

Acta Iguazu

ISSN: 2316-4093

Produção de biogás pelo uso de glicerol em diferentes resíduos agroindustriais

Paulo André Cremonez¹, Joel Gustavo Teleken³, Silvio Cesar Sampaio¹, Lara Schneider², Gabriela Bonassa², Eduardo de Rossi¹

¹Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, PGEAGRI – Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola – Nível Doutorado, Cascavel-PR.

²Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, PPGA – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura – Nível Mestrado, Cascavel-PR.

³Universidade Federal do Paraná – UFPR, Departamento de Ciências Exatas e Engenharias, Palotina-PR.
E-mail: pa.cremonez@gmail.com; joel.teleken@ufpr.br; silvio.sampaio@unioeste.br; laarats@gmail.com; gabrielabonassa@gmail.com; eduderossi@gmail.com

Resumo: Com o presente trabalho objetivou-se avaliar a produção de biogás com a adição de concentrações variadas de glicerol (0, 1, 3 e 5 %) em quatro resíduos agroindustriais: manipueira, vinhaça, cama de aviário e água residuária de suinocultura (ARS), utilizando reatores em regime batelada com 5 repetições em cada tratamento. Com a aplicação deste aditivo constatou-se aumento da produção do biogás e do gás metano no processo de codigestão anaeróbia, porém com concentrações de glicerol diferentes dependendo do resíduo testado, em razão de características particulares. Sendo que, concentrações elevadas proporcionaram melhores respostas a resíduos mais solúveis e que apresentam maior tendência a acidificação.

Palavras-chave: bioenergia, saneamento ambiental, biocombustíveis.

Biogas production by the use of glycerol in different agro-industrial waste

Abstract: The present study aimed to evaluate the biogas production with the addition of varying concentrations of glycerol (0, 1, 3 e 5 %) in four agro-industrial residues: cassava residue, vinasse, poultry litter and swine wastewater, using reactors in batch operation with 5 repetitions in each treatment. With the use of this additive was observed increased production of biogas and methane gas in the anaerobic codigestion, but with different concentrations of glycerol tested waste, because of its particular characteristics. High concentrations provide best answers the more soluble wastes and that have higher tendency to acidification.

Key words: bioenergy, environmental sanitation, biofuels.

Introdução

O glicerol puro e refinado (também chamado de glicerina), é considerado para inúmeras aplicações industriais, sendo principalmente empregado na produção de cosméticos e fármacos. Apesar disso, o glicerol advindo do processo de transesterificação homogênea alcalina visando-se a obtenção de biodiesel (aproximadamente 10 Kg de glicerina são gerados para cada 100 Kg de biodiesel produzido) apresenta diversas impurezas como água, resíduos graxos e de catalisador, além de elevada demanda química de oxigênio (SANTIBANES et al., 2011). Essas impurezas tornam sua destinação limitada e sua purificação economicamente inviável (THOMPSON e HE, 2006).

O glicerol apresenta elevado poder energético e alta degradabilidade, caracterizando-se como material orgânico interessante para degradação através de processos de biodigestão anaeróbia. Interesse esse baseado em sua elevada produção de metano, baixa necessidade de nutrientes, economia de energia e geração mínima de lodo (HUTNAN et al., 2013).

Diversos trabalhos comprovaram o incremento na produção de biogás (50– 200 %) em processos de biodigestão de resíduos agroindustriais aditivados com glicerol residual da produção de biodiesel (SERRANO et al., 2014; ATHANASOULIA et al., 2014; ASTALS et al., 2013), no entanto, poucas pesquisas avaliam a resposta da adição de glicerol em diferentes resíduos agroindustriais sob as mesmas condições (reator, ciclo hidráulico, temperatura, tempo de retenção hidráulica).

Desta forma, objetiva-se com o presente trabalho avaliar e comparar o incremento da produção de biogás pela adição de diferentes concentrações de glicerol em quatro resíduos agroindustriais distintos submetidos as mesmas condições operacionais.

Material e métodos

Substratos para digestão

Utilizou-se como matéria prima para produção de biogás: Água residuária do processamento da mandioca (manipueira) para obtenção da fécula; Vinhaça do processo de produção de etanol de cana-de-açúcar; Cama de aviário da criação de aves para alimentação; Água residuária de suinocultura (ARS) de matrizeiro de leitões; e glicerol advindo de rota de produção de biodiesel por transesterificação homogênea alcalina de óleo de soja. Todo

material foi acondicionado em recipientes de polietileno e mantido sob refrigeração até momento de utilização.

O inóculo utilizado para iniciar o experimento foi obtido em propriedade de matrizeiro de suínos, sendo coletado de biodigestor tubular. Optou-se por trabalhar com 40 % (v/v) de inóculo do volume total do reator baseando-se em estudos realizados por Xavier e Lucas JR (2010).

Biodigestores e Operação

Empregaram-se reatores em regime de operação batelada construídos em PVC, com medidas de 100 mm de diâmetro e 500 mm de altura, respeitando proporções 5:1 (h:d). Com estas medidas obtém-se um volume total de aproximadamente 4 litros.

Os gasômetros foram confeccionados em PVC da mesma forma que os reatores, sendo que estes apresentavam configuração de 100 mm de diâmetro e 300 mm de comprimento. Estes foram embocados em canos de 150 mm tendo sua vedação por selo de solução salina acidificada ao passo que os gasômetros e suas guias foram parcialmente imersos em tanques com essa solução. A solução contendo 25 % (v/v) de cloreto de sódio e 3 % (v/v) de ácido sulfúrico tem função de evitar o escape do biogás e impedir a dissolução do CO₂ presente no gás (LARSