

Produção de biogás utilizando biomassa de poda e lodo de esgoto no Município de Recife (PE)

Biogas production using biomass from tree branches and sewage sludge in the municipality of Recife (PE)

Thiago Cardoso Silva¹, Rafael Leite Braz², Emmanoella Costa Guaraná Araujo³, Gisely Alves da Silva⁴, Maria de Los Angeles Perez Fernandez Palba⁵

RESUMO: A gestão adequada dos resíduos sólidos urbanos culmina na melhor administração pública destes materiais. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a produção de biogás a partir da biodigestão anaeróbia da biomassa de poda utilizando lodo como inóculo, comparando as características químicas dos fertilizantes adquiridos pelos processos aeróbios e anaeróbios. Para tal, a matéria-prima utilizada como substrato foi constituída por lodo de esgoto da estação de tratamento de efluentes da Reserva Camará, em Camaragibe, e biomassa de poda do município do Recife, Pernambuco. Os experimentos foram realizados em laboratório, avaliando-se diferentes composições entre biomassa de poda, lodo de esgoto e água, a fim de se determinar qual destas apresentaria melhor eficiência para produção de biogás. Os gases liberados foram analisados em cromatógrafo para determinar os teores de metano produzidos. Tanto o fertilizante do processo de compostagem realizado pela EMLURB quanto o fertilizante orgânico da digestão anaeróbia foram caracterizados quimicamente em relação aos macronutrientes, carbono e relação C/N. Como resultados, a composição T8 (12,5% biomassa de poda, 37,5% lodo e 50% água) foi a que apresentou maiores produções de metano. Caso utilizasse essas condições, poderiam ser gerados 40,2 MWh de energia elétrica a partir da biodigestão da biomassa de poda, com renda bruta de cerca de 29,6 mil reais ao ano nos gastos com energia elétrica no município. Em relação à produção dos fertilizantes, os processos de compostagem e digestão anaeróbia apresentaram compostos com relação C/N de 9,7 e 18,6, respectivamente, não diferindo nos teores de N, K, P e Ca.

Palavras-chave: Biodigestão anaeróbia. Energia de biomassa. Fertilizantes orgânicos. Metano.

ABSTRACT: Adequate management of urban solid waste makes a better municipal administration of these materials. The production of biogas from the anaerobic biodigestion from the pruning of tree biomass with sludge as inoculum is analyzed. Chemical characteristics of fertilizers acquired by aerobic and anaerobic processes are compared. Raw material used as substrate comprised sewage sludge from the effluent treatment plant of the Camará Reserve, in Camaragibe, Brazil, and biomass from tree pruning in Recife PE Brazil. Experiments were carried out in a laboratory and evaluated different compositions of pruning biomass, sewage sludge and water to determine the best efficiency for biogas production. The gases released were analyzed on a chromatograph to determine methane contents. Fertilizer from the composting process by EMLURB and the organic fertilizer of anaerobic digestion were chemically analyzed with regard to macronutrients, carbon and C/N ratio. Under such conditions, 40.2 MWh of electricity could be generated from the biodigestion of pruning biomass, with gross income of approximately R\$ 29.6 thousand per year in electricity expenditures in the municipality. In the case of the production of fertilizer, the composting and anaerobic digestion processes showed compounds with C/N ratio of 9.7 and 18.6, respectively, not differing in N, K, P and Ca levels.

Keywords: Anaerobic biodigestion. Biomass energy. Organic fertilizers. Methane.

Autor correspondente:

Thiago Cardoso Silva - thiagocardoso.pe@gmail.com

Recebido em: 29/10/2019

Aceito em: 29/04/2020

INTRODUÇÃO

A gestão adequada dos resíduos sólidos urbanos culmina na melhor administração dos materiais que muitas vezes são desprezados sem avaliação prévia do seu reúso ou reciclagem, além do fato de que muitas vezes geram acúmulos nos aterros e alteram a sua composição química. Esse material necessita do manejo adequado para exploração de seu potencial de reúso (MARMOLEJO *et al.*, 2010).

¹ Mestre em Ciências Florestais, discente de Doutorado em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná, Curitiba (PR), Brasil.

² Doutor em Engenharia Florestal, docente do Departamento de Ciência Florestal da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife (PE), Brasil.

³ Mestre em Ciências Florestais, discente de Doutorado em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná, Curitiba (PR), Brasil.

⁴ Mestre em Engenharia Química, discente de Doutorado em Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, Recife (PE), Brasil.

⁵ Doutora em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos, docente do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, Recife (PE), Brasil.

Quanto aos resíduos sólidos urbanos, há uma viabilização para uso dos gases liberados no processo de decomposição da matéria orgânica, denominado biogás. Na composição do biogás se encontram em maiores concentrações o metano e dióxido de carbono, numa proporção de 1/3 de gás metano, 1/3 de CO₂ e 1/3 de outros gases, como H₂S, O₂ e NH₃, podendo chegar a cerca de 60% de metano, a depender da composição do material utilizado nos biodigestores (KARLSSON *et al.*, 2014). Assim sendo, o metano constitui uma importante fonte energética, além de seu uso para este fim contribuir para a diminuição das concentrações desse gás na atmosfera (TEIXEIRA JUNIOR, 2016). Portanto, quando avaliado como fonte de energia, o biogás está relacionado com sustentabilidade por ser obtido a partir de matérias-primas que são rejeitos das atividades agroindustriais e atividades urbanas.

Em relação ao Brasil, até pouco tempo, o biogás era tratado apenas como subproduto do processo de decomposição anaeróbia dos resíduos urbanos e de animais e dos rejeitos de estações de tratamento de efluentes domésticos (GOLDEMBERG; PALETTA, 2012). Porém, a partir de diversos estudos com esses materiais (ANGELOV; BESCHKOV, 2016; PAVI *et al.*, 2017; RODRIGUES; LATAWIEC, 2018; GUERINI FILHO *et al.*, 2019; EDWIGES *et al.*, 2020; FRANQUETO; SILVA, 2020), foi possível perceber o potencial dessas fontes de matéria-prima que apresentam características econômicas viáveis e atrativas ao seu uso para fomentar a produção e consumo de energias renováveis.

Segundo Abreu (2014), quando se avalia um projeto de produção de biogás, a composição do material a ser digerido é um dos fatores mais importantes a ser levado em consideração, principalmente quanto à fração orgânica do composto, pois servirá como fonte nutricional para ocorrência dos processos biológicos de decomposição.

Desse modo, a disponibilidade de biomassa para ser utilizada no processo de produção de gases com potencial energético está ligada à alta produção de resíduos das mais diversas atividades. Os resíduos que compõem a biomassa de origem agrícola e florestal apresentam características viáveis para geração de energia das mais diversas formas para a conversão em energia calorífica ou elétrica (CORTEZ *et al.*, 2008; BRAND, 2010), sendo a poda uma das atividades geradoras de resíduos na área urbana.

218

Na cidade do Recife, em Pernambuco, anualmente pode-se ter uma produção de biomassa de poda superior a 4500 toneladas (EMLURB, 2017). Em 2006, foi implementado um programa de gerenciamento dos resíduos da prática da poda na área urbana, que resulta em material utilizado num processo de digestão aeróbia para produção de fertilizante que é utilizado para melhoria nutricional das áreas verdes e da arborização urbana em geral da cidade. Portanto, seria importante avaliar o potencial dessa fonte de biomassa para a produção de biogás, visto que também há como resíduo final um fertilizante orgânico com boas características nutricionais.

Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a produção de biogás a partir da biodigestão anaeróbia da biomassa de poda utilizando lodo como inoculante, além de comparar as características químicas dos fertilizantes adquiridos pelos processos aeróbios e anaeróbios, estimar a produção de biogás e avaliar alguns aspectos econômicos desta atividade.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 INOCULAÇÃO DOS SUBSTRATOS PARA DIGESTÃO ANAERÓBIA

A matéria-prima utilizada como substrato foi constituída por lodo de esgoto da estação de tratamento de efluentes da Reserva Camará, em Camaragibe, e biomassa de poda da cidade de Recife, Pernambuco, coletada junto à EMLURB/PCR.

Foram coletadas amostras de biomassa de poda devidamente trituradas em um caminhão triturador ainda verde, após corte. Como características, a biomassa de poda do Recife é constituída em sua grande maioria por lenho e casca de galhos e folhas, pois os materiais lenhosos com maiores dimensões são separados e não são triturados. Nas coletas realizadas pela EMLURB são misturadas todas as espécies podadas, portanto as amostras desse trabalho apresentam essa característica.

Para o experimento, foram coletadas três amostras contendo cerca de 50 Kg cada, que foram devidamente homogeneizadas e constituíram uma amostra composta, que foi seca em estufa de aeração regulada a 65°C ± 5°C por

um período de 48-72 horas, e posteriormente o material foi moído em moinho de facas com peneira de seleção de partículas de 2,0 mm (BEZERRA NETO; BARRETO, 2011).

Os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Microbiologia, Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco.

Os biodigestores utilizados no processo foram esquematizados em frascos de penicilina com capacidade total de 100 mL, utilizando-se seringas de 10 mL para armazenamento dos gases produzidos (Figura 1). A massa total de substrato constituiu percentual inferior a 80% do recipiente.



Figura 1. Biodigestor devidamente lacrado em simulação das condições de campo

A fim de determinar qual a composição entre biomassa de poda e lodo de esgoto apresentaria melhor eficiência para produção de biogás, foram avaliados tratamentos com substratos de composições diferentes (Tabela 1). Os substratos que continham as combinações de biomassa de poda e lodo de esgoto se apresentaram muito sólidos, portanto foram criados outros substratos contendo água na composição.

Tabela 1. Composição percentual e massa total inoculada nos biodigestores contendo biomassa de poda e lodo de esgoto

Código do Biodigestor	Composição percentual em massa (%)			Massa total (g)
	Biomassa de poda	Lodo de esgoto	Água destilada	
T1	100	0	0	30
T2	75	25	0	30
T3	50	50	0	30
T4	25	75	0	80
T5	0	100	0	80
T6	37,5	12,5	50	40
T7	25	25	50	80
T8	12,5	37,5	50	80

Durante o processo de preparo, os substratos tiveram seu pH inicial corrigidos utilizando solução de NaOH a 3N para um pH mais neutro, numa faixa entre 7,2 e 8,0.

Após inoculação do substrato nos frascos, estes foram devidamente tampados com tampas de borracha e lacrados com lacre metálico. Depois de totalmente vedados, todos os gases foram retirados com seringa até estado de vácuo. A fim de simular as condições em campo, os biodigestores foram mantidos em temperatura ambiente e foram cobertos com papel alumínio para ausência de iluminação. Cada tratamento foi realizado em duplicata.

2.2 CARACTERIZAÇÃO DO BIOGÁS

Os gases capturados no processo de biodigestão anaeróbia foram medidos em volume nas seringas e analisados por cromatografia, em cromatógrafo gasoso, obtendo-se o percentual de metano, gás carbônico e outros gases. Antes das análises, o cromatógrafo foi devidamente calibrado com um gás composto de 60% de metano e 40% de CO₂.

Por fim, a produção de metano, em m³, foi correlacionada com a massa de biomassa de poda utilizada como substrato, sendo os valores extrapolados para o total de biomassa de poda adquirida por ano em Recife.

O volume de metano produzido foi convertido em energia elétrica pela relação: 1,0 m³ de metano gera 9,9 kwh (AGRENER, 2006).

Por fim, foram realizadas análises estatísticas por meio da análise de variância (ANOVA) e realização do Teste de Tukey a 95% de probabilidade, utilizando o *software* Assistat 7.7. para determinar quais composições apresentaram maior eficiência para a produção de metano. As análises foram realizadas em duplicata.

2.3 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS FERTILIZANTES ORGÂNICOS

A fim de comparar os fertilizantes orgânicos dos processos aeróbio e anaeróbio de decomposição e biodigestão da biomassa de poda, foram realizadas análises químicas para determinar os teores dos macronutrientes N, P, K e Ca, e obtenção da relação C/N nos compostos. Ambos os processos tiveram a duração de 60 dias. Os fertilizantes foram secos em estufa a 65°C, para realização da digestão e realização das análises químicas. Posteriormente, os fertilizantes passaram em moinho de facas (2,0 mm) para trituração e homogeneização do material.

As metodologias utilizadas estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Metodologias utilizadas na caracterização química dos fertilizantes orgânicos

Análise	Método	Referências
Carbono	Volumetria	(BEZERRA NETO; BARRETO, 2011)
Nitrogênio	Arraste de vapor (Kjeldahl)	(SILVA, 2009)
Fósforo	Colorimetria (molibdo-vanadato)	(BEZERRA NETO; BARRETO, 2011)
Potássio	Fotômetro de chama	(BEZERRA NETO; BARRETO, 2011)
Cálcio	Fotômetro de chama	(BEZERRA NETO; BARRETO, 2011)

O fertilizante orgânico da digestão anaeróbia utilizado nas análises para comparação foi aquele cujo biodigestor apresentasse a maior produção de metano.

Também foram avaliados os teores na biomassa de poda e no lodo de esgoto para correção dos valores nutricionais relacionados aos processos de digestão.

Para testar a hipótese de nulidade e determinar se havia diferença estatística entre as formas de obtenção do fertilizante orgânico, foram realizadas análises de variância utilizando o *software* Assistat 7.7.

3 RESULTADOS

3.1 PRODUÇÃO DE METANO

Após avaliação de 60 dias de biodigestão, os tratamentos T4 (25% biomassa de poda e 75% lodo) e T8 (12,5% biomassa de poda, 37,5% lodo e 50% água) apresentaram as maiores produções de metano (Tabela 3), sendo este último a melhor composição para geração de metano, de acordo com a ANOVA.

Tabela 3. Média do volume total de metano (cm³) produzido por cada tratamento após 60 dias de biodigestão

Biodigestores	Volume total de CH ₄ (cm ³)
T1	0
T2	0
T3	0,47 c
T4	5,58 b
T5	2,06 c
T6	0
T7	1,17 c
T8	9,14 a

Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade.

Quando avaliada a produção de metano em função dos dias de digestão, os biodigestores T4 e T8 apresentaram maiores picos de produção nos primeiros 22 dias após inoculação, em que o T8 apresentou uma produção máxima de metano correspondente a 48%. A partir dos 45 dias de avaliação, todos os biodigestores apresentaram queda na produção de metano (Figura 2).

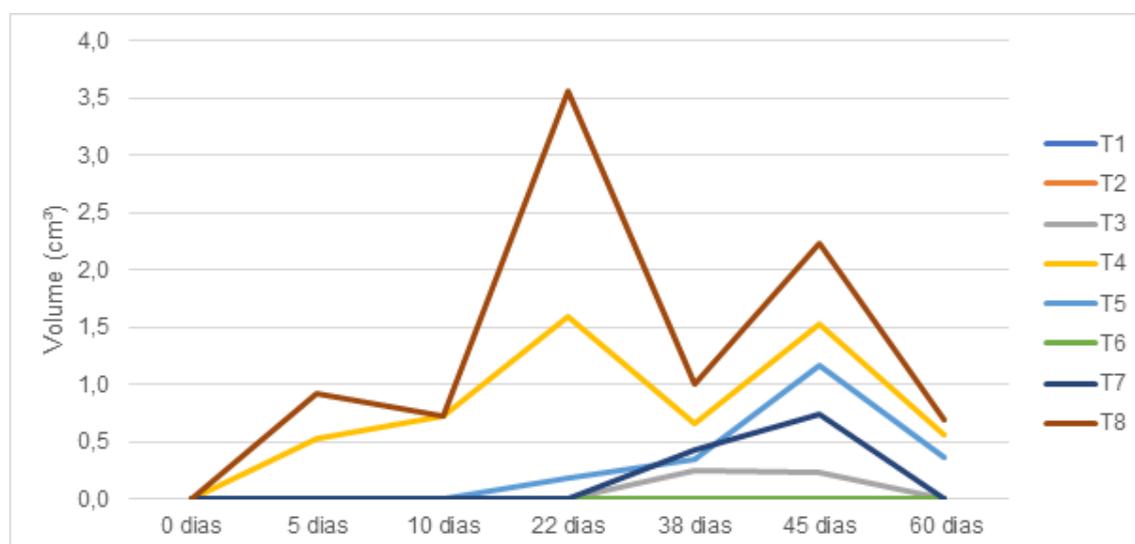


Figura 2. Produção de metano, em cm³, em função das diferentes composições e dias de digestão

Foi observado que um dia após inoculados os biodigestores das composições T4 e T8 já apresentaram produção de gases, porém os volumes não permitiam sua análise. Apenas a partir dos cinco dias de inoculação foram coletados gases suficientes para análise.

Ao levar em consideração que as quantidades de biomassa de poda inoculada nos tratamentos T4 e T8 corresponderam a 25% (20,0 g) e a 12,5% (10,0 g), respectivamente, é possível relacionar a produção total anual de poda e a quantidade de metano que poderia ser gerada utilizando esse material como inoculante (Tabela 4).

Tabela 4. Correlação entre os volumes de metano e a energia elétrica a ser produzida a partir da biodigestão da biomassa de poda e lodo de esgoto de Recife (PE)

Biodigestores	VCH ₄ (cm ³)	VCH ₄ (m ³ .kg ⁻¹ de biomassa)	VCH ₄ total (m ³ .ano ⁻¹)	Energia elétrica (MWh)
T4	5,58	2,79x10 ⁻⁴	1235,2	12,2
T8	9,14	9,14x10 ⁻⁴	4048,1	40,1

3.2. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS FERTILIZANTES ORGÂNICOS

Para complementar a discussão sobre a eficiência dos processos de digestão, na Tabela 5 se encontram as composições químicas das matérias-primas utilizadas na produção dos fertilizantes.

Tabela 5. Composição química das matérias-primas utilizadas na produção dos fertilizantes do processo de biodigestão da biomassa de poda e lodo de esgoto de Recife (PE)

Material	Teores nutricionais (%)					Relação C/N
	C	N	P	K	Ca	
Biomassa de poda	37,67	1,01	0,15	0,48	0,43	37,3
Lodo de esgoto	12,75	1,57	0,21	0,40	0,37	8,1

Como o tratamento T8 apresentou a maior produção de metano, este foi utilizado para a comparação com o fertilizante do processo de compostagem. De acordo com a avaliação nutricional dos fertilizantes (Tabela 6), juntamente com a relação C/N, foi observada apenas diferença nos teores de carbono.

Tabela 6. Avaliação nutricional dos fertilizantes produzidos nos processos de compostagem e biodigestão anaeróbia da biomassa de poda do Recife (PE)

Processo de digestão	Teores nutricionais (%)					Relação C/N
	C	N	P	K	Ca	
Compostagem	17,80**	1,83 ^{ns}	0,17 ^{ns}	0,49 ^{ns}	0,38 ^{ns}	9,7
Biodigestão anaeróbia	31,01	1,67	0,18	0,48	0,39	18,6

Teste de F pela ANOVA: ^{ns} = não apresenta diferença estatística; ** = apresenta diferença significativa (p < 0,01).

4 DISCUSSÃO

4.1 PRODUÇÃO DE METANO

Os tratamentos de apenas biomassa de poda (T1) e as composições de T2 (75% biomassa de poda e 25% lodo de esgoto) e T6 (37,5% biomassa de poda, 12,5% lodo e 50% água) não apresentaram geração de metano durante o período de digestão, apesar de produção de outros gases, como CO₂ e vapor d'água.

Um dos fatores que limitou a produção de metano nessas três composições foi a falta de umidade, principalmente nos tratamentos T1 e T2, visto que é necessária a presença de água para reprodução dos microrganismos

responsáveis para a produção de metano nessas condições, sendo também observada a pouca quantidade de lodo nesses tratamentos, mostrando que a quantidade de microrganismos presentes no meio não foi suficiente para realizar a decomposição da biomassa de poda.

Como observado nos resultados, aconteceu a queda na produção de gases dos tratamentos T4, T5 e T8 após o 45º dia, que provavelmente ocorreu devido à carga orgânica de compostos mais densos na biomassa de poda (CORTEZ *et al.*, 2008; BRAND, 2010), fazendo com que a quantidade de microrganismos não conseguisse realizar maiores digestões dos compostos em anaerobiose.

Observa-se que ao adicionar água na composição do tratamento T4 para criação do tratamento T8, houve um aumento de cerca de 60% na produção do volume final de metano.

A granulometria de 2,0 mm utilizada nesse trabalho e a quantidade de materiais sólidos da biomassa de poda influenciam diretamente na biodigestão, pois essas características estão ligadas à carga orgânica do composto e a liberação dos gases durante o processo, sendo que, segundo Pinna-Hernández *et al.* (2019), quanto menores as partículas, mais fácil ocorre a hidrólise da biomassa.

Em contrapartida, a biodigestão da poda com o lodo como inóculo não gerou uma alta quantidade total de metano, apesar das partículas apresentarem baixa granulometria (2,0 mm) e alto teor de materiais orgânicos. Porém, a carga orgânica da biomassa de poda, por apresentar composição mais complexa de celulose e lignina, necessitaria da realização prévia de uma hidrólise para facilitar a conversão dos sólidos em gases, pois de acordo com Salvadori *et al.* (2012), é nessa etapa que os componentes orgânicos mais complexos são convertidos em compostos de menor densidade que são utilizados pelas bactérias da etapa de fermentação. Portanto, aumentar o tempo de digestão seria uma alternativa para que a ação desses organismos culmine numa hidrólise mais completa do material orgânico.

Os compostos de cadeias mais complexas, como a celulose e a lignina, são principalmente degradados por fungos e actinobactérias, que muitas vezes não resistem muito tempo em anaerobiose. Segundo Ximenes (2003), existem poucas espécies de fungos anaeróbios, mas estes apresentam maior eficiência na quebra das moléculas da parede celular que os fungos aeróbios.

Porém, no caso da composição entre lodo de esgoto e biomassa de poda, tais fungos não apresentaram grande eficiência para degradação da matéria orgânica mais complexa para que as bactérias pudessem realizar a fermentação e produção de metano, visto a baixa produção de biogás, sendo a atividade microbiana de suma importância para a degradação da matéria orgânica (BARROS, 2012; ABREU, 2014; KARLSSON *et al.*, 2014).

Além disso, segundo Cortez *et al.* (2008), em alguns casos o processo de biodigestão necessita de temperaturas acima de 35°C para otimização da fase de hidrólise e proliferação de bactérias fermentativas. Sendo assim, o aumento da temperatura para a produção de biogás usando a biomassa de poda poderia ser uma forma de aumentar a eficiência para geração de metano com as composições avaliadas nesse trabalho.

Utilizando um sistema de geração de biogás a partir de capim e lodo de esgoto, pesquisadores observaram nas mesmas condições uma produção de metano de $3,6 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ de capim utilizado nos biodigestores (SINAFERM, 2015). Observa-se, então, que materiais constituídos por folhas teriam a capacidade de gerar cerca de 10 vezes mais metano que as biomassas que apresentam materiais lenhosos na sua composição, como a poda.

Nas condições avaliadas, o uso da biomassa de poda coletada na cidade do Recife em composições com lodo de esgoto teria capacidade para geração de 40,1 MWh por ano de energia elétrica a partir da biodigestão anaeróbia e produção de metano.

Ao converter tais valores para relação financeira do processo, observando-se que a taxa cobrada pela Companhia Elétrica de Pernambuco corresponde a R\$ 0,72 por kWh consumido, para o mês de janeiro de 2019 (CELPE, 2019), caso optasse pela geração de energia do biogás obtido pela biodigestão da biomassa de poda, poderia ser poupada uma renda bruta de cerca de 28,9 mil reais ao ano nos gastos com energia elétrica no município.

Levando em consideração os investimentos para implantação e manutenção dos biodigestores de campo, o processo de geração de biogás a partir da biomassa de poda, nas condições avaliadas neste trabalho, apresentaria

baixa eficiência para gerar energia elétrica e, a depender desses custos, poderia gerar déficit na receita do município, restando avaliar a qualidade do fertilizante orgânico produzido.

4.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS FERTILIZANTES ORGÂNICOS

Em relação aos teores de carbono, o fertilizante do processo de compostagem apresentou cerca de 50% de consumo do elemento em relação à biomassa de poda *in natura*. O fertilizante orgânico do processo anaeróbio de digestão apresentou pouca redução nos teores de carbono após os 60 dias, num total de 20% menos carbono. Por isso, foi observada diferença significativa entre os métodos de obtenção dos fertilizantes. Tais resultados apontam para uma baixa redução da relação C/N e atuação de microrganismos degradadores, como observado em outros trabalhos (FÉRNANDEZ *et al.*, 2005; UENO *et al.*, 2013; SILVA *et al.*, 2016; MATOS *et al.*, 2017).

Com essas reduções, é possível observar que o processo de compostagem foi mais eficiente na utilização do elemento para que os microrganismos realizassem a mineralização dos compostos, havendo a quebra de moléculas mais complexas (como celulose e lignina) pela ação de fungos e bactérias (Actinomycetos) nos processos aeróbios, como avaliado por estudos que se baseiam na biodegradação de materiais orgânicos (HAVUKAINEN *et al.*, 2018; MEENA; BUSI, 2019). E, como já mencionado anteriormente, a ausência de grande quantidade de organismos com capacidade de decompor essas moléculas durante o processo anaeróbio fez com que não houvesse alto consumo de carbono para a produção de metano. Já na compostagem, o consumo do elemento se deu de forma eficiente para a produção do composto orgânico com características próprias para uso como fertilizante.

Em relação aos teores de nitrogênio, não foi observada diferença estatística entre os métodos de obtenção dos fertilizantes, havendo um aumento dos teores em relação a biomassa de poda urbana utilizada como matéria-prima para produção desses compostos.

224

Segundo Nunes (2009), para manter um ambiente com características químicas favoráveis à fermentação, é necessário que haja a incorporação de materiais ricos em carbono e nitrogênio para proporcionar uma relação C/N adequada para a manutenção dos microrganismos durante a biodigestão.

Observando as matérias-primas, que a biomassa de poda urbana do Recife e o lodo de esgoto utilizado nas biodigestões apresentam relação C/N de 37,3 e 8,1, respectivamente, verifica-se que esses materiais possuem níveis adequados para a produção de fertilizantes, pois segundo Fernandes e Silva (1999), a matéria orgânica ideal para o início da biodigestão deve apresentar valores próximos a 30, podendo ocorrer numa faixa entre 20 a 70 de acordo com a capacidade de degradação do substrato, e o lodo apresentando relação C/N entre 5,0 e 11,0.

Ao fim do processo de biodigestão da matéria orgânica, que ocorre de forma eficiente, o fertilizante apresenta relação C/N próxima a 10, visto que os microrganismos absorvem uma proporção de 30 partes de carbono para uma parte de nitrogênio, sendo que 2/3 do carbono são liberados na respiração e o resto é imobilizado no protoplasma celular (KIEHL, 1985; SAFETY, HEALTH AND ENVIRONMENT WORLD CONGRESS, 2015).

Tal comportamento foi observado para a decomposição da biomassa de poda urbana na compostagem, visto que no final do processo foi observada uma relação C/N de 9,7. Para o fertilizante orgânico, a relação C/N do final do processo foi de 18,6, indicando que não houve uma ideal decomposição do material, visto que, de acordo com Oliveira, Sartori e Garcez (2008), de forma mais genérica, quanto menor for a relação C/N mais rapidamente ocorre a finalização da decomposição da matéria orgânica.

Em relação aos elementos minerais (fósforo, potássio e cálcio), não foi observada diferença significativa entre os processos de obtenção dos fertilizantes. Logo, para esses elementos, não houve consumo diferenciado por parte dos organismos que proporcionaram as biodigestões aeróbia e anaeróbia, podendo ocorrer o aumento da concentração desses nutrientes pelo consumo do carbono e mineralização dos compostos orgânicos (SAFETY, HEALTH AND ENVIRONMENT WORLD CONGRESS, 2015). Tal comportamento não foi observado nesse trabalho.

Considerando os investimentos para instalação de biodigestores e para manutenção do processo, a produção de biogás com esse material nas condições avaliadas nesse trabalho poderia resultar um déficit nas contas públicas,

além de não apresentar eficiência na produção de fertilizante, devendo-se desenvolver novas pesquisas para melhoria da eficiência e da produção para gerar energia elétrica. Portanto, no campo as condições seriam as mais simples possíveis, havendo controle da anaerobiose do processo, não necessitando de equipamentos mais elaborados para controle de temperatura.

Devido à composição da biomassa de poda, para aumentar a eficiência da geração de biogás com esse material atuando como estruturante de lodo de esgoto, recomenda-se a realização de uma hidrólise prévia a fim de quebrar as moléculas mais densas e gerar um ambiente com melhores condições para a atuação dos organismos no processo de biodigestão anaeróbia, como descrito pelas pesquisas de Liming e Xueliang (2004), Souza *et al.* (2010), Monlau *et al.* (2013) e Nissilä *et al.* (2014). Essas hidrólises poderiam ser realizadas por via ácida ou alcalina pela adição de ácidos inorgânicos e bases que resultariam na quebra dessas moléculas. Outra observação a se fazer é que a temperatura também influencia na geração de metano, logo avaliar essas composições em temperaturas mais altas poderia proporcionar um incremento na eficiência da biodigestão.

Apesar de ser uma prática consolidada, poucas publicações e estudos foram realizados para avaliar a produção de compostos orgânicos com captação do biogás a partir de biomassa florestal, como os resíduos de poda. Na Tabela 7 estão apresentados os resultados obtidos em outros trabalhos.

Tabela 7. Trabalhos que avaliaram a produção de biogás utilizando resíduos de poda urbana e lodo como inóculo

Autores	Quantidade de resíduos de poda	Inóculo	Período de digestão	Produção máxima de metano (%)
Brown e Li (2013)	50%	Lodo de efluente	30 dias	61%
Toro <i>et al.</i> (2017)	10%	Lodo de reator	40 dias	38,04%
Stefanutti <i>et al.</i> (2018)	50%	Lodo de reator	112 dias	55%
	10%			63%
Este trabalho	37,5%	Lodo de esgoto	60 dias	48%

Em função dos dados apresentados, observa-se que os resultados obtidos neste trabalho possuem potencial de serem aplicados em função da produção máxima de metano de acordo com o período de digestão e a quantidade de poda nos biodigestores, com devidos ajustes já discutidos anteriormente. Como estruturante do processo de biodigestão, a quantidade de poda influencia a produção de metano. Além disso, a origem do inóculo, sendo lodo de efluente, reator ou esgoto também constitui importante fator devido às características físico-químicas e biológicas.

