

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU**

**CARACTERÍSTICAS MINERAIS E ENERGÉTICAS DO LIXO
URBANO EM PROCESSOS DE COMPOSTAGEM E BIODIGESTÃO
ANAERÓBIA**

IZABEL CRISTINA GALBIATTI VESPA

**BOTUCATU-SP
Agosto -2005**

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**CARACTERÍSTICAS MINERAIS E ENERGÉTICAS DO LIXO
URBANO EM PROCESSOS DE COMPOSTAGEM E BIODIGESTÃO
ANAERÓBIA**

IZABEL CRISTINA GALBIATTI VESPA

Orientador: **Prof. Dr. Jorge de Lucas Junior**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp - Campus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia - Área de Concentração em Energia na Agricultura.

BOTUCATU - SP

Agosto – 2005

“Todas as coisas são interligadas como o sangue que une uma família. O que acontecer com a Terra, acontecerá com seus filhos. O homem não pode tecer a trama da vida; ele é meramente um dos fios. Seja o que for que ele faça à trama, estará fazendo consigo mesmo”.(Chefe Seattle)

**A meu esposo, Dr. Jesuino, aos meus filhos:
Priscila, Thiago, Wesley e Renata e ao meu neto
Haruyuki.**

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente a **Deus**, pois a Ele devemos a nossa existência e sabedoria;

Aos meus queridos pais, **Fausto e Palmira**, que me colocaram no mundo e sempre me deram instrução, carinho e apoio;

Ao meu querido esposo, **Dr. Jesuino Vespa**, pela ajuda nas pesquisas, pela compreensão nos momentos em que precisei me ausentar e pelo apoio em todos os momentos;

Aos meus queridos filhos, **Priscila, Thiago, Wesley e Renata** pelo apoio, auxílio, confiança e compreensão;

Ao meu querido neto **Haruyuki** que nos momentos de cansaço, ele era o meu descanso e alegria;

A minha família, **irmãos, cunhadas, sobrinhos** pelo incentivo, dedicação e paciência;

Ao **Prof. Dr. Jorge de Lucas Junior** pela sua paciência, instrução e amizade;

A **Empresa Constroeste**, na pessoa do **Eng. Aviemar Filho**, que forneceram o material para a pesquisa e sempre estavam prontos a fornecer dados referente a empresa e ao material fornecido quando foi preciso, espera-se que estes resultados possam retribuir esta dedicação;

Ao **Departamento de Engenharia Rural da FCAVJ-UNESP – Jaboticabal-SP** e aos seus **funcionários**, por ter cedido o espaço e o laboratório para que fossem realizados o experimento e as análises;

A minha **amiga Ana Carolina Amorim**, que nos momentos de dúvidas, muitas vezes me auxiliou;

As **funcionárias da Seção de Pós –Graduação**, área de Concentração Energia na Agricultura FCA-UNESP - Botucatu –SP, pela atenção com que sempre me atenderam;

A **todos os professores** do curso de pós –graduação, pelos ensinamentos.

A **Instituição Paulista Adventista de Educ. e Assist, Social** - São José do Rio Preto-SP, especialmente ao seu presidente **Pr Luis Carlos Araújo**, pelo apoio;

Aos **professores, funcionários do Colégio Adventista de São José do Rio Preto** e a todos aqueles que de uma maneira ou de outra, contribuíram para que fosse concluída mais esta etapa da minha vida.

SUMÁRIO

| | Página |
|---|--------|
| SUMÁRIO..... | VI |
| LISTA DE FIGURAS | VIII |
| LISTA DE TABELAS | IX |
| RESUMO | 11 |
| SUMMARY | 13 |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 15 |
| 2. REVISÃO DE LITERATURA | 17 |
| 2.1- Digestão anaeróbia | 18 |
| 2.2- Compostagem..... | 21 |
| 2.3- Equivalência Energética..... | 24 |
| 2.4- Qualidade do Fertilizante Orgânico | 25 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS..... | 27 |
| 3.1- Definição do experimento | 27 |
| 3.2- Tratamento do resíduo sólido orgânico no município de São José do Rio Preto..... | 28 |
| 3.3- Ensaio de biodigestão anaeróbia | 29 |
| 3.4- Ensaio de compostagem..... | 32 |
| 3.5- Metodologias empregadas..... | 32 |
| 3.5.1. Determinação dos teores de sólidos totais e voláteis..... | 32 |
| 3.5.2. Abastecimento dos biodigestores | 33 |
| 3.5.3. Determinação do volume de biogás..... | 34 |
| 3.5.4. Determinação do potencial de produção de biogás | 35 |
| 3.5.5. Digestão para quantificação de minerais | 35 |
| 3.5.6. Determinação dos teores de carbono orgânico | 36 |
| 3.5.7. Equivalência energética..... | 36 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 37 |
| 4.1-Digestão Anaeróbia..... | 37 |
| 4.1.1. Teores de sólidos totais e voláteis | 37 |
| 4.1.2. Produção de biogás..... | 38 |
| 4.1.3. Potenciais de produção de biogás..... | 40 |
| 4.1.4. Características químicas dos biofertilizantes obtidos..... | 42 |

| | |
|--|----|
| 4.2-Compostagem..... | 42 |
| 4.2.1. Temperaturas das Leiras..... | 43 |
| 4.2.2. Rendimento na Produção de Composto..... | 44 |
| 4.2.3. Teores de Carbono, Nitrogênio, Sólidos Totais, Sólidos Voláteis, Matéria Orgânica Compostável, Matéria Orgânica Resistente a Compostagem e Demanda Química de Oxigênio..... | 44 |
| 4.3-Equivalência energética entre os processos de biodigestão anaeróbia e de compostagem | 48 |
| 5. CONCLUSÃO..... | 50 |
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 52 |

LISTA DE FIGURAS

| Figuras | Páginas |
|--|----------------|
| 1. Localização do Município de São José do Rio Preto no Estado de São Paulo..... | 29 |
| 2. Esquema dos biodigestores batelada de campo, medidas em mm. (Fonte: ORTOLANI <i>et al.</i> , 1986)..... | 31 |
| 3. Distribuição média diária da produção de biogás para os biodigestores abastecidos com lixo urbano (LU) e lixo urbano + inoculo (LU+IN)..... | 40 |
| 4. Temperaturas médias semanais das leiras de compostagem formadas a partir do resíduo lixo urbano..... | 43 |
| 5. Redução de massa seca enleirada, durante a compostagem do resíduo lixo urbano..... | 45 |

LISTA DE TABELAS

| TABELAS | Páginas |
|---|----------------|
| 1. Teores de macro e micronutrientes e metais pesados, do afluente e efluente de biodigestores- Fonte: BENINCASA (1997)..... | 26 |
| 2. Componentes dos substratos e teores de sólidos totais e voláteis no abastecimento de biodigestores batelada com lixo orgânico..... | 34 |
| 3. Teores de sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV), em kg e %, no início e final do experimento (abastecimento e efluente dos biodigestores) sem inóculo (LU) e com inóculo (LU+IN) e as reduções dos ST e SV..... | 37 |
| 4. Produções médias semanais (m ³) de biogás obtidas em biodigestores anaeróbios(1 2 e 3) abastecidos com resíduo sólido urbano orgânico(LU) e resíduo sólido urbano orgânico + inóculo (LU + IN)..... | 39 |
| 5. Potenciais de produção total de biogás em m ³ /kg de substrato adicionado, m ³ /kg de sólidos totais adicionado, m ³ /kg de sólidos voláteis adicionado, m ³ /kg de sólidos voláteis reduzido e m ³ /kg de lixo orgânico adicionado no resíduo sólido urbano orgânico (LU) e no resíduo sólido urbano orgânico com inóculo (LU + IN)..... | 41 |
| 6. Teores de macro e micro nutrientes e metais pesados do efluente dos biodigestores com e sem inóculo..... | 42 |
| 7. Rendimento de composto das leiras conduzidas, em porcentagem, nos 150 dias..... | 44 |
| 8. Quantidades (em kg) de matéria natural e seca, % de sólidos totais e voláteis e redução da quantidade de MS, aos 0, 30, 60, 90, 120 e 150 dias de formação das leiras de compostagem, a partir do resíduo sólido urbano orgânico..... | 45 |

| | |
|---|----|
| 9. Teores de carbono e nitrogênio, relação C:N, matéria orgânica compostável (MOC), matéria orgânica resistente a compostagem (MORC) e demanda química de oxigênio (DQO) aos 0, 30, 60, 90, 120 e 150 dias da compostagem do resíduo lixo urbano..... | 46 |
| 10. Teor de macro e micro nutrientes e metais pesados do Processo de Compostagem no Composto..... | 47 |
| 11. Potencial Energético, Material Flutuante e Perdas ou Rejeitos (plásticos , metais) do LU (resíduo sólido urbano orgânico) de São José do Rio Preto através da biodigestão anaeróbia e compostagem..... | 48 |
| 12. Quantidade de nutrientes: N(nitrogênio), P (fósforo) e K (potássio) em relação a MS (Massa Seca) no processo de compostagem do resíduo sólido urbano orgânico..... | 49 |
| 13. Quantidade de nutrientes: N(nitrogênio), P (fósforo) e K (potássio) em relação a produção diária de LU(resíduo sólido urbano orgânico) no processo de biodigestão anaeróbia..... | 49 |

RESUMO

Nos últimos anos, verifica-se crescente a produção de resíduos sólidos urbanos associada a um aumento populacional e ao maior consumo de produtos com embalagens que poderiam ser recicladas. Medidas rápidas de valorização e reciclagem devem ser tomadas para que permitam um consumo contínuo de alguma forma racional, diminuindo conseqüentemente, as agressões ambientais.

No presente estudo avaliaram-se parâmetros que proporcionem subsídios na tomada de decisões sobre o melhor aproveitamento dos resíduos sólidos urbanos orgânicos, utilizando-se a compostagem ou a biodigestão anaeróbia.

O resíduo sólido urbano orgânico (lixo) foi cedido pela empresa CONSTROESTE, localizada no município de São José do Rio Preto-SP, e o experimento foi conduzido no Laboratório de Biodigestão Anaeróbia do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Campus de Jaboticabal da Universidade Estadual Paulista - Unesp.

Foram conduzidos ensaios de compostagem e biodigestão anaeróbia, utilizando-se resíduo sólido urbano orgânico coletado no município de São José do Rio Preto – SP, no intuito de avaliar as características químico-minerais, o potencial energético e a interferência da qualidade do resíduo no desenvolvimento dos processos. Avaliaram-se as reduções de sólidos totais e voláteis, produções de biogás e qualidade do biofertilizante

durante a biodigestão anaeróbia, que foi conduzida com a utilização ou não de inóculo, e parâmetros como temperatura, umidade, peso, teores de nutrientes, e redução de massa enleirada durante a compostagem e a equivalência energética nos dois processos.

Observaram-se reduções de 58,5% nas quantidades de massa seca enleirada e de 40,9% nos teores de carbono orgânico, matéria orgânica compostável e demanda química de oxigênio. Foram verificadas temperaturas acima de 40° C, no interior das leiras, evidenciando a importância do processo na redução e/ou eliminação de patógenos.

No processo de biodigestão anaeróbia foi possível verificar que ocorreu antecipação na produção de biogás quando se adicionou inoculo no substrato.

Quanto à equivalência energética demonstrou-se que o potencial de biogás em um ano é em torno de 8,5 milhões de m³ para uma produção de resíduo sólido urbano orgânico de São José do Rio Preto-SP, de 63.875 t/ano e a produção de composto é de 26.280 t/ano para mesma quantidade de resíduo sólido urbano orgânico.

Portanto, a digestão anaeróbia e a compostagem são muito importantes no processo de reaproveitamento dos resíduos sólidos urbanos orgânicos que, simplesmente, a maioria das cidades deposita em aterros sanitários ou em lixões a céu aberto.

SUMMARY

MINERAL AND ENERGY CHARACTERISTICS OF URBAN WASTE IN COMPOSTING AND ANAEROBIC DIGESTION PROCESSES., Botucatu, 2005. 60p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: IZABEL CRISTINA GALBIATTI VESPA

Adviser: JORGE DE LUCAS JUNIOR

An increasing production of urban organic wastes is noticed in the last years, associated with the growth of the global population and the increased of resultant consumption. Fast actions of valorization and recycling must be done, in a way that it allows a rational continuous consumption and consequently decreasing environmental aggressions.

This work has evaluated some parameters that supply decision making over better use of urban organic wastes through composting or anaerobic digestion processes.

The urban organic waste was supplied by Controeste company, in São José do Rio Preto – SP. The experiment was conducted in the Anaerobic Digestion Laboratory – Agricultural Engineering Department – Veterinary and Agricultural Sciences College – Jaboticabal Campus – São Paulo State University – UNESP.

Samples of composting and anaerobic digestion were collected done from the wastes in the city of São José do Rio Preto – SP, with the objective of evaluating to the chemical and mineral properties and consequent interference of the residues on the processes. The reductions of total and volatile solids, biogas production and biofertilizer quality werw evaluated during the anaerobic digestion. It was conducted using inoculums or not and parameters such as temperature, humidity, weight, nutrient content and reduction of heap mass during the composting.

A reduction the 58.5% in the quantity of heap dry mass, 40.9% in the organic carbon contents, recycling organic material and chemical demand of oxygen was observed. It was registered temperatures above 40°C in the heaps interior, evidencing the importance of the process of reduction and/or elimination of pathogens. The presence of innocuous in the substrate anticipated the biogas production in the process of anaerobic digestion.

About energetic equivalency, it was demonstrated that the biogas potential in a year is around 8.5 million m³ for the urban garbage production of São José do Rio Preto – SP, of about 63,875 tons/year and the compost production is about 26,280 tons/year for the same quantity of urban garbage.

Anaerobic digestion and composting processes are important for urban organic garbage reuse, and, most of the cities drops it in sanitary landfills or garbage in an open air.

Key words: compost, biogas, energetic equivalency.

1. INTRODUÇÃO

Após a Revolução Industrial, a partir do século XVIII, a utilização de energia e dos recursos naturais aumentou consideravelmente, pois a população rural deixou o campo para viver na cidade. O desenvolvimento econômico baseava-se na elevada escala de produção, por meio de “grandes indústrias”, envolvendo grande utilização de mão-de-obra. Este tipo de produção exigia matéria-prima em grande quantidade, já que alta produtividade era sinônimo de produção em grande escala. Não havia preocupação com redução de desperdícios e um planejamento de proteção ambiental.

Atualmente, o manejo inadequado de resíduos sólidos de qualquer origem gera desperdícios, constitui ameaça constante à saúde pública e agrava a degradação ambiental, comprometendo a qualidade de vida das populações, especialmente nos centros urbanos de médio e grande porte. A situação evidencia a urgência em se adotar um sistema de conscientização educacional da sociedade, definindo uma política para o gerenciamento de resíduos sólidos urbanos que assegure a melhoria do nível de qualidade de vida, promova ações práticas recomendadas para a saúde pública e proteja o meio ambiente.

Segundo SCHALCH (1991) e a classificação da ABNT- NBR 10 004, resíduos sólidos ou semi-sólidos são classificados como resultantes de atividades das comunidades, podendo ser de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, de serviços, de varrição e agrícola. Ficam também incluídos os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos, cujas particularidades, tornem inviável seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face de melhor tecnologia disponível.

A compostagem e a biodigestão anaeróbia têm se apresentado como formas eficientes de se reciclar os resíduos sólidos urbanos orgânicos. Segundo KIEHL (1979), a compostagem é um processo aeróbio em que resíduos sólidos urbanos orgânicos são convertidos em adubo humificado. A biodigestão anaeróbia é um processo no qual resíduos orgânicos são transformados em biofertilizante e também em combustível renovável, o biogás [BENINCASA, ORTOLANI e LUCAS JR. (1986)].

O município de São José do Rio Preto gera aproximadamente 350 t/dia de resíduos sólidos urbanos, dos quais em torno de 50% são constituídos de matéria orgânica. O município possui uma usina de compostagem, onde a separação dos materiais é feita por peneiração. Depois deste procedimento o material é conduzido até o pátio de compostagem, onde são efetuados revolvimentos periódicos para a aeração e maturação do composto. O tratamento dos efluentes (chorume dos aterros e leiras) ocorre por meio de adição de insumos químicos e lagoas com aeração. As águas residuárias provenientes do tratamento são reutilizadas na higienização da usina e para a jardinagem, para que ocorra a redução da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) em torno de 95%.

A avaliação da maturidade do composto de resíduo sólido urbano orgânico tem sido reconhecida como um dos mais importantes problemas relacionados ao processo de compostagem e biodigestão anaeróbia na utilização agrícola segura do produto como fonte de energia. Sendo assim, é preciso reorientar os padrões atuais de produção e consumo, havendo eficiência dos processos industriais e reduzindo os desperdícios, dando assim prioridade ao atendimento das necessidades básicas da população.

Desta forma, objetivou-se estudar parâmetros que sirvam como subsídios na tomada de decisões sobre o melhor aproveitamento dos resíduos sólidos urbanos, avaliando-se a qualidade da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos, a produção do biogás, a qualidade do biofertilizante, a qualidade do composto e a viabilidade da utilização da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos como componente essencial para a biodigestão anaeróbia e para a compostagem, comparando-se a geração de energia indireta (composto e biofertilizante) e a energia direta (biogás) correlacionando-se os resultados obtidos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Energia, segundo TUNDISI (1991) é derivada de *energeia*, que em grego significa “em ação”. É a propriedade de um sistema que lhe permite existir ou, como conceitua a Física, realizar trabalho, ou seja, pode-se obter alguma utilidade dela. É importante compreender que a energia se apresenta de diversas formas (diversas manifestações) que se transformam umas nas outras, implicando em fluxos de energia.

Analisando as fontes de energia, observa-se que algumas são "primárias", no sentido de que são providas pela natureza na sua forma direta e são utilizadas diretamente ou dão lugar a uma outra forma que é a que será utilizada. Assim, são fontes primárias de energia o petróleo, o gás natural, o carvão mineral, a lenha (biomassa em geral), o urânio, a água (energia hidráulica), o sol, o vento, etc. São "secundárias": a eletricidade, a gasolina, o carvão vegetal, o álcool, etc.

Os organismos biológicos que podem ser aproveitados como fontes de energia são chamados de biomassa. O resíduo sólido orgânico que dá origem ao biogás é uma biomassa utilizada para a geração de energia. No Brasil, a proporção de energia total consumida é cerca de 35% de origem hídrica e 25% de origem na biomassa, significando que os recursos renováveis suprem algo em torno de dois terços dos requisitos energéticos do país. A biomassa é uma forma indireta de aproveitamento da energia solar absorvida pelas plantas, já que resulta da conversão da luz do sol em energia química (BUBU, 2005).

Segundo LEITE (1997) a questão energética assume o caráter de desafio para os países em desenvolvimento, quando se constata que os 850 milhões de habitantes das nações desenvolvidas de economia de mercado consomem mais da metade da energia do mundo, e que esta já atinge mais de oito bilhões de toneladas equivalentes de petróleo (tEP) por ano.

De acordo com KROEGER et al (1998), pelo menos 30% dos resíduos sólidos urbanos e uma grande proporção de resíduos industriais podem ser biologicamente tratados via compostagem e digestão anaeróbia, e essa quantidade recuperável da fração orgânica é de aproximadamente 60 milhões de toneladas/ano – em torno de 40% do total de resíduos sólidos urbanos produzido na Europa.

Sendo a digestão anaeróbia e a compostagem processos de degradação de resíduos orgânicos, podemos afirmar que a digestão anaeróbia e a compostagem são fontes de energia renováveis e inesgotáveis.

Baere & Verstrate (1984), citados por BENINCASA (1997), em estudos sobre interação de sistemas de compostagem aeróbia com processo de digestão anaeróbia, verificam que o tempo necessário para a conversão da matéria orgânica de resíduos sólidos urbanos é de duas a três semanas, com rendimento de 60m³ CH₄ (metano) por toneladas de substrato. No caso de se aplicar na digestão anaeróbia o material proveniente de um sistema de compostagem, este rendimento se eleva para 80 a 95 m³ CH₄/t de substrato, com um tempo de retenção de três semanas. Foi constatado, ainda, que um pós-tratamento de resíduos digeridos anaerobicamente, promove a redução de 50 a 60% do peso e de 85% do volume da biomassa.

2.1- Digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia é um processo biológico natural que ocorre na ausência de oxigênio molecular, no qual populações bacterianas interagem estreitamente para

promover a fermentação estável e auto-regulada da matéria orgânica, da qual resultam, principalmente, os gases metano e dióxido de carbono (FORESTI, 1994).

Segundo TORTORA et al (2002), as bactérias anaeróbias obrigatórias, produtoras de metano (metanogêneas) são de importância econômica considerável. São utilizadas nos processos de tratamento de esgoto, podendo ser utilizadas para tratamento de resíduos sólidos urbanos. Essas bactérias *Archaeas*, grupo excepcionalmente interessante de bactérias, inclui micróbios que são altamente diferentes em morfologia e nos seus nichos ecológicos. Sua parede celular não apresenta peptidoglicano, comum a todos os outros grupos de bactérias. Vivem em grandes concentrações de sais, ambientes quentes e com pH ótimo por volta de 2, necessitam desses ambientes para se reproduzir e combinam o hidrogênio (H_2) com CO_2 para formar o metano (CH_4). Os microrganismos são usados para a bioconversão, que é responsável pela conversão de biomassa em fonte de energia.

O metano é uma das fontes de energia mais convenientes produzida pela bioconversão como produto do tratamento anaeróbio. Muitas comunidades produzem quantidades úteis de metano a partir de resíduos de aterros (TORTORA et al, 2002).

Durante a crise energética dos anos 70 cresceu o interesse pela geração de metano como energia alternativa substitutiva do petróleo a partir de resíduos orgânicos sólidos.

De acordo com NOGUEIRA (1986) a maioria dos resíduos orgânicos é constituído por uma mistura de três elementos: carboidratos, gordura e proteína, resultando numa composição de biogás como: metano (CH_4) 55-75% , dióxido de carbono (CO_2) 25 – 45%, nitrogênio (N_2) 0 –3 % , hidrogênio (H_2) 0-2%, oxigênio (O_2) 0- 0,1% e gás sulfídrico (H_2S) 0- 1%.

Para produzir o metano (biogás) há necessidade de uma fermentação anaeróbia a partir da matéria orgânica na presença de bactérias e isto se faz por meio de um biodigestor, que transforma esses materiais em condições anaeróbicas, isto é, na ausência do ar atmosférico.

Os biodigestores no Brasil, segundo BENINCASA et al (1986), são classificados como “convencionais” ou “não convencionais”, em função das relações entre as

características do resíduo orgânico a ser utilizado como substrato e o tipo de reator julgado mais eficiente para o seu processamento.

De acordo com KLEIN (1972), as vantagens da digestão anaeróbia dos resíduos sólidos é a redução do volume para a disposição final, conversão sem poluição do ar, produção de um lodo estabilizado com características desejáveis e produção de um subproduto desejável (gás metano).

Para SPEECE (1983) a conversão anaeróbia de substratos orgânicos complexos na ausência de luz, nitrato, nitrito e sulfato é realizada por bactérias quimioheterotróficas não metanogênicas e bactérias metanogênicas. Os compostos orgânicos são hidrolisados pelas bactérias quimioheterotróficas não metanogênicas a açúcares, álcoois, ácidos voláteis, hidrogênio e CO₂.

BENINCASA (1997) em estudos realizado com o lixo orgânico da CEASA de Ribeirão Preto verificou que quando o material foi fermentado em biodigestor modelo batelada, o mesmo sofreu reduções de sólidos voláteis superiores a 68%. Os conteúdos de sólidos totais foram de 4,8 kg e 1,69 kg, no início e final do processo. O substrato preparado com lixo pré-secado sofreu uma redução de sólidos voláteis de 83%, pois as quantidades de sólidos voláteis foram de 4,12 kg e 0,75 kg no início e final do processo de fermentação.

GORGATI et al (1994) em estudo de tratamento da fração orgânica de lixo urbano em biodigestores batelada, observaram antecipação da queima do gás quando se utilizou inóculo na formulação do substrato, sendo este efeito mais evidente com o uso do lixo seco e triturado do que com uso de lixo “in natura”. No mesmo trabalho, os resultados mostraram que a utilização de lixo seco e triturado foi muito importante também nas taxas de redução de sólidos voláteis onde se obtiveram valores de 72,78% em 336 dias para o tratamento com lixo seco e triturado e 58,96% de redução no que se utilizou lixo “in natura”.

De acordo com o estudo realizado em lixo urbano, GORGATI (1996) verificou-se que o lixo apresenta bom potencial para produção de biogás da ordem de 0,1323 a 0,1395m³ de biogás por kg de lixo “in natura”.

O poder calorífico do biogás, segundo NOGUEIRA (1986), estudos realizados com resíduos orgânicos, depende de seu teor de metano e grau de umidade e o poder calorífico é estimado em 5500 kcal/m³. Se o gás é desumidificado e o CO₂ removido por borbulhamento em solução alcalina, esse valor aumenta para 9000 kcal/m³.

Quanto à composição do biogás, segundo CAETANO (1991), o metano e o dióxido de carbono são os responsáveis por mais de 95% do volume gasoso, onde o CH₄ (metano) representa, via de regra, 60% e o CO₂ (dióxido de carbono) em média 40%.

Segundo FORESTI (1994), algumas das vantagens do tratamento anaeróbico para resíduos orgânicos são as possibilidades de recuperação e utilização do gás metano como combustível; o baixo consumo de energia, por não exigir a introdução forçada de oxigênio no meio como os processos aeróbios e a baixa produção de lodo, estimada como sendo inferior a 20% daquela apresentada por processos aeróbios convencionais.

2.2- Compostagem

A compostagem pode ser definida como uma decomposição aeróbia controlada de substratos orgânicos em condições que permitem atingir temperaturas suficientemente elevadas para o crescimento de microrganismos termofílicos.

De acordo com REIS et al (2004) a compostagem é definida como um processo aeróbio de decomposição biológica e estabilização da matéria orgânica em condições que permitam o desenvolvimento de temperaturas termofílicas (aproximadamente 60°C), resultante de uma produção calorífica de origem biológica, com obtenção de um produto final estável, higiênico, rico em compostos húmicos e cuja utilização, no solo, não ofereça riscos ao meio ambiente.

De acordo com BIDONE (1995), o processo de compostagem pode ser dividido em três fases: inicial, de 1 a 2 dias, onde os compostos solúveis (açúcares) são decompostos; termofílica, onde são degradados principalmente celulosos e lipídeos; e de

estabilização, um período durante o qual ocorre um declínio de temperatura, diminuição na taxa de decomposição e recolonização do composto por outros microrganismos.

Segundo TORTORA et al (2002), a compostagem é um processo utilizado por jardineiros para converter resíduos de plantas em equivalente de húmus natural. Uma pilha de folhas ou montes de grama podem ser uma compostagem, pois sofrem degradação microbiana e têm condições favoráveis para as bactérias termofílicas atuarem e aumentar a temperatura do composto para 55-60°C em poucos dias, e começar a decomposição. Depois que a temperatura da pilha baixar o material orgânico pode ser revirado novamente para renovar o oxigênio. Um segundo aumento de temperatura irá ocorrer até que as populações microbianas termofílicas terminem a sua função de decomposição, sendo substituídas por populações mesofílicas que continuam lentamente com a conversão para um material semelhante ao húmus.

Segundo KIEHL (2002), considera-se, de maneira geral, a faixa ótima de temperatura para compostagem aquela de 45°C a 65°C. Temperaturas acima de 65°C tornam este processo menos eficiente, e acima de 70°C, por longo período, são desaconselháveis por restringirem a ação dos microrganismos mais sensíveis, insolubilizar proteínas hidrossolúveis, provocar alterações químicas indesejáveis e desprendimento de amônia, se o material possuir baixa relação C/N. De acordo com o mesmo autor, a relação C/N inicial deve estar entre 25/1 e 35/1, pois os microrganismos absorvem o carbono e o nitrogênio sempre na relação C/N de 30 para 1.

Para MESQUITA e PEREIRA NETO (1992), a compostagem de resíduos orgânicos é um dos métodos mais antigos de reciclagem, sendo este processo resultado da decomposição biológica aeróbia do substrato orgânico, sob condições que permitam o desenvolvimento natural de altas temperaturas, com formação de um produto suficientemente estável para armazenamento e aplicação no solo.

A compostagem tem se apresentado como uma forma eficiente de reciclar resíduos sólidos orgânicos. Segundo KIEHL (1979), a compostagem é um processo de transformação de resíduos orgânicos em adubo humificado. O produto final da compostagem, denominado composto, é definido como sendo um adubo preparado com restos de animais

e/ou vegetais. Quando bem caracterizado, permite-se que seja usado sem o risco de causar danos às plantas, pois é um processo ambientalmente seguro e livre de patógenos. O emprego da compostagem diminui o volume do lixo, contribuindo para aumentar a vida útil dos aterros sanitários.

CRAVO et al. (1998) acreditam que o resíduo sólido urbano orgânico das cidades pode se constituir em possível fonte de matéria orgânica para a agricultura. Os autores avaliaram as características de compostos de resíduo sólido urbano de seis capitais brasileiras e verificaram que os materiais analisados apresentaram teores médios de matéria orgânica, C, N, P, K, Ca, Mg, e micro-nutrientes bastante variados e elevados, constituindo assim, fontes alternativas de matéria orgânica para o solo e energia para as plantas. As variações nos teores dos elementos, segundo estes mesmos autores, podem estar relacionados com diferentes processos empregados pelas usinas de compostagem.

As análises do composto produzido na Unidade de Triagem e Compostagem de Resíduos Sólidos do Município de Porto Alegre citado por REIS et al (2004) apresentaram os seguintes resultados: umidade 32,49%; matéria orgânica 20,03%; NPK 1,46%; Relação C/N 11,97; Cálcio 2,28%; Magnésio 0,46 %; Boro 22,18 mg/kg; Zinco 185,24 mg/kg; Manganês 440,00 mg/kg; Sódio 1817,27 mg/kg; Ferro total 1,38 %; Mercúrio 0,38 mg/kg; Chumbo 44,66 mg/kg; Cromo 15,67 mg/kg; Cádmio 1,09 mg/kg; Níquel 13,14 mg/kg; Alumínio 1,03 %.

De acordo com BENINCASA (1997), em estudo realizado com o resíduo sólido orgânico do CEASA de Ribeirão Preto, os teores de sólidos totais e voláteis no processo de compostagem sofreram reduções de 85% e 87%, respectivamente, entre o início do ensaio da compostagem (material “in natura”) e o final do ensaio (composto).

Para STRINGUETA et al. (1999), o resíduo sólido urbano orgânico não é apenas um problema ambiental, pois pode constituir uma verdadeira jazida de matérias primas e energia, além de ser um material potencialmente utilizável como substrato para plantas.

2.3- Equivalência Energética

Para PIMENTEL (1980), a análise da eficiência energética de um produto ou sistema de produção deve ser avaliada num contexto global: conteúdos energéticos, nutricionais e sociais. E a determinação da melhor estratégia de gerenciamento depende de uma análise multidisciplinar, visando o ponto de vista econômico, ecológico e social. Segundo este mesmo autor, ao se conhecer o universo de custos e receitas (entradas e saídas) sob o aspecto energético, a estimativa de energia consumida em qualquer sistema pode ser encontrada através do poder calórico da matéria prima envolvida no processo.

O potencial energético autorizado para empreendimentos de geração de energia elétrica, de acordo com a ANEEL, é de 1.376,5 MW, quando se consideram apenas centrais geradoras que utilizam bagaço de cana-de-açúcar (1.198,2 MW), resíduo de madeira (41,2 MW), biogás ou gás de aterro (20 MW) e licor negro (117,1 MW) (BUBU, 2005)

Estudos realizados por NOGUEIRA (1992) mostraram que os sistemas anaeróbios são produtores de energia, o gás combustível (CH_4), ao passo que os sistemas aeróbios são consumidores de energia. Apesar desta afirmação, sabe-se que os compostos orgânicos também são fontes ricas em energias, especialmente para as plantas.

Segundo NOGUEIRA (1986) e MOTTA (1986), a equivalência energética do biogás em relação a outros energéticos é determinada levando em conta o poder calorífico e a eficiência média de combustão.

| ENERGÉTICO | NOGUEIRA | |
|---------------------|----------|--------------|
| | (1986) | MOTTA (1986) |
| Gasolina (L) | 0,61 | 0,7 |
| Querosene (L) | 0,62 | |
| Óleo Diesel (L) | 0,55 | |
| GLP (kg) | 1,43 | 0,4 |
| Alcool (L) | 0,8 | |
| Carvão Mineral (kg) | 0,74 | |
| Lenha (kg) | 3,5 | |
| Eletricidade (kWh) | | 1,25 |

Segundo AMAZONAS (1990) a equivalência energética na substituição de adubo mineral por composto orgânico é de uma tonelada equivalente de petróleo para cada 17 toneladas de composto orgânico utilizado. O cálculo baseia-se na obtenção da quantidade equivalente de nutrientes entre o composto e o adubo.

De acordo com KIEHL (1985), dados relativos às perdas de potencial energético no processo de compostagem em relação à matéria orgânica “in natura”, representam 35% as perdas de origem gasosa, por adensamento da massa de fermentação e 30% as perdas pela retirada dos rejeitos após o peneiramento do composto orgânico.

2.4- Qualidade do Fertilizante Orgânico

Segundo KIEHL (2002) a qualidade dos fertilizantes orgânicos deve estar de acordo com a legislação – Portaria nº 1 de 4 de março de 1983 – Especificações, garantias e tolerâncias dos produtos, conforme o artigo 10. Aos resultados analíticos obtidos serão admitidas tolerâncias em relação às garantias do produto, observados os seguintes limites: Fertilizantes orgânicos: nitrogênio (N) total, pentóxido de fósforo (P_2O_5) e óxido de potássio (K_2O)- Até 10% (dez por cento) para menos, isoladamente; matéria orgânica- Até 10% (dez por cento) para menos; umidade – Até 10% (dez por cento) para mais; pH- Até 10% (dez por cento) para menos e Relação C/N- Até 3,0 (três) unidades para mais.

O Departamento de Solos e Nutrição de Plantas – ESALQ- USP de Piracicaba, no dia 22 de julho de 2004, avaliou o composto obtido a partir do resíduo sólido urbano orgânico, cedido pela empresa CONSTROESTE IND. E COMERCIO LDA de São José do Rio Preto, apresentando a seguinte composição: umidade natural - 5,04%, carbono orgânico - 5,10%, nitrogênio total - 0,70%, fósforo (P_2O_5) - 16,96%, potássio (K_2O) – 21,76%, cálcio (Ca) - 21,76%, magnésio (Mg) - 0,42%, enxofre (S) - 0,30%, relação C/N (C total e N total) - 8/1, cobre (Cu) - 150 mg/kg, manganês (Mn) - 1301 mg/kg, zinco (Zn) - 408 mg/kg,

ferro (Fe) - 89381 mg/kg, boro (B) - 7 mg/kg e sódio (Na) - 2703 mg/kg (dados com base na matéria seca).

Estudos realizados por BENINCASA (1997) com o resíduo sólido urbano orgânico do CEASA de Ribeirão Preto mostram a redução da quantidade de DQO, para os dois substratos (LN, lixo in natura e LS, lixo pré-secado), que ficou em torno de 71%, mostrando que houve diminuição do poder poluente. Quanto aos teores de macro e micronutrientes do afluente e dos efluentes dos biodigestores, a diferença das quantidades de macro (g/100g) e micronutrientes ($\mu\text{g} / \text{g}$) entre os mesmos foi expressiva conforme os dados apresentados (Tabela 1).

TABELA 1. Teores de macro e micronutrientes e metais pesados, do afluente e efluente de biodigestores

| Sub | g / 100 gramas | | | | | | | | $\mu\text{g} / \text{g}$ | | | | | | | |
|-----|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|--------------------------|-------|-------|------|------|----|------|-------|
| | C | N | P | K | Ca | Mg | S | Cu | Zn | Mn | Fe | Cr | Pb | Cd | Ni | Na |
| Af | 20,1 | 1,4 | 0,4 | 2,8 | 0,8 | 0,2 | 0,02 | 20,0 | 45,0 | 193,0 | 297,0 | 27,0 | 27,0 | nd | 10,0 | 597,0 |
| ELN | 15,9 | 2,2 | 0,1 | 1,6 | 0,2 | 0,7 | 0,3 | 0,1 | 0,4 | 0,3 | 0,5 | nd | nd | nd | nd | nd |
| ELS | 17,7 | 3,8 | 0,1 | 1,7 | 0,2 | 1,3 | 0,4 | 0,1 | 0,4 | 0,4 | 1,0 | nd | nd | nd | nd | nd |

Sub: substrato, Af: afluente, ELN: efluente do lixo in natura, ELS: efluente do lixo pré-secado e nd: não detectado.

Fonte: BENINCASA (1997)

Segundo NOGUEIRA (1992) a diferença básica entre os sistemas aeróbios e anaeróbios está na manutenção do conteúdo fertilizante dos resíduos orgânicos, basicamente nitrogênio e fósforo. Enquanto o tratamento anaeróbio retém esses elementos, o processo aeróbio reduz o teor dos mesmos.

3. MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida no Departamento de Engenharia Rural, da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP.

O município de Jaboticabal localiza-se a 575 metros de altitude, 21⁰15'22''S de latitude e 48⁰18'58''W de longitude, apresentando clima subtropical úmido, com precipitação média anual de 1400mm e temperatura média anual próxima de 21,5°C.

O resíduo sólido urbano orgânico foi cedido pela CONSTROESTE INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA - Divisão Ambiental, empresa privada, responsável pela coleta dos resíduos domiciliares do município de São José do Rio Preto-SP, localizada na Rua Lúcia Gonçalves Vieira Giglio, 3667, Distrito Industrial II – Dr Carlos Arnaldo Silva do mesmo município.

3.1- Definição do experimento

Foram conduzidos ensaios de compostagem e biodigestão anaeróbia, utilizando-se como substrato o resíduo sólido urbano orgânico coletado no município de São

José do Rio Preto – SP, avaliando-se as características químico-minerais e os rendimentos em composto, biogás e biofertilizante obtidos durante os processos. Foram determinadas as reduções de sólidos totais e voláteis, produções de biogás e qualidade do biofertilizante durante a biodigestão anaeróbia, que foi conduzida com a utilização ou não de inóculo, e parâmetros como temperatura, umidade, teores de nutrientes e redução de massa enleirada durante a compostagem.

3.2- Tratamento do resíduo sólido orgânico no município de São José do Rio Preto

O Município (Figura 1) confronta-se: norte- Ipiranga e Onda Verde; sul- Cedral e Bady Bassit; leste- Guapiaçu; oeste- Mirassol. De acordo com a CONSTROESTE INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA - Divisão Ambiental, localizada no município de São José do Rio Preto-SP, responsável pelos serviços de coleta, transporte e tratamento dos resíduos urbanos, a coleta é realizada em 100% do município. No perímetro urbano é feita diariamente e na zona rural é efetuada de forma alternada. Cerca de 40% do resíduo coletado é destinado ao Aterro Sanitário e 60% é destinado a usinas de reciclagens.

De acordo com a CONSTROESTE a quantidade de resíduo sólido urbano gerado é de aproximadamente 350 toneladas/ dia, sendo que em torno de 50% desta quantidade é material orgânico. O município possui uma usina de compostagem, onde a separação dos materiais é feita por peneiração. Depois deste procedimento o material é conduzido até um pátio de compostagem, onde são efetuados revolvimentos periódicos para a aeração e a maturação de composto. O tratamento dos efluentes (chorume dos aterros e leiras) ocorre por meio da adição de insumos químicos e aeração. As águas residuárias, provenientes do tratamento, são reutilizadas na higienização da usina e para a jardinagem, para que ocorra redução de DBO (demanda bioquímica de oxigênio) em torno de 95%.



Figura 1 – Localização do Município de São José do Rio Preto no Estado de São Paulo.

3.3- Ensaio de biodigestão anaeróbia

O resíduo sólido urbano orgânico coletado serviu como substrato no abastecimento de biodigestores tipo batelada de campo (capacidade de 60 litros). Para tanto foram alimentados 6 biodigestores, sendo utilizados somente água e resíduo sólido urbano orgânico no abastecimento de três reatores. Foram utilizados água, resíduo sólido urbano orgânico e inóculo (efluente de biodigestor modelo indiano, alimentado com esterco bovino e aproximadamente 50 dias de retenção) para o preparo do substrato dos três reatores restantes.

Os biodigestores tipos batelada estão instalados no Departamento de Engenharia Rural da FCAVJ/Unesp. As amostras dos dejetos foram colocadas nos biodigestores, após diluição em água, procurando-se obter teor de sólidos totais inicial igual à 8%. Os biodigestores batelada apresentam capacidade útil de 60 litros de substrato em

fermentação e fazem parte de uma bateria de mini-biodigestores, descrita por ORTOLANI et al. (1986). Estes equipamentos são constituídos por dois cilindros retos, um dos quais, encontra-se inserido no interior do outro, de tal forma que o espaço existente entre a parede externa do cilindro interior e a parede interna do cilindro exterior comporte um volume de água que se convencionou denominar “selo de água”, atingindo profundidade de 480 mm. A Figura 2 mostra detalhes de um biodigestor do tipo batelada. Uma campânula flutuante de fibra de vidro, emborcada no selo de água, propicia as condições anaeróbias sob as quais se desenvolve o processo de fermentação, além do armazenamento do gás produzido e conferir pressão ao mesmo.

Os biodigestores são semi-subterrâneos, sendo que a superfície do solo a sua volta será revestida por uma calçada de concreto com 5 cm de espessura. O cilindro interior (câmara de fermentação) ficará em comunicação com uma vala de drenagem através de um tubo de escoamento que será ligado ao fundo da câmara e serve para a limpeza.

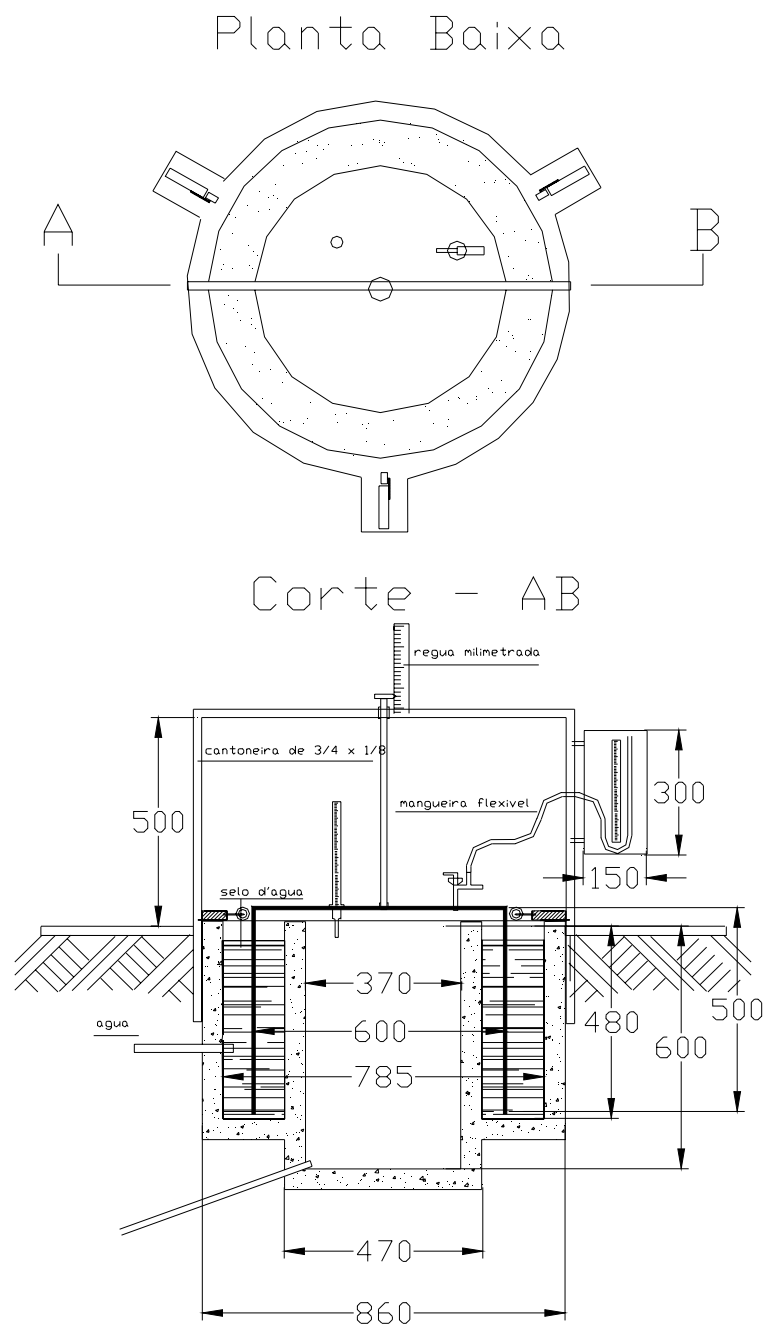


FIGURA 2. Esquema dos biodigestores batelada de campo, medidas em mm. (Fonte: ORTOLANI *et al.*, 1986).

A influência da utilização de inóculo sobre o potencial energético e qualidade do biofertilizante produzido foi avaliada pelo processo de biodigestão anaeróbia por meio da produção de biogás, potenciais de produção, reduções nos teores de ST e SV e qualidade do biofertilizante, com avaliação dos teores de N, P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Cu, Cr, Co, Zn, Mn, Cd e Pb.

3.4-Ensaio de compostagem

Com o lixo coletado foram montadas três leiras, que foram conduzidas em área coberta com lona plástica, piso de alvenaria e declividade de 2%. Foram adotadas como medidas: 1,0 m para altura e 1,5 m para largura, com comprimento dependente da quantidade de material enleirado.

Diariamente foram monitoradas a temperatura e a umidade das leiras e semanalmente efetuadas pesagens; nesta ocasião foram feitos revolvimentos, avaliando-se os teores de ST e SV, matéria orgânica compostável (MOC), matéria orgânica resistente a compostagem (MORC), demanda química de oxigênio (DQO) e coletadas amostras para quantificação dos teores de C, N, P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Cu, Cr, Co, Zn, Mn, Cd e Pb.

3.5- Metodologias empregadas

3.5.1. Determinação dos teores de sólidos totais e voláteis

Os teores de sólidos totais, quantidade total de material sólido presente nos dejetos, seja em solução ou suspensão; equivalente a matéria seca, das amostras coletadas durante os ensaios de biodigestão anaeróbia e compostagem, foram determinados segundo metodologia descrita por AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (1995).

Os teores de sólidos voláteis, quantidade de sólidos vaporizados quando os dejetos são submetidos à combustão a 600°C, foram determinados com os materiais secos obtidos após a determinação do teor de sólidos totais, conforme metodologia descrita por AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (1995).

3.5.2. Abastecimento dos biodigestores

Os abastecimentos foram efetuados procurando-se obter substratos com teor de ST em torno de 8%, conforme expressões citadas em LUCAS JR. (1994), ou seja:

$$MS = ES + INS \quad (\text{I})$$

$$(ES + INS) = \frac{K \times W}{100} \quad (\text{II})$$

$$Eu = \frac{ES}{ST} \times 100 \quad (\text{III})$$

$$INC = \frac{INS \times 100}{STIn} \quad (\text{IV})$$

$$W = Eu + INC + A \quad (\text{V})$$

nas quais:

MS = matéria seca total (kg);

ES = massa seca do resíduo a ser adicionado no biodigestor (kg);

INS = massa seca do inóculo que deverá ser adicionado no afluente do biodigestor (kg);

K = porcentagem de sólidos totais que se pretende no afluente do biodigestor (%);

W = massa do substrato a ser colocado no biodigestor (kg);

Eu = massa do resíduo fresco a ser adicionado no biodigestor (kg);

ST = porcentagem de sólidos totais contidos no resíduo fresco (%);

INC = inóculo que deverá ser adicionado (kg);

STIn = porcentagem de sólidos totais contida no inóculo (%);

A = massa de água a ser adicionado no afluyente do biodigestor (kg).

No dia do abastecimento dos biodigestores foram observados teores de ST iguais a 44,97% e 6,05% para o lixo orgânico e inóculo, respectivamente, dos quais 58,83% e 71,03% eram voláteis.

Na Tabela 2 estão apresentadas as quantidades utilizadas de água, lixo e inóculo para obtenção dos substratos.

TABELA 2. Componentes dos substratos e teores de sólidos totais e voláteis no abastecimento de biodigestores batelada com lixo orgânico.

| | H ₂ O (kg) | Lixo (kg) | Inóculo (kg) | ST (%) | ST (kg) | SV (%) | SV (kg) |
|-------------|-----------------------|-----------|--------------|--------|---------|--------|---------|
| Sem inóculo | 47,00 | 13,00 | - | 5,85 | 3,51 | 4,15 | 2,49 |
| Com inóculo | 34,00 | 13,00 | 13,00 | 6,63 | 3,98 | 4,31 | 3,75 |

Depois de calculadas as quantidades descritas de água, resíduo e inóculo, as misturas foram homogeneizadas com a utilização de uma pá, propiciando assim maiores condições de fermentação no interior dos biodigestores.

3.5.3. Determinação do volume de biogás

Os volumes de biogás produzidos diariamente foram determinados medindo-se o deslocamento vertical dos gasômetros e multiplicando-se pela área da seção transversal interna dos gasômetros, ou seja, 0,2827 m². Após cada leitura os gasômetros eram zerados utilizando-se o registro de descarga do biogás. A correção do volume de biogás para as condições de 1 atm e 20°C foi efetuada com base no trabalho de CAETANO (1985).

3.5.4. Determinação do potencial de produção de biogás

O potencial de produção de biogás foi calculado utilizando-se os dados de produção diária e as quantidades de resíduos sólidos urbano orgânicos “in natura”, de substrato, de sólidos totais e de sólidos voláteis adicionados nos biodigestores, além das quantidades de sólidos voláteis reduzidos durante o processo de biodigestão anaeróbia. Os valores foram expressos em m³ de biogás por kg de substrato, de resíduo ou de sólidos totais e voláteis.

3.5.5. Digestão para quantificação de minerais

As amostras coletadas durante o desenvolvimento dos ensaios de biodigestão anaeróbia e compostagem foram pré-secadas a 60° C, em estufa de circulação forçada de ar, por 48 horas. A seguir foram finamente moídas, em moinho de facas, e então utilizadas para a digestão da matéria orgânica.

Para a digestão utilizou-se o digestor Digesdahl Hach, que promove a digestão total da matéria orgânica à base de ácido sulfúrico (H₂SO₄) e peróxido de hidrogênio (H₂O₂) a 50%.

Com este extrato foi possível a determinação dos teores de Nitrogênio, Fósforo, Potássio, Cálcio, Magnésio, Cobre, Ferro, Manganês, Zinco, Sódio, Cromo, Chumbo, Níquel e Cádmiio, segundo BATAGLIA *et al.* (1983).

O nitrogênio foi determinado conforme metodologia descrita por SILVA (1981). Os teores de fósforo foram determinados pelo método colorimétrico utilizando-se espectrofotômetro HACH modelo DR-2000.

As concentrações de potássio, cálcio, magnésio, cobre, ferro, manganês, zinco, sódio, cromo, chumbo, níquel e cádmio foram determinadas em espectrofotômetro de absorção atômica modelo GBC 932 AA.

3.5.6. Determinação dos teores de carbono orgânico

A partir das amostras coletadas nas leiras de compostagem foram quantificados os teores de C orgânico, cuja análise fundamenta-se no fato de a matéria orgânica oxidável ser atacada pela mistura sulfocrômica, utilizando-se o próprio calor formado pela reação do dicromato de potássio com o ácido sulfúrico como fonte calorífica. O excesso de agente oxidante, que resta deste ataque, é determinado por titulação com sulfato ferroso. Segundo KIEHL (1985), o método oferece a vantagem de não oxidar a fração de matéria orgânica não decomponível durante o processo de compostagem.

As concentrações de matéria orgânica compostável (MOC), matéria orgânica resistente a compostagem (MORC) e DQO (demanda química de oxigênio) foram estimadas segundo proposto por KIEHL (1985).

3.5.7. Equivalência energética

A partir de dados coletados nas análises dos dois processos compostagem e biodigestão anaeróbia, foram feitos cálculos de equivalências energéticas, através de proporcionalidades e da produção de fertilizante.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1-Digestão Anaeróbia

4.1.1. Teores de sólidos totais e voláteis

Na Tabela 3 são apresentados os teores médios, em kg e porcentagem dos sólidos totais e sólidos voláteis, no início e final do experimento com suas respectivas reduções para o resíduo sólido urbano orgânico (LU) e para o resíduo sólido urbano orgânico com inoculo (LU+IN).

Tabela 3. Teores de sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV), em kg e %, no início e final do processo para substratos sem inóculo (LU) e com inóculo (LU+IN) e as reduções dos ST e SV.

| | Inicial | | | | Final | | | | Redução (%) | |
|---------|---------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|-------------|--------|
| | ST (%) | ST (kg) | SV (%) | SV (kg) | ST (%) | ST (kg) | SV (%) | SV (kg) | ST | SV |
| LU | 5,85 | 3,51 | 4,15 | 2,49 | 2,43 | 1,46 | 1,27 | 0,76 | 58,43A | 69,33A |
| LU + IN | 6,63 | 3,98 | 4,31 | 3,75 | 3,28 | 1,97 | 2,12 | 1,27 | 50,54B | 66,06B |

Médias seguidas de letras distintas, na linha, diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

Os resultados demonstraram que a adição de inóculo na composição dos substratos proporcionou menores reduções nos teores de ST e SV, o que provavelmente está associado à maior resistência da fração orgânica contida no inóculo, em comparação com o resíduo sólido urbano orgânico. Neste sentido GORGATI (1996) verificou que quando aumentou a porcentagem de 5% inóculo em substratos contendo lixo “in natura” para 10%, as reduções dos teores de ST e SV foram inferiores.

A redução de sólidos totais e sólidos voláteis em relação ao estudo feito por CAETANO (1991) em estrumes bovinos e esterco de aves, foi intermediária, pois o resíduo sólido urbano orgânico (LU) apresentou uma redução de 58,43% de ST e 69,33% de SV e o resíduo sólido urbano orgânico com inóculo (LU + IN) 50,54% de ST e 66,06% de SV, enquanto que o estrume de bovino apresentou 53,0% de ST e 57,6% de SV e o esterco de aves 75,21% de ST e 80,33% de SV.

4.1.2. Produção de biogás

Os resultados de produção de biogás obtidos com a digestão anaeróbia de substrato preparado com resíduo sólido urbano orgânico ou resíduo sólido urbano orgânico + inóculo estão apresentados na Tabela 4 e representados graficamente na Figura 3, demonstrando a distribuição da produção de biogás e o acumulado desta produção, respectivamente.

Tabela 4. Produções médias semanais (m³) de biogás obtidas em biodigestores anaeróbios(1, 2 e 3) abastecidos com resíduo sólido urbano orgânico (LU) e resíduo sólido urbano orgânico + inoculo (LU + IN).

| Semanas | LU | | | | LU + IN | | | |
|------------------------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| | 1 | 2 | 3 | Média | 1 | 2 | 3 | Média |
| 1 | 0,13463 | 0,09874 | 0,10515 | 0,11284 | 0,19454 | 0,18563 | 0,18177 | 0,18731 |
| 2 | 0,04688 | 0,09308 | 0,06113 | 0,06703 | 0,01275 | 0,00872 | 0,01429 | 0,01192 |
| 3 | 0,00603 | 0,00178 | 0,00097 | 0,00293 | 0,00984 | 0,00641 | 0,01118 | 0,00914 |
| 4 | 0,00603 | 0,00178 | 0,00097 | 0,00293 | 0,00984 | 0,00641 | 0,01118 | 0,00914 |
| 5 | 0,00603 | 0,00178 | 0,00097 | 0,00293 | 0,00984 | 0,00641 | 0,01118 | 0,00914 |
| 6 | 0,00603 | 0,00178 | 0,00097 | 0,00293 | 0,04075 | 0,03383 | 0,04349 | 0,03936 |
| 7 | 0,00603 | 0,00178 | 0,00097 | 0,00293 | 0,07447 | 0,01490 | 0,06080 | 0,05006 |
| 8 | 0,00603 | 0,00178 | 0,00097 | 0,00293 | 0,08420 | 0,03473 | 0,10116 | 0,07336 |
| 9 | 0,01246 | 0,00178 | 0,00097 | 0,00507 | 0,10307 | 0,07849 | 0,10911 | 0,09689 |
| 10 | 0,02117 | 0,01446 | 0,00214 | 0,01259 | 0,19416 | 0,14393 | 0,14485 | 0,16098 |
| 11 | 0,03471 | 0,03296 | 0,01724 | 0,02830 | 0,19164 | 0,19603 | 0,20896 | 0,19888 |
| 12 | 0,14338 | 0,12569 | 0,03681 | 0,10196 | 0,15355 | 0,25013 | 0,18056 | 0,19475 |
| 13 | 0,13173 | 0,15049 | 0,12246 | 0,13489 | 0,07759 | 0,10754 | 0,09207 | 0,09240 |
| 14 | 0,17496 | 0,15522 | 0,03463 | 0,12160 | 0,10265 | 0,08712 | 0,13391 | 0,10789 |
| 15 | 0,16527 | 0,17191 | 0,08803 | 0,14174 | 0,11218 | 0,08266 | 0,12540 | 0,10675 |
| 16 | 0,13236 | 0,14307 | 0,16963 | 0,14836 | 0,09013 | 0,10029 | 0,09607 | 0,09549 |
| 17 | 0,05952 | 0,09480 | 0,17582 | 0,11005 | 0,08304 | 0,10011 | 0,07826 | 0,08714 |
| 18 | 0,07080 | 0,05565 | 0,16449 | 0,09698 | 0,06802 | 0,09630 | 0,05141 | 0,07191 |
| 19 | 0,07535 | 0,06957 | 0,06819 | 0,07104 | 0,03566 | 0,05728 | 0,02913 | 0,04069 |
| 20 | 0,07246 | 0,08370 | 0,05187 | 0,06934 | 0,02400 | 0,03435 | 0,02367 | 0,02734 |
| 21 | 0,06001 | 0,07401 | 0,05223 | 0,06208 | 0,01598 | 0,02363 | 0,01760 | 0,01907 |
| 22 | 0,05283 | 0,06461 | 0,06415 | 0,06053 | 0,01545 | 0,02267 | 0,01645 | 0,01819 |
| 23 | 0,04898 | 0,05790 | 0,07818 | 0,06169 | 0,01402 | 0,01982 | 0,01537 | 0,01640 |
| 24 | 0,04891 | 0,05346 | 0,07366 | 0,05867 | 0,01020 | 0,01359 | 0,00665 | 0,01014 |
| 25 | 0,03774 | 0,04116 | 0,05340 | 0,04410 | 0,00814 | 0,00908 | 0,00498 | 0,00740 |
| 26 | 0,02754 | 0,03059 | 0,03955 | 0,03256 | 0,00693 | 0,00775 | 0,00404 | 0,00624 |
| 27 | 0,02324 | 0,02508 | 0,04703 | 0,03178 | 0,00581 | 0,00801 | 0,00096 | 0,00493 |
| 28 | 0,01980 | 0,02115 | 0,05031 | 0,03042 | 0,00599 | 0,01111 | 0,00000 | 0,00570 |
| 29 | 0,01564 | 0,01623 | 0,03325 | 0,02171 | 0,00439 | 0,00750 | 0,00000 | 0,00396 |
| 30 | 0,01294 | 0,01357 | 0,02122 | 0,01591 | 0,00361 | 0,00429 | 0,00000 | 0,00263 |
| 31 | 0,01163 | 0,01322 | 0,01757 | 0,01414 | 0,00441 | 0,00438 | 0,00000 | 0,00293 |
| 32 | 0,01119 | 0,01144 | 0,01582 | 0,01282 | 0,00489 | 0,00489 | 0,00122 | 0,00367 |
| 33 | 0,01093 | 0,01039 | 0,01480 | 0,01204 | 0,00518 | 0,00520 | 0,00194 | 0,00410 |
| 34 | 0,00890 | 0,00747 | 0,00636 | 0,00758 | 0,00438 | 0,00178 | 0,00066 | 0,00227 |
| Total (m³) | 1,70 | 1,74 | 1,67 | 1,71A | 1,78 | 1,77 | 1,78 | 1,78A |

Médias seguidas de letras distintas, na linha, diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

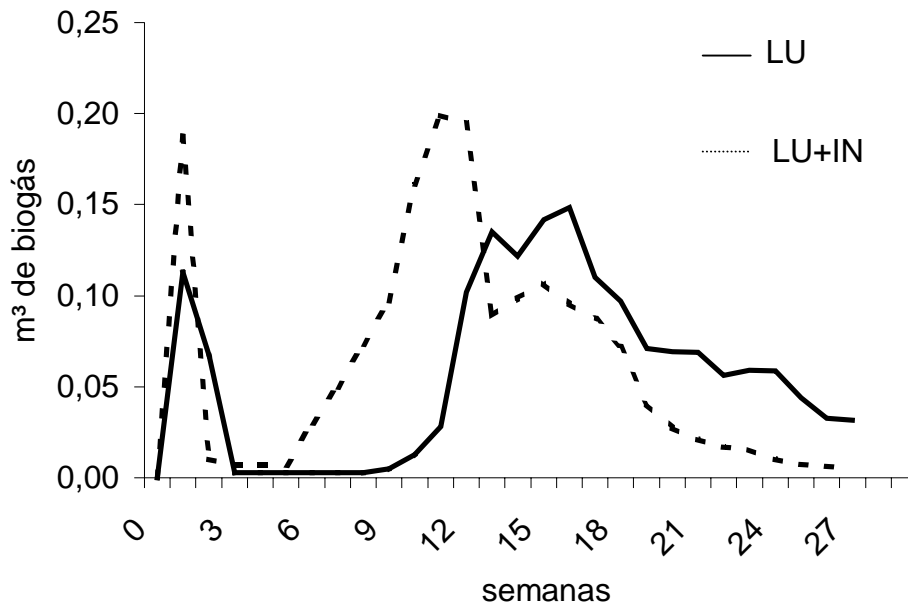


Figura 3 . Distribuição média diária da produção de biogás para os biodigestores abastecidos com lixo urbano (LU) e lixo urbano + inoculo (LU+IN).

De acordo com os resultados obtidos se verifica que não houve efeito da adição de inóculo sobre a produção total de biogás, sendo a média de produção de 1,71 e 1,78 m³ de biogás, em biodigestores abastecidos com lixo urbano e lixo urbano + inóculo, respectivamente. No entanto, se observa (Figura 3) que ocorreu antecipação na produção de biogás quando se adicionou inóculo ao substrato, o que se mostra de significativa importância para a redução do período de retenção dos substratos no interior dos biodigestores, verificando que o início da produção efetiva do biogás para os biodigestores alimentados com lixo urbano se deu com 70 dias e o pico de produção aos 120 dias. Já quando se adicionou inoculo, o início da produção foi aos 42 dias e o pico aos 84 dias.

4.1.3. Potenciais de produção de biogás

Os potenciais de produção de biogás obtidos com a digestão anaeróbia de substrato preparado com lixo urbano ou lixo urbano + inóculo estão apresentados

na Tabela 5 em m³/kg de sólidos totais adicionado, m³/kg de sólidos voláteis adicionado, m³/kg de sólidos voláteis reduzido e m³/kg de lixo orgânico.

Tabela 5. Potenciais de produção total de biogás em m³/kg de substrato adicionado, m³/kg de sólidos totais adicionado, m³/kg de sólidos voláteis adicionado, m³/kg de sólidos voláteis reduzido e m³/kg de lixo orgânico adicionado no resíduo sólido urbano orgânico (LU) e no resíduo sólido urbano orgânico com inóculo (LU + IN)

| | m ³ de biogás | | | | |
|-------|--------------------------|----------------|----------------|----------------|---------------------|
| | kg substrato | kg ST adicion. | kg SV adicion. | kg SV reduzido | kg resíduo adicion. |
| LU | 0,029A | 0,49A | 0,69A | 0,99A | 0,13A |
| LU+IN | 0,030A | 0,45A | 0,47B | 0,72B | 0,14A |

Médias seguidas de letras distintas, na coluna, diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

Observa-se que o potencial do resíduo sólido urbano orgânico (LU) de São José do Rio Preto na produção de biogás em m³/kg de resíduo sólido urbano orgânico adicionado (0,13 e 0,14 m³/kg para LU e LU + IN, respectivamente) está dentro dos parâmetros obtidos por GORGATI (1996), que obteve variação de 0,1033 a 0,1395 m³ de biogás/kg de resíduo sólido urbano orgânico.

Em relação ao parâmetro produção de biogás por kg de SV adicionado se verifica o maior rendimento de biogás quando foi utilizado somente o resíduo sólido urbano orgânico na composição dos substratos, visto que a adição de inóculo pode ter comprometido a qualidade da fração orgânica, pois o inóculo se caracteriza por ser um produto previamente fermentado e, portanto, com o conteúdo de SV mais resistente à degradação. Comportamento semelhante foi observado ao se verificar a produção de biogás por kg de SV reduzido, indicando que a fração volátil degradada nos biodigestores que receberam inóculo na composição dos substratos proporcionou menor eficiência na produção de biogás, em média 0,72 m³ de biogás/kg de SV reduzido, em comparação com a condição sem o emprego de inóculo, que foi de 0,99 m³ de biogás/kg de SV.

4.1.4. Características químicas dos biofertilizantes obtidos

Os efluentes foram analisados quanto aos teores de N, P, K, Na, Ca, Mg, Mn, Zn, Fe, Co, Cu, Cr, Ni e Cd, após a fermentação dos biodigestores. Os resultados estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Teores de macro e micro nutrientes e metais pesados do efluente dos biodigestores com e sem inoculo.

| | g/100g | | | | | | µg/100g | | | | | | | |
|-------------------|--------|------|------|------|------|------|---------|-------|--------|-------|-------|------|-----|-----|
| | N | P | K | Na | Ca | Mg | Mn | Zn | Fe | Co | Cu | Cr | Ni | Cd |
| Média LU | 0,01 | 0,18 | 2,14 | 1,73 | 0,61 | 0,57 | 20,02 | 41,35 | 225,69 | 8,00 | 8,29 | 5,42 | n/d | n/d |
| Média LU+IN | 0,02 | 0,25 | 2,32 | 1,47 | 0,55 | 0,54 | 27,48 | 51,63 | 252,56 | 10,12 | 10,43 | 6,63 | n/d | n/d |
| n/d-não detectado | | | | | | | | | | | | | | |

Os resultados demonstram que com exceção do Na, Ca e Mg, houve maior concentração de nutrientes nos efluentes dos biodigestores em que se adicionou inóculo aos substratos. Este fato provavelmente se deva às significativas concentrações de nutrientes no inóculo, já que nos biodigestores em que foi adicionado, substituiu parte da água empregada na diluição dos substratos, colaborando assim para o enriquecimento do meio e conseqüentemente melhoria do produto final.

Observa-se ainda que não foram detectadas concentrações de Ni e Cd, o que indica que o biofertilizante não apresenta restrições para a utilização quanto ao conteúdo destes elementos na composição.

4.2-Compostagem

São apresentados nos itens seguintes os resultados obtidos considerando-se a temperatura, os teores de carbono, N, sólidos totais, voláteis.

4.2.1. Temperaturas das Leiras

Os resultados representados Figura 4 se referem às temperaturas médias semanais das leiras de compostagem formadas a partir do resíduo sólido urbano orgânico.

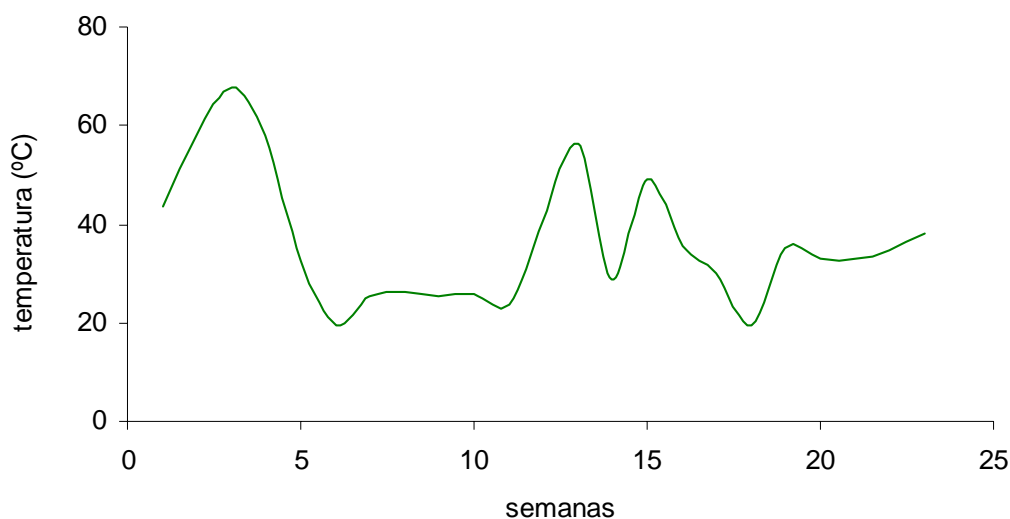


Figura 4. Temperaturas médias semanais das leiras de compostagem formadas a partir do resíduo sólido urbano orgânico.

Durante os primeiros 30 dias de compostagem foram verificadas temperaturas acima de 40° C no interior das leiras, evidenciando a importância desta fase sobre a redução e/ou eliminação de patógenos. Verifica-se que a partir da quarta semana de compostagem ocorreram temperaturas abaixo de 40° C. No entanto, após dez semanas de enleiramento, houve novo aumento da temperatura no interior das pilhas, evidenciando-se que além dos benefícios em relação à descontaminação do material, a elevação da temperatura pode auxiliar na degradação de frações mais resistentes, como as fibras, por exemplo.

KIEHL (2002) considera a faixa ótima de temperatura para compostagem aquela de 45°C a 65°C. Temperaturas acima de 65°C tornam este processo menos eficiente, e acima de 70°C, por longo período, são desaconselháveis por restringirem a ação dos microrganismos mais sensíveis, insolubilizar proteínas hidrossolúveis, provocar

alterações químicas indesejáveis e desprendimento de amônia, se o material possuir baixa relação C/N.

4.2.2. Rendimento na Produção de Composto

Na Tabela 7 é apresentado o rendimento do composto obtido com base na matéria seca.

Tabela 7. Rendimento de composto das leiras conduzidas, em porcentagem, nos 150 dias.

| Dias | MS inicial (kg) | MS final (kg) | Rendimento (%) |
|------|-----------------|---------------|----------------|
| 150 | 989,34 | 410,77 | 41,52 |

O valor do rendimento obtido (41,52%) mostrou-se equivalente aos quantificados por GORGATI (1996), que foi de 40% de composto a partir da compostagem da fração orgânica do resíduo sólido urbano, também de São José do Rio Preto.

Considerando-se que a quantidade média de fração orgânica produzida diariamente de resíduo sólido urbano é de 175 toneladas, tendo como média um rendimento de 41,52% de composto, seria possível a produção de 72 toneladas de composto diariamente.

4.2.3. Teores de Carbono, Nitrogênio, Sólidos Totais, Sólidos Voláteis, Matéria Orgânica Compostável, Matéria Orgânica Resistente a Compostagem e Demanda Química de Oxigênio.

Os resultados obtidos na formação das leiras de compostagem, aos 30, 60, 90, 120 e 150 dias (final) de enleiramento, estão apresentados na Tabela 8, em quantidades de matéria natural e seca, teores de sólidos totais e redução de matéria seca. A Figura 5 representa a redução de massa seca ao longo da compostagem.

Tabela 8. Quantidades (em kg) de matéria natural e seca, % de sólidos totais e voláteis e redução da quantidade de MS, aos 0, 30, 60, 90, 120 e 150 dias de formação das leiras de compostagem, a partir do resíduo sólido urbano orgânico.

| Dias | MN (kg) | ST (%) | SV (%) | MS (kg) | Redução MS (%) |
|------|---------|--------|--------|---------|----------------|
| 0 | 2200,0 | 44,97 | 58,83 | 989,34 | - |
| 30 | 1200,0 | 65,84 | 47,06 | 790,08 | 20,1 |
| 60 | 1200,0 | 60,50 | 43,53 | 726,00 | 26,6 |
| 90 | 1082,5 | 63,10 | 42,80 | 683,04 | 31,0 |
| 120 | 1100,0 | 58,46 | 40,82 | 643,06 | 35,0 |
| 150 | 597,4 | 68,76 | 29,24 | 410,77 | 58,5 |

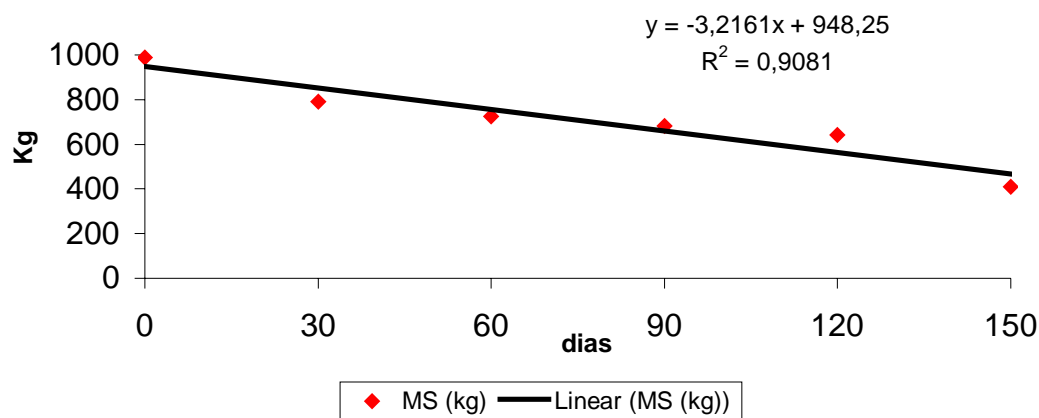


Figura 5 .Redução de massa seca enleirada, durante a compostagem do resíduo sólido urbano orgânico.

Conforme a Tabela 8 e a Figura 5, observa-se redução da massa seca enleirada da ordem de 58,5%, sendo a equação que determinou as reduções obtidas igual a $y = -3,2161x + 948,25$ com $R^2 = 0,9081$. Esta equação pode ser utilizada no dimensionamento de pátios de compostagem.

Os teores de C, N, relação C:N, matéria orgânica compostável (MOC), matéria orgânica resistente a compostagem (MORC) e demanda química de oxigênio (DQO) contidos no material de formação das leiras de compostagem, aos 30, 60, 90, 120 e 150 dias (final) de enleiramento, estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9. Teores de carbono e nitrogênio, relação C:N, matéria orgânica compostável (MOC), matéria orgânica resistente a compostagem (MORC) e demanda química de oxigênio (DQO) aos 0, 30, 60, 90, 120 e 150 dias da compostagem do resíduo sólido urbano orgânico

| Dias | % C | %N | C:N | MOC (%) | MORC (%) | DQO (mg O ₂ /g) |
|----------|-------|------|-------|---------|----------|----------------------------|
| 0 | 24,47 | 1,09 | 22,52 | 44,05 | 36,31 | 652,36 |
| 30 | 21,58 | 1,54 | 13,99 | 38,84 | 33,08 | 575,26 |
| 60 | 20,91 | 1,68 | 12,45 | 37,64 | 31,08 | 557,47 |
| 90 | 20,47 | 1,67 | 12,26 | 36,84 | 30,54 | 545,61 |
| 120 | 18,46 | 1,82 | 10,15 | 33,23 | 30,67 | 492,23 |
| 150 | 14,46 | 1,95 | 7,41 | 26,03 | 21,83 | 385,48 |
| Conc (%) | -40,9 | 79,5 | -67,1 | -40,9 | -39,9 | -40,9 |

De acordo com os resultados foram observadas reduções de 58,5% nas quantidades de massa seca enleirada e de 40,9% nos teores de carbono orgânico, matéria orgânica compostável e demanda química de oxigênio. Houve concentração nos teores de nitrogênio, ao compararem-se os conteúdos no material inicial e no composto.

Os resultados obtidos no que se refere à relação carbono e nitrogênio estão de acordo com os estudos realizados por KIEHL (2002), pois segundo este autor, um composto curado deve ter em média 300 mg O₂/g de amostra. Conforme a Tabela 9 o composto do lixo urbano analisado tem 385,48 mg O₂/g. Supõe então que este composto está curado.

A relação C/N e a DQO de uma amostra tem uma perfeita relação. Isto se explica pelo fato de na compostagem ocorrer uma perda de carbono e reciclagem do nitrogênio que não se perde, por isso à medida que a relação C/N do composto vai abaixando,

a DQO também abaixa. Isto ocorreu conforme a Tabela 9. Significa que a compostagem foi corretamente conduzida, segundo KIEHL (2002).

Os valores médios de C/N variam entre 11-13, segundo CRAVO et al.(1998), determinado em compostos de resíduo sólido urbano orgânico obtido em várias usinas de compostagem brasileiras e os valores obtidos no resíduo sólido urbano orgânico podem ser considerados abaixo do recomendado, pois com 150 dias o valor foi de 7,41.

Na Tabela 10 são apresentados os teores de macro e micro nutrientes, na qual se observa que depois de 150 dias os teores de metais pesados como Cádmio (Cd) não foi detectado, Níquel (Ni) não foi detectado, Chumbo (Pb) não foi detectado. Isto é considerado um fator positivo, pois indica que este composto tem toxicidade baixa em relação a esses elementos e segundo KIEHL(2002) no Brasil não existem ainda pesquisas, levando em conta a determinação do nível crítico de metais pesados para diferentes tipos de solo. Não se pode aplicar as escalas européias, pois os solos daquela região são solos de clima frio e solos rasos.

Tabela 10. Teor de macro e micro nutrientes e metais pesados do Processo de Compostagem no Composto.

| Dias | g/100 gramas de MS | | | | | | µg / 100 gramas de MS | | | | | | | |
|------|--------------------|------|------|------|------|------|-----------------------|-------|--------|-------|-------|------|------|------|
| | N | P | K | Na | Ca | Mg | Mn | Zn | Fe | Co | Cu | Ni | Cd | Pb |
| 0 | 1,09 | 0,16 | 0,82 | 0,53 | 0,46 | 0,25 | 18,43 | 14,90 | 291,31 | 8,87 | 6,97 | n.d. | n.d. | n.d. |
| 30 | 1,54 | 0,15 | 1,09 | 0,68 | 0,66 | 0,27 | 18,50 | 21,09 | 283,96 | 8,56 | 11,18 | n.d. | n.d. | n.d. |
| 60 | 1,68 | 0,16 | 1,31 | 0,83 | 0,81 | 0,37 | 21,90 | 33,09 | 285,12 | 9,46 | 29,08 | n.d. | n.d. | n.d. |
| 90 | 1,67 | 0,23 | 1,25 | 0,83 | 0,84 | 0,41 | 24,68 | 32,11 | 295,33 | 8,96 | 20,97 | n.d. | n.d. | n.d. |
| 120 | 1,82 | 0,19 | 1,11 | 0,73 | 0,82 | 0,44 | 29,34 | 36,49 | 323,69 | 10,22 | 25,09 | n.d. | n.d. | n.d. |
| 150 | 1,95 | 0,28 | 1,05 | 0,71 | 0,88 | 0,45 | 30,18 | 36,88 | 324,50 | 10,11 | 20,88 | n.d. | n.d. | n.d. |

n.d.-não detectado

4.3-Equivalência energética entre os processos de biodigestão anaeróbia e de compostagem

Tabela 11. Potencial Energético, Material Flutuante e Perdas ou Rejeitos (plásticos , metais) do LU (resíduo sólido urbano orgânico) de São José do Rio Preto através da biodigestão anaeróbia e compostagem

| LU (t/ano) | BIODIGESTÃO ANAERÓBIA | | | COMPOSTAGEM | | |
|---------------|-----------------------|----------------------------|------------------|-----------------|------------------|--------------------|
| | Material flutuante | Biogás m ³ /ano | Biogás (tep/ano) | Perdas Rejeitos | Composto (t/ano) | Composto (tep/ano) |
| 63 875 | 18,79% | 8,5 milhões | 2 796,85 | 30,96% | 26 280 | 1 545,88 |

Segundo AMAZONAS (1990) a equivalência energética na substituição de adubo mineral por composto orgânico é de uma tonelada equivalente de petróleo para cada 17 toneladas de composto orgânico utilizado. O cálculo baseia-se na obtenção da quantidade equivalente de nutrientes entre o composto e o adubo. Conforme a Tabela 11 a produção do composto foi de 26 280 t/ano equivalendo a 1 545,88 tep/ano.

Segundo CAMPANI (1996), estudos realizados com o Lixo Domiciliar de Porto Alegre, em um ano 181.185,6 toneladas de resíduos sólidos urbanos poderiam produzir 44.023,2 toneladas de composto e 4.685,17 tep/ano de biogás. De acordo com a Tabela 11, o resíduo sólido urbano orgânico de São José do Rio Preto segue os mesmos parâmetros tendo uma produção de 26 280 t/ano de composto para 63 875 toneladas de lixo urbano e 2 796,85 tep/ano de biogás ou 8,5 milhões de m³/ano de biogás.

Através das informações contidas na Tabela 11 pode-se estimar a equivalência do potencial energético, onde o biogás tem aproximadamente 2 796,85 tep/ano e o composto tem 1 545,88 tep/ano. Pode-se deduzir que, em relação ao tep/ano, o processo de biodigestão anaeróbia tem mais potencial que o processo de compostagem.

Os materiais flutuantes (plásticos e outros equivalentes) contidos na Tabela 11 significam que não são degradáveis através da biodigestão anaeróbia.

As perdas ou rejeitos (plásticos, seus derivados e metais) no processo de compostagem são na ordem de 30,96%, conforme Tabela 11, mostrando-se que há muito material de difícil decomposição para esse processo aeróbio.

Tabela 12. Quantidade de nutrientes: N(nitrogênio), P (fósforo) e K (potássio) em relação a MS (Massa Seca) no processo de compostagem do resíduo sólido urbano orgânico.

| MS | N | P | K |
|--------------|-----------|---------|---------|
| 100 gramas | 1,95g | 0,28g | 1,05g |
| 79 toneladas | 1 540,5kg | 221,2kg | 829,5kg |

De acordo com a Tabela 12, pode-se verificar que se a produção diária de LU for de 79 toneladas de MS, como é o caso de São José do Rio Preto, tem-se um valor significativo em relação aos nutrientes N - 1 540,5kg, P - 221,2kg e k - 829,5kg. Pode-se estudar a viabilidade de se usar este composto em relação ao fertilizante mineral.

Tabela 13. Quantidade de nutrientes: N(nitrogênio), P (fósforo) e K (potássio) em relação a produção diária de LU(resíduo sólido urbano orgânico) no processo de biodigestão anaeróbia.

| LU | N | P | K |
|---------------|-------|-----------|----------|
| 0,02 kg | 0,02g | 0,25g | 2,32g |
| 175 toneladas | 175kg | 2 187,5kg | 20 300kg |

Na Tabela 13 são apresentados dados referentes à produção de nutrientes N, P e K no processo de biodigestão anaeróbia para 100 gramas de substrato onde, 21,66g ou 0,02 kg eram de LU. Portanto, para uma produção diária de 175 toneladas de resíduos sólidos urbanos, tem-se N –175kg, P - 2 187,5kg e K - 20 300kg.

Comparando-se os dois processos (Tabela 12 e 13) o composto tem maior produção de N(nitrogênio) que o biofertilizante, enquanto que em relação aos nutrientes P(fósforo) e K(Potássio) o biofertilizante tem maior produção.

A viabilidade da utilização do composto ou do biofertilizante vai depender do tipo de cultura a ser utilizado.

5. CONCLUSÃO

Os estudos de compostagem e digestão anaeróbia realizados com resíduo sólido urbano orgânico do município de São José do Rio Preto demonstraram um potencial energético expressivo e importante para as atividades agrícolas no que se relaciona ao composto, ao biofertilizante e ao biogás.

Alguns parâmetros analisados demonstraram que:

- A produção de biogás do resíduo sólido urbano orgânico de São José do Rio Preto foi da ordem de $0,13\text{m}^3/\text{kg}$ para o resíduo sólido urbano orgânico sem inóculo e $0,14\text{ m}^3/\text{kg}$ com inóculo.

- O potencial de biogás em um ano é em torno de 8,5 milhões de m^3 para uma produção de resíduo sólido urbano de São José do Rio Preto-SP, de 63 875 ton/ano e a produção de composto é de 26 280 t/ano para a mesma quantidade de resíduo sólido urbano.

- O composto tem uma produção maior de N (nitrogênio) que o biofertilizante, enquanto que em relação aos nutrientes P (fósforo) e K (Potássio) o biofertilizante tem maior produção.

- Sugere-se melhorar a conscientização da população no que se refere à separação dos materiais contidos no resíduo sólido urbano orgânico, para que não haja tantos rejeitos como se constatou uma perda de 30,96%, no processo de compostagem, de materiais que poderiam estar sendo utilizados na reciclagem se fossem mais bem separados e de 18,79% de materiais flutuantes no efluente da biodigestão anaeróbia.

- Sugere-se a execução de pesquisa voltada à viabilidade econômica relacionada com a biodigestão anaeróbia e compostagem.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AB'SABER, A. N.; MULLER-PLANTENBERG,C.. **Previsão de Impactos**. São Paulo: ed. USP. 2ª ed. 1ª reimpr.: 2002. 573p.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 19th ed. Washington, 1995.

AMAZONAS, M. **Reciclagem de resíduos sólidos domiciliares**. São Paulo,1990. 11p.(apostila).

AMORIM, A.C., **Caracterização dos dejetos de caprinos: reciclagem energética e de nutrientes**. 2002.113 p. Dissertação (Mestrado em Produção Animal) – Universidade Estadual Paulista/ Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Campus de Jaboticabal, São Paulo,2002.

BATAGLIA, O. G. *et.al.* **Métodos de análises químicas de plantas**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1983. 48p. (Boletim Técnico)

BENINCASA,M. et al. Determinação do tempo de retenção para diferentes substratos (esterco e/ou resíduos de produtos agrícolas) submetidos à biodigestão anaeróbia. In: XV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, São Paulo, 1986. **Anais...**, São Paulo, 1986. p.81.

BENINCASA, Ma.; LUCAS JR, J. Caracterização do lixo de CEASA como substrato para Biodigestão Anaeróbia. **Revista Energia na Agricultura**. Est.São Paulo, v.15, n 1,p27 2000.

BENINCASA, Ma. **Caracterização do lixo de Ceasa: como substrato para compostagem e biodigestão anaeróbia e como alimento animal.** 1997. 82f. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu-SP, 1997.

BIDONE, F. R. A.; POVINELLI, J. . **Conceitos Básicos de Resíduos Sólidos.** São Carlos - Est.São Paulo: Projeto REENGE, EESC/USP, 1999. 109p.

BIDONE, F. R. A. **A vermicompostagem dos resíduos sólidos de curtume, brutos e previamente lixiviados, utilizando composto de lixo urbano com substrato.** 1995. 184 p. Tese (doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos – USP.

BUBU, A. Biomassa: uma energia brasileira. Site: <http://www.ambientebrasil.com.br>. Acesso em 02/02/05

BULLARD et alii. **Energy analysis; handbook for combining process and input-output analysis.** In: CAC Document,214, University of Illinois,USA, 1978. 127p.

BUENO, O.C.; CAMPOS,A.T.;CAMPOS,A.T. **Balanco de energia e contabilização da radiação global:simulação e comparativo.** In: Avances en ingeniería agrícola. Buenos Aires. Editorial Facultad de Agronomia, 2000. p.477-82.

CAETANO, L. **Proposição de um sistema modificado para quantificação de biogás.** 1985. 75f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1985.

CAETANO, L.**Metodologia para estimativa da produção contínua de biogás em biodigestores modelo indiano.** 1991. 112 f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1991.

CAMPANI, D.B.; MACCRINI,A;PERUFO,M.**Balanco energético dos resíduos sólidos urbanos.** In CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA,XXV,1996 , São Paulo: SBEA,FCAV-UNESP-Jaboticabal.

CAMPOS,.C. Balanços energéticos agropecuários:uma importante ferramenta como indicativo de sustentabilidade de agroecossistemas.**Revista Ciência Rural.** Santa Maria – R.S. vol.34, nº 6, Santa Maria nov/dez.2004.

CARVALHO, S. M. R. **Balço energético e potencial de produção de biogás em granja de postura comercial na região de Marília, SP.** 1996. 88f. Tese (Doutorado em Agronomia: Energia na Agricultura) -Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu-SP, 1996.

CRAVO, M. S., MURAOKA, T.; GINÉ, M.F. Poluição do solo e qualidade ambiental – Caracterização química de compostos de lixo urbano de algumas usinas brasileiras. **Revista Brasileira de Ciências do Solo.** Campinas – Est.São Paulo, v.22, n.3, 1998. p.547-553.

D'ALMEIDA, M. L. O.; VILHENA, A.. **Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado.** 2ª ed. São Paulo: IPT/CEMPRE, 2000. 370p.

FORESTI, E. **Fundamentos do Processo de digestão anaeróbia.** In: TRATAMIENTO ANAEROBICO, Montevideo, Uruguay, 1994. 111p.

Glossário. Disponível em:< <http://www.cnpsa.embrapa.br/invtec/glossário.html>>. Acesso em: 10 fev.2004.

GOLDEMBERG, J.**Energia no Brasil.** Livros Técnicos e Científicos Editora, São Paulo. 1979.171p.

GORGATI, C. Q.. **Fração Orgânica de Lixo Urbano como Substrato para Biodigestor e como Matéria Prima para Compostagem e Vermicompostagem.** 1996. 79f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônômicas - Universidade Estadual Paulista,. Botucatu-SP, 1996.

GORGATI, C.Q.; LUCAS JR.,J.; CANCIAN,A.J. Estudo da fração orgânica de lixo urbano como substrato para biodigestor e para vermicompostagem. In: XXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 1994. Campinas - **Anais...** Campinas: UNICAMP. Registrado e catalogado nº 94-2-145. 1994.

HOLF, G.J.; KRIEG,N.R.; SNEATH,PH.A.; STANLEY,J.T.; WILLIAMS,S.T. **BRGEY'S Manual of deternative bacteriology.** Ed.Lippincott Williams e Wilkins.1994.

JAHNEL, M. C.; MELLONI,R.; CARDOSO,E. J.B.N. Maturidade de Composto de Lixo Urbano. **Sci.agric.** vol. 56. nº 2. 1999.

KIEHL, E.J. **Fertilizantes Orgânicos.**São Paulo: Ed. AGRONÔMICA CERES, 1985,492p.

KIEHL, E.J. **Metodologia de compostagem e ação fertilizante do composto de resíduos domiciliares**. Piracicaba-Est.São Paulo: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz-USP, 1979.

KIEHL, E.J. **Manual de compostagem: maturação e qualidade do composto**. Piracicaba: Gráfica e Ed: DEGASPARI, 2002,171p.

KLEIN, S.A. Anaerobic digestion of solid waste.Compost Scie, **Emmaus**.v.13 n°1/p.6-11,1972.

KROEGER,B.; BARTH,J. **Composting processin Europe**.Biocycle,65-68.Abril 1998.

LEITE, A.D. **A energia do Brasil**. Rio de Janeiro: NOVA FRONTEIRA, 2ª ed., 1997, 528 p.

LUCAS JR., J. **Algumas considerações sobre o uso do estrume de suínos como substrato para três sistemas de biodigestores anaeróbios**. 1994. 137f. Tese (Livre-Docência Construções Rurais) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 1994.

MOTTA, F.S. **Produza sua energia – Biodigestores anaeróbios**. Recife: Editora S.A,1986, 144 p.

NOGUEIRA, L.A.H. **Biodigestão: A alternativa energética**. São Paulo: NOBEL, 1986,92p.

ORTOLANI, A. F.; LUCAS JR., J.; GALBIATI, J. A.; LOPES, L. R.; ARAÚJO, J. A. C.; BENINCASA, M.; BEDUSCHI, L. C.; COAN, O.; PAVANI, L. C.; MILANI, A. P.; DANIL, L. A.; LATANZE, R. J. Bateria de mini-biodigestores: Estudo, projeto, construção e desempenho. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 15, 1986, São Paulo. **Anais...** Botucatu: FCA/UNESP, 1986. p. 229-239.

PHILIPPI JR, A.; PELICIONE, M.C. F.. **Educação Ambiental: Desenvolvimento de Cursos e Projetos**.São Paulo: SIGNUS, 2000.

PIMENTEL,D. **Handbook of energy utilization in agriculture**. Boca Raton: CRC press, 1980, 475p.

REIS, M.F.P.; SILVA,A.A.;ELLWANGER,R.M. Valorização e comercialização do composto orgânico de uma unidade de triagem e compostagem. In: SIMPÓSIO SOBRE

COMPOSTAGEM, 1., 2004, Ciência e tecnologia:**Anais...** Botucatu: Departamento de Recursos Naturais, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, 2004. 1 CD-ROM.

SCHALCH, V.. **Análise comparativa do comportamento de dois aterros sanitários semelhantes e correlações dos parâmetros do processo de digestão anaeróbia.** 1991.104f Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos- USP, São Carlos, Est.São Paulo, 1991

SILVA, D.J. **Análise de alimentos: métodos químicos e biológicos.** UFV, Viçosa, 1981. 166p.

SPEECE, R.E. **Review – Enviromental requirements for anaerobic of biomass.** Advances in solos energia, 1983.69p.

STRINGHETA, A.C.O., et al. Recomposição da paisagem em áreas degradadas utilizando composto de lixo urbano e leguminosas na região de Viçosa, Minas Gerais. **Revista Ceres**, Viçosa, v.46, n.265, p.321-334,1999.

TIBAU, A. O. **Matéria Orgânica e Fertilidade do Solo.** 3ª ed. São Paulo: NOBEL, 1986.

TORTORA, G. J.: FUNKE, B. R.: CASE ,C. L. **Microbiologia.** 6ª ed. Porto Alegre: ARTMED, 2002. 827p.

TUNDISI, S.F. **Usos de energia.** São Paulo: ATUAL, 1991. 73p.

ULBANERE, R. C. **Análise dos balanços energéticos e econômicos relativa a produção e perdas de grãos de milho no Estado de São Paulo.** 1998. 127f. Tese (Doutorado em Agronomia/ Energia na Agricultura)- Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1988.

VESPA, I. C. G..**Educação ambiental e compostagem fundamentais para a preservação da bacia hidrográfica do rio Preto.** 2002. 54f. Monografia (Especialização em educação ambiental e recursos hídricos) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

ZEHNDER,A.J.B. **Biology of anaerobic microorganisms.** John Wiley and Sons, EUA. 1998. 872p.