagem segundo Pereira (2010), além dos fatores de temperatura, umidade e aeração, depende também do material de origem, que foram diversos nos tratamentos. Estudos de Malheiros (1996) apresentaram este comportamento do carbono orgânico e total variando ao longo de compostagem de casca de pinus com esterco e lã.

O nitrogênio total apresentou variação ao longo do processo, destacando uma tendência crescente apenas nas leiras: poda de árvore (T32); palha de trigo (T22) de semelhança significativa com T42.

Leal et al. (2013) observaram em compostagem de crotalaria com capim elefante aumento do N em todos os tratamentos durante o processo de compostagem, o que supõem que parte do nitrogênio não se perdeu por volatilização da amônia ou lixiviação, ou seja, a transformação do nitrogênio amoniacal em nitrato e posteriormente em nitratos (nitrificação) possam ter acontecido, indicado assim a maturação dos compostos (SEQUEIRA, 2013).

Os valores iniciais de relação C/N 15/1 nas leiras foram inferiores ao ideal (de 30/1), e com o passar dos dias diminuíram cerca de 47 a 50% (Tabela 5.5) nos tratamentos. A redução está associada às altas temperaturas encontradas no interior das leiras que fazem o carbono ser convertido a CO₂ e a fração de nitrogênio total passou a nitrato e/ou nitrato, ou ainda sob condições indesejadas, perdida por volatilização da amônia (JIANG et al., 2011).

Tabela 5.5 Comparação dos valores C, N e relação C/N entre os oito tratamentos.

C (%)									
Tratamentos ⁽¹⁾	T11	T12	T21	T22	T31	T32	T41	T42	
Período (dias)	Média	Média	Média	Média	Média	Média	Média	Média	CV (%)
15	27,75Aa	40,21Cb	41,71Da	42,13Da	39,17Ca	45,66Eb	36,31Ba	46,37Eb	2,21
30	31,87Aa	38,42Ca	35,25Ba	38,70Ca	32,69Aa	37,58Cb	35,66Ba	34,54Ba	3,48
60	26,90Aa	35,08Ba	28,89Aa	38,95Ca	35,21Ba	38,31Ca	29,99Aa	39,17Cb	3,75
90	24,57Aa	34,90Ca	25,26Aa	38,49Cb	30,78Ba	37,10Ca	28,96Ba	38,02Ca	4,97
120	37,36Ba	26,63Aa	23,78Aa	42,36Bb	29,06Aa	38,58Bb	28,56Aa	40,80Bb	5,55

Continua

Tabela 5.5 Comparação dos valores C, N e relação C/N entre os oito tratamentos. (Continuação)

N (%)									
Tratamentos ⁽¹⁾	T11	T12	T21	T22	T31	T32	T41	T42	
Período (dias)	Média	Média	Média	Média	Média	Média	Média	Média	CV (%)
15	2,99Aa	4,01Cb	3,45Ba	4,03Cb	3,42Ba	4,63Db	3,05Aa	4,86Db	4,10
30	3,48Aa	4,27Cb	4,78Da	4,67Da	3,32Aa	3,82Ba	3,97Ba	3,67Ba	3,84
60	2,96Aa	4,14Ba	3,41Aa	4,92Cb	4,24Ba	4,36Ba	3,46Aa	3,98Ba	5,39
90	2,82Aa	4,33Ca	3,50Ba	4,47Cb	3,55Ba	4,55Ca	3,33Ba	4,18Cb	3,99
120	4,54Ba	2,90Aa	3,15Aa	5,56Cb	3,45Aa	4,34Bb	3,26Aa	4,98Ca	6,49
Relação C/N									
15	9,3/1Aa	10/1Aa	12,1/1Ba	10,5/1Aa	11,5/1Ba	9,9/1Aa	11,9/1Ba	9,5/1Aa	3,76
30	9,2/1Ca	9/1Ca	7,4/1Aa	8,3/1Ba	9,9/1Ca	9,9/1Ca	9/1Ca	9,4/1Aa	4,17
60	9,1/1Aa	8,5/1Aa	8,5/1Aa	7,9/1Aa	8,3/1Aa	8,8/1Aa	8,6/1Aa	9,8/1Aa	3,34
90	8,7/1Ca	8,1/1Ba	7,2/1Aa	8,6/1Ca	8,7/1Ca	8,1/1Ba	8,7/1Ca	9,1/1Ca	2,98
120	8,2/1Aa	9,2/1Aa	7,6/1Aa	7,6/1Aa	8,5/1Aa	8,9/1Aa	8,7/1Aa	8,2/1Aa	3,56

Nota ⁽¹⁾: T11 – CS, grãos de soja com palha de soja (controlado); T12 – CS, grãos de soja com palha de soja (natural); T21 – CS, grãos de soja com palha de trigo (controlado); T22 – CS, grãos de soja com palha de trigo (natural); T31 – CS, grãos de soja com poda de árvore (controlado); T32 – CS, grãos de soja com poda de árvore (natural); T41 – CS, grãos de soja com mistura de palhas de trigo com soja e poda de árvore (controlado); T42 – CS, grãos de soja com mistura de palhas de trigo com soja e poda de árvore (natural).

Nota ⁽²⁾: Letras iguais maiúsculas entre as colunas dos tratamentos implicam em equivalência estatística dos valores ao nível de 5% de significância, pelo teste Scott-Knott.

Nota ⁽³⁾: Letras iguais minúsculas entre as colunas dos tratamentos natural e controlado implicam em equivalência estatística dos valores ao nível de 5% de significância, pelo teste t-student.

A relação C/N também é usada como indicador da qualidade final do composto, e os valores da Tabela 5.5 se mostraram equivalentes estatisticamente entre os tratamentos controlado e natural. A partir do 60º dia, até a finalização, todos os tratamentos apresentaram semelhanças ($\alpha=0,05$) e, de acordo com Cabeza et al. (2013), com valores dentro da faixa (de 8/1 a 10/1) considerada para compostos maturados.

O processo de compostagem implica na redução de massa e volume da biomassa (YUE et al., 2008). Os dados do presente trabalho são apresentados na Figura 5.7.



Figura 5.7 Redução de massa e volume no final do processo de compostagem.

Nota: T1 – CS, grãos de soja com palha de soja; T2 – CS, grãos de soja com palha de trigo; T3 – CS, grãos de soja com poda de árvore; T4 – CS, grãos de soja com mistura de palhas de trigo com soja e poda de árvore.

* Material em base seca (105°C)

Comparando a redução de massa entre os tratamentos controlado e natural, pode-se afirmar que os tratamentos controlados apresentaram as maiores reduções, porém no tratamento com poda de árvore (T3) nota-se semelhanças na redução de massa entre as leiras controlado e natural, devido ao fato de que a poda de árvores possui em sua estrutura complexos como a lignina, hemicelulose, celulose e ceras de difícil quebra pelos microrganismos, o que demanda maior tempo de compostagem (PARADELO, MOLDES & BARRAL, 2012).

Já a redução de volume foi semelhante entre as leiras controladas e ao natural, com destaque ao tratamento com palha de trigo (T2), que apresentou a maior redução na leira controlada. Ao longo do processo de compostagem fatores como aeração, degradação de substratos podem interferir (ORRICO, 2012).

Na Tabela 5.6 são apresentados os resultados das análises dos compostos finais e os valores limites das variáveis estipuladas pela Instrução Normativa N° 25/2009 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2009) para fertilizantes orgânicos.

É possível verificar que os valores de pH, nitrogênio total, carbono total e relação C/N atenderam aos limites estipulados para fertilizantes orgânicos para todos os tratamentos. Percebe-se que as quantidades de macronutrientes (N, P, K, Ca) dos compostos finais estiveram dentro dos limites. Já os micronutrientes

estiveram abaixo do limite, exceto ferro, cuja explicação para o teor apresentado pode estar associada ao fato das amostras conterem solo, de característica basáltica, portanto rico em óxido de ferro.

Pode-se observar que o tratamento que apresentou maior número de variáveis atendendo à IN N° 25/2009 (MAPA, 2009) foi a leira natural da coleta seletiva com grãos e poda de soja (T12), atendendo a 8 dos parâmetros (de um total de 15 analisadas), seguida dos tratamentos T21, T31, T32 e T41 atendendo a 7 dos parâmetros.

Dessa forma, pode-se afirmar que os compostos dos oitos tratamentos se encontraram dentro do limite dos parâmetros de pH, C, N e relação C/N, sendo possível atestar que o composto final estava maturado.

Com relação aos baixos teores de micronutrientes deve-se analisar a matéria-prima utilizada para o processo e a viabilidade de incrementos desses elementos na forma química ao composto final.

Tabela 5.6 Média e desvio padrão das características físico-químicas dos compostos finais, de acordo com os valores mínimos exigidos pela Instrução Normativa N° 25-2009 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento para fertilizantes orgânicos.

Variáveis	Limites mínimos IN N° 25/2009	Tratamentos									
		T11	T12	T21	T22	T31	T32	T41	T42		
Umidade (%)	até 50	61,14±2,14	29,07±5,97	72,28±2,06	57,07±3,88	65,37±7,34	33,15±3,82	72,21±3,51	65,38±1,69		
pH	6	8,22±0,03	8,47±0,07	8,15±0,08	7,56±0,17	7,56±0,04	7,93±0,16	7,78±0,02	7,59±0,12		
N total ⁽¹⁾ (%)	0,5	4,54±0,31	2,90±0,23	3,15±0,22	5,56±0,06	3,45±0,09	4,34±0,13	3,26±0,20	4,98±0,04		
C org. total ⁽¹⁾ (%)	15	37,36±2,55	26,63±2,83	23,78±1,11	42,36±0,28	29,06±0,07	38,58±0,47	28,56±0,27	40,80±0,43		
Relação C/N ⁽¹⁾ (%)	até 20	8,24±0,32	9,18±0,27	7,56±0,18	7,62±0,13	8,46±0,23	8,90±0,17	8,75±0,46	8,21±0,03		
Macronutrientes (%)	P	0,48±0,02	0,54±0,01	0,62±0,01	0,54±0,01	0,47±0,03	0,42±0,02	0,59±0,01	0,52±0,01		
	K	2,34±0,09	1,22±0,03	1,22±0,01	2,15±0,06	0,76±0,03	1,69±0,04	1,29±0,04	1,64±0,06		
	Ca	0,98±0,14	2,10±0,18	2,34±0,10	0,56±0,01	3,00±0,05	5,41±0,97	2,67±0,35	1,47±0,08		
	Mg	0,49±0,02	0,67±0,01	0,55±0,01	0,36±0,01	0,50±0,01	0,43±0,01	0,63±0,02	0,42±0,01		
	S	0,33±0,01	0,28±0,00	0,34±0,01	0,32±0,01	0,28±0,00	0,28±0,01	0,33±0,00	0,32±0,01		

Continua

Tabela 5.6 Média e desvio padrão das características físico-químicas dos compostos finais, de acordo com os valores mínimos exigidos pela Instrução Normativa N° 25/2009 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento para fertilizantes orgânicos. (Continuação)

Variáveis	Limites mínimos IN N° 25/2009	Tratamentos									
		T11	T12	T21	T22	T31	T32	T41	T42		
B	0,03	0,01±0,00	0,01±0,00	0,01±0,00	0	0,01±0,00	0,01±0,00	0,01±0,00	0,01±0,00	0,01±0,00	
Cl ⁽²⁾	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Co	0,005	0	0	0,001±0,000	0	0	0	0,002±0,002	0	0	
Cu	0,05	0,01±0,00	0,01±0,00	0,01±0,00	0	0,01±0,00	0,01±0,00	0,01±0,00	0,01±0,00	0,01±0,00	
Fe	0,2	1,0±0,1	3,2±0,0	3,3±0,1	0,5±0,0	2,4±0,2	0,9±0,1	3,1±0,2	1,1±0,1	1,1±0,1	
Mn	0,05	0,03±0,00	0,08±0,00	0,09±0,00	0,02±0,00	0,06±0,00	0,03±0,00	0,09±0,01	0,03±0,00	0,03±0,00	
Mo ⁽³⁾	0,005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Ni	0,005	0,001±0,000	0,002±0,000	0,002±0,000	0	0	0,001±0,000	0,002±0,000	0,002±0,000	0	
Si ⁽²⁾	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Zn	0,1	0,01±0,00	0,01±0,00	0,02±0,00	0,01±0,00	0,02±0,00	0,007±0,00	0,026±0,00	0,01±0,00	0,01±0,00	
Legenda	Não atende	9	7	8	10	8	8	8	9	9	
	Atende	6	8	7	5	7	7	7	6	6	

Nota⁽¹⁾: Valores expressos em base seca, umidade determinada a 105°C.

Nota⁽²⁾: Não realizada leitura.

Nota⁽³⁾: Não detectado, com valores abaixo do limite de quantificação.

Fonte: Adaptado de IN N° 25/2009 MAPA.

O aspecto visual do composto final é um dos fatores utilizados na identificação do grau de decomposição, a fim de saber se o composto estava estabilizado ou maturado, pois um composto final pode estar mal decomposto e ser considerado estável, sem estar maturado (KIEHL, 2008).

Após os 120 dias de compostagem é possível notar a descaracterização dos resíduos nos compostos finais dos tratamentos.

Os compostos finais dos tratamentos ao natural, devido à falta de aeração que proporcionasse a mistura dos resíduos e a umidificação resultaram em um material com odores. Em especial a leira T3 natural, onde é possível notar a presença de papéis de germinação, cascas de ovos e verduras em estado íntegros. Nos demais havia presença de torrões secos que mantinham aparência estável (Figura 5.8).

De maneira geral, os tratamentos controlados resultaram numa descaracterização e decomposição dos resíduos mais uniforme do que os tratamentos ao natural, apresentando ainda um composto final escuro, livre de odores e resíduos íntegros.

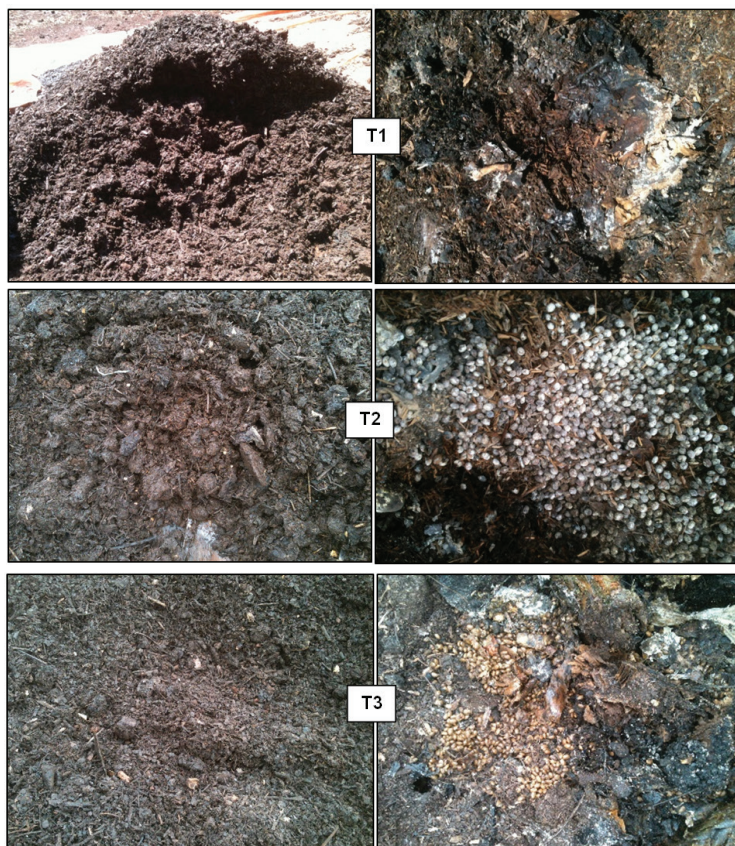


Figura 5.8 Compostos finais dos oito tratamentos: leiras controladas (esquerda) e leiras naturais (direita). (Continua)

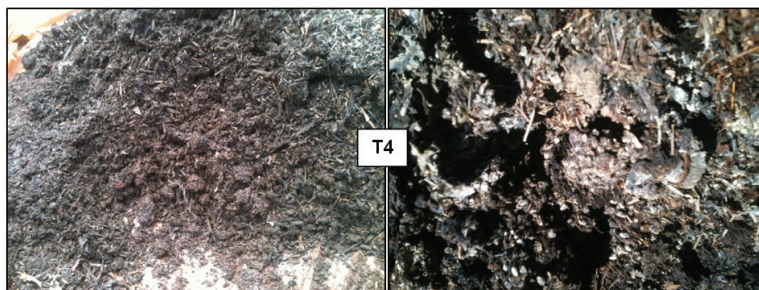


Figura 5.8 Compostos finais dos oito tratamentos: leiras controladas (esquerda) e leiras naturais (direita).
(Continuação)

4 Conclusões

O revolvimento e as regas aplicados às leiras controladas interferiram no comportamento da curva de temperatura e nas reduções de massa e volume, porém a relação C/N não diferiu entre os sistemas, mas diminuiu ao longo dos dias em todos os tratamentos.

Concluiu-se que o período de 120 dias de compostagem foi suficiente para estabilização da matéria orgânica e os tratamentos controlados resultaram em menor tempo para a maturação do material, resultando em compostos escuros, homogêneos, livres de odores e resíduos íntegros; o que indica que esta é a técnica mais eficaz para o tratamento dos resíduos orgânicos gerados em unidades agrícolas.

Referências

- BRASIL. Lei Federal nº 12.305 de 02 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos**, altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, 2010.
- BROWN, S.; KRUGER, C.; & SUBLER, S. Greenhouse gas balance for composting operations. *Journal of Environmental Quality*, v.37, p. 1396-1410, 2008.
- CABEZA, I.O.; LÓPEZ, R.; RUIZ-MONTOYA, M.; DÍAZ, M.J. Maximising municipal solid waste e Legume trimming residue mixture degradation in composting by control arameters optimization. *Journal of Environmental Management*, v.128, p. 266-273, 2013.
- CARMO, D. L.; SILVA, C. A. Métodos de quantificação de carbono e matéria orgânica em resíduos orgânicos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.36, n.4, p. 1211-1220, 2012.

- 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 desfibração de algodão. **Engenharia Agrícola**, n. 25, n. 2, 540-548, 2005.
- DÍAZ, M.J.; MADEJÓN, E.; LÓPEZ, F.; LÓPEZ, R.; CABRERA, F. Optimization of the rate vinasse/grape marc for co-composting process. **Process Biochemistry**, n. 37, p. 1143-1150, 2002.
- DÍAZ, M.J.; EUGENIO, M.E.; LÓPEZ, F.; GARCIA, J.C.; YAÑEZ, R. Neural Models for Optimizing Lignocellulosic Residues Composting Process. **Waste Biomass Valor**, v. 3, p. 319-331, 2012.
- EMBRAPA. **Embrapa em Números**. Embrapa, Secretária de Comunicação. Brasília, 138 p. 2015.
- GUERRA-RODRÍGUEZ, E.; VÁZQUEL, M.; DÍAZ-RAVINÁ, M. Dynamics of the co-composting of barley waste with liquid poultry manure. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v.83, p. 166-172, 2003.
- HORWATH, W.R.; ELLIOT, L.F. Microbial C and N, dynamics during mesophilic and thermophilic incubations of ryegrass. **Biology and Fertility of Soils**, n.22, p. 1-9, 1996.
- HAUG, R.T. **Practical Handbook of Compost Engineering**. Taylor e Francis Inc. (Ed.), 2a. ed., Boca Raton, Flórida, 1993.
- IYENGAR, S.R.; BHAVE, P.P. In vessel composting of household wastes. **Waste Management**, v.26, n.10, p.1070-1080, 2006.
- JIANG, T.; SCHUCHARDT, F.; GUOXUE, L.; GUO, R.; ZHAO, Y. Effect of C/N ratio, aeration rate and moisture content on ammonia and greenhouse gas emission during the composting. **Journal of Environmental Sciences**, v.23, n.10, p.1754-1760, 2011.
- KAYIKÇIOĞLU, H.H.; OKUR, N. Evolution of enzyme activities during composting of tobacco waste. **Waste Management & Research**, v.29, n.11, p. 1124-1133, 2011.
- KIEHL, E.J. **Manual da Compostagem: Maturação e Qualidade do Composto**. 4ªed. Piracicaba. 2004. p. 173.