5 CONCLUSÃO

Sobre o uso da biomassa de poda urbana da cidade do Recife (PE), para produção de biogás, pode-se concluir que o biogás gerado pela biomassa de poda e lodo de esgoto apresentou baixo teor de metano, sendo esta atividade economicamente inviável para as composições e condições avaliadas neste trabalho. Além disso, de acordo com a relação C/N do final do processo, as condições de digestão avaliadas não foram eficientes para produção de fertilizantes.

Portanto, este trabalho contribui para melhores definições de composição para a biodigestão da biomassa de poda, buscando-se definir quais condições são mais favoráveis para a produção de metano a partir de materiais lignocelulósicos provenientes de resíduos florestais urbanos.

REFERÊNCIAS

- ABREU, F. V. **Biogás: economia, regulação e sustentabilidade**. Rio de Janeiro: Interciência, 2014. 196p.
- AGRENER. ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 6., 2006, Campinas. **Anais [...]**. Campinas: Agrener, 2006.
- ANGELOV, I.; BESCHKOV, V. Optimization of biogas production from lignocelulosic materials by different methods of substrate treatment. **International Scientific Journal "Mechanization in Agriculture"**, v. 62, n. 6, p. 3-4, 2016.
- BARROS, R. M. **Tratado sobre resíduos sólidos: gestão, uso e sustentabilidade**. Rio de Janeiro: Interciência; Minas Gerais: Acta, 2012. 342p.
- BEZERRA NETO, E.; BARRETO, L. P. **Análises químicas e bioquímicas em plantas**. Recife: Ed. da UFRPE, 2011. 267p.
- BRAND, M. A. **Energia de Biomassa Florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131p.
- BROWN, D.; LI, Y. Solid state anaerobic digestion of yard waste and food waste for biogas production. **Bioresource Technology**, v. 127, p. 275-280, 2013.
- CELPE. Companhia Energética de Pernambuco. Disponível em: <http://servicos.celpe.com.br/Pages/index.aspx>.
- CORTEZ, L. A. B.; SILVA, A.; LUCAS JÚNIOR, J.; JORDAN, R. A.; CASTRO, L. Biodigestão de efluentes. In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas: Ed. da Unicamp, 2008. p. 493-530.
- 226 EDWIGES, T.; FRARE, L. M.; ALINO, J. H. L.; TRIOLO, J. M.; FLOTATS, X.; COSTA, M. S. S. M. Methane potential of fruit and vegetable waste: an evaluation of the semi-continuous anaerobic mono-digestion. **Environmental Technology**, v. 41, n. 7, p. 921-930, 2020.
- EMLURB. EMPRESA DE LIMPEZA URBANA DO RECIFE. **Relatório do aproveitamento de restos de poda urbana do Recife para o processo de compostagem - 2016**. Recife: EMLURB/PCR, 2017. 7p.
- FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. **Manual prático para compostagem de biosólidos**. Rio de Janeiro: PROSAB, 1999. 91p.
- FÉRNANDEZ, A.; SÁNCHEZ, A.; FONT, X. Anaerobic codigestion of a simulated organic fraction of municipal solid wastes and fats of animal and vegetable origin. **Biochemical Engineering Journal**, v. 26, p. 22-28, 2005.
- FRANQUETO, R.; SILVA, J. D. Desenvolvimento histórico da valorização de biomassa do agronegócio para produção de biogás no âmbito rural. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 9, p. 451-477, fev. 2020.
- GOLDEMBERG, J.; PALETTA, F. C. (org.). **Energias Renováveis**. São Paulo: Blucher, 2012. 110p.
- GUERINI FILHO, M.; STEINMETZ, R. L. R.; BEZAMA, A.; HASAN, C.; LUMI, M.; KONRAD, O. Biomass availability assessment for biogas or methane production in Rio Grande do Sul, Brazil. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 21, p. 1353-1366, 2019.
- HAVUKAINEN, J.; UUSITALO, V.; KOISTINEN, K.; LIIKANEN, M.; HORTTANAINEN, M. Carbon foot print evaluation of biofertilizers. **International Journal of Sustainable Development and Planning**, v. 13, n. 8, p. 1050-1060, 2018.
- KARLSSON, T.; KONRAD, O.; LUMI, M.; SCHMEIER, N. P.; MARDER, M.; CASARIL, C. E.; KOCH, F. F.; PEDROSO, A. G. **Manual básico de biogás**. Lajeado: Ed. da Univates, 2014. 69p.
- KIEHL, E. J. **Fertilizantes orgânicos**. São Paulo: Ceres, 1985. 492p.

- LIMING, X.; XUELIANG, S. High-yield cellulose production by *Trichoderma reesei* ZU-02 on corn cob residue. **Biore-source Technology**, v. 91, n. 3, p. 259-262, 2004.
- MARMOLEJO, L. F.; DIAZ, L. F.; TORRES, P.; GARCÍA, M.; BURBANO, M. H.; BLANCO, C.; ERAZO, K.; PEREIRA, J. F. Influence of handling practices on material recovery from residential solid waste. **Sustainability**, v. 2, p. 2070-2083, 2010.
- MATOS, C. F.; PINHEIRO, E. F. M.; PAES, J. L.; LIMA, E.; CAMPOS, D. V. B. Avaliação do potencial de uso de biofertilizante de esterco bovino resultante do sistema de manejo orgânico e convencional da produção de leite. **Revista Virtual Química**, v. 9, n. 5, p. 1957-1969, 2017.
- MEENA, H.; BUSI, S. Use of microbial biofertilizers technology in agro-environmental sustainability. **New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering**, n. 13, p. 199-211, 2019.
- MONLAU, F.; BARAKAT, A.; TRABLY, E.; DUMAS, C.; STEYER, J. F.; CARRÈRE, H. Lignocellulosic materials into biohydrogen and biomethane: impact of structural features and pretreatment. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 43, n. 3, p. 260-322, 2013.
- NISSILÄ, M. E.; LAY, C. H.; PUHAKKA, J. A. Dark fermentative hydrogen production from lignocellulosic hydrolyzates - a review. **Biomass and Bioenergy**, v. 67, p. 145-159, 2014.
- NUNES, M. U. C. **Compostagem de resíduos para produção de adubo orgânico na pequena propriedade**. Aracaju: EMBRAPA, 2009. 7p. (Circular técnica, 59).
- OLIVEIRA, E. C. A.; SARTORI, R. H.; GARCEZ, T. B. **Compostagem**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2008. 19p.
- PAVI, S.; KRAMER, L. E.; GOMES, L. P.; MIRANDA, L. A. S. Biogas production from co-digestion of organic fraction of municipal solid waste and fruit and vegetable waste. **Biore-source Technology**, v. 228, p. 362-367, mar. 2017.
- PINNA-HERNÁNDEZ, G.; MARTÍNEZ-SOLER, I.; VILLANUEVA, M. J. D.; FERNÁNDEZ, F. G. A.; LÓPEZ, J. L. C. Selection of biomass supply for a gasification process in a solar thermal hybrid plant for the production of electricity. **Industrial Crops & Products**, v. 137, p. 339-346, 2019.
- RODRIGUES, A. F.; LATAWIEC, A. E. Rethinking organic residues: the potential of biomass in Brazil. **Modern Concepts & Developments in Agronomy**, v. 1, n. 4, p. 73-77, 2018.
- SAFETY, HEALTH AND ENVIRONMENT WORLD CONGRESS, 15., 2015, Porto. **Anais [...]**. Porto: COPEC, 2015.
- SALVADORI, S.; KONRAD, O.; CASARIL, C.; LUMI, M.; SCHMITZ, M. Geração de biogás a partir de lodo de estação de tratamento de efluentes na fabricação de proteína isolada de soja. **Engenharia Ambiental**, v. 9, n. 1, p. 128-141, jan./mar. 2012.
- SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília: EMBRAPA, 2009. 627p.
- SILVA, J. P.; PERONDI, D.; RESTELATTO, D.; GODINHO, M.; DETTMER, A. Comparação da produção de biogás a partir da digestão anaeróbia de diferentes tipos de lodo. **Scientia cum Industria**, v. 4, n. 2, p. 69-73, 2016.
- SIMPÓSIO NACIONAL DE BIOPROCESSOS, 20., Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza: SINAFERM, 2015.
- SOUZA, O.; FEDERIZZI, M.; COELHO, B.; WAGNER, T. M.; WISBECK, E. Biodegradação de resíduos lignocelulósicos gerados na bananicultura e sua valorização para a produção de biogás. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 4, abr. 2010.
- STEFANUTTI, R.; MAGALHÃES, G. V. V.; AMORIM, N. B.; LIMA, A. C. A.; MARTINS, A. V. P. R. Avaliação do potencial bioquímico de metano de resíduos orgânicos com co-substrato de poda. *In*: SEMINÁRIO NACIONAL DE RESÍDUOS

SÓLIDOS, 13., Cuiabá. **Anais** [...]. Cuiabá: ABES, 2018.

TEIXEIRA JUNIOR, L. C. **Biogás: alternativa para geração de energia**. Curitiba: Appris, 2016. 101p.

TORO, J. C. S.; MORENO, J. P. M.; ZULUAGA, B. H. A. Evaluación de la digestión y co-digestión anaerobia de residuos de comida y de poda en bioreactores a escala laboratorio. **Revista ION**, v. 30, n. 1, p. 105-116, 2017.

UENO, C. R. J.; FRARE, L. M.; GIMENES, M. L.; ZANIN, G. M. Influência da adição fracionada de vinhaça na produção de biogás. **Revista Brasileira de Biociências**, v. 11, n. 1, p. 115-118, jan./mar. 2013.

XIMENES, E. A. Fungos anaeróbios. **Revista de Ciências Médicas e Biológicas**, v. 2, n. 2, p. 269-275, jul./dez. 2003.