- KULCU, R. New kinetic modelling parameters for composting process. *Journal of Material Cycles Waste Management*, p.1-21, 2015.
- KUROLA, J.M.; ARNOLD, M.; KONTRO, M.H.; TALVES, M.; ROMANTS-CHUK, M. .Wood ash for application in municipal biowaste composting. *Bioresource Technology*, v. 102, p. 5214-5220, 2011.
- LEAL, M.A. DE A.; GUERRA, J.G.M.; ESPINDOLA, J.A.A.; ARAÚJO, E. DA S. Compostagem de misturas de capim–elefante e torta de mamona com diferentes relações C/N. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 17, n. 11, p. 1195-1200, 2013.
- LÓPEZ–GONZÁLEZ, J.A.; SUÁREZ–ESTRELLA, F.; VARGAS–GARCÍA, M.C.; LÓPEZ, M.J.; JURADO, M.M.; MORENO, J. Dynamics of bacterial microbiota during lignocellulosic waste composting: Studies upon its structure, functionality and biodiversity. *Bioresource Technology*, v. 175, p. 406-416, 2015.
- MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa Nº 25 de Julho de 2009: normas sobre as especificações e as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos fertilizantes orgânicos simples, mistos, compostos, organominerais e biofertilizantes destinados à agricultura**, 2009.
- MALHEIROS, S. M. P. **Avaliação do processo de compostagem utilizando resíduos agroindustriais**. Campinas–SP, 1996. Disponível em: < <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000116365>>. Acesso em: 10 out. 2014.
- MORENO, J.; LÓPEZ, M.J.; VARGAS–GARCÍA, M.C.; SUÁREZ–ESTRELLA, F. (2013). Recent advances in microbial aspects of compost production and use. *Acta Horticulturae*, v. 1013, p. 443-457, 2013.
- YUE, B.; CHEN, T.B.; GAO, D.; ZHENG, G.D.; LIU, B.; LEE, D.J. Pile settlement and volume reduction measurement during forced–aeration static composting. *Bioresource Technology*, v. 99, p. 7450-7457, 2008.
- ORRICO, A.C.A.; CENTURION, S.R.; FARIAS, R.M.; ORRICO–JUNIOR, M.A.P.; GARCIA, R.G. Effect of different substrates on composting of poultry litter. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 41, n. 7, p. 1764-1768, 2012.

- PARADELO, R.; MOLDES, A.B.; BARRAL, M.T. Evolution of organic matter during the mesophilic composting of lignocellulosic winery wastes. **Journal of Environmental Management**, v. 116, p. 18-26, 2012.
- PEREIRA, D. C. de M. S. **Compostagem pelo método de aeração passiva: uma solução sustentável para os resíduos sólidos orgânicos da indústria de celulose e papel**. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais), Universidade de Taubaté, Taubaté, 2010.
- PUYUELO, B.; GEA, T.; SÁNCHEZ, A. A new control strategy for the composting process based on the oxygen uptake rate. **Chemical Engineering Journal**, v.165, p. 161-169, 2010.
- SALVATOR, K.; SABEE, W.E. Evaluation of fertilizer value and nutrient release from corn and soya bean residues under laboratory and green house conditions. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 48, p. 14-15, 1995.
- SEQUEIRA, L. L. **Compostagem de resíduos urbanos e avaliação da qualidade dos produtos obtidos: Caso de estudo Amarsul S.A**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2013.
- SILVA, F.C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Embrapa Informação Tecnológica, Brasília, 2ª ed., p. 399-407, 2009.
- STANLEY, A.; TURNER, G. Composting. **Teaching Science**, v. 56, n. 2, p. 34-36, 2010.
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. UFRGS: Porto Alegre, 2ª ed., 175 p. 1995.
- ZHU, N.; DENG, C.; XIONG, Y.; QUIAN, H. Performance characteristics of three aeration Systems in the swine manure composting. **Bioresource Technology**, v. 93, n. 3, p. 319-326, 2004.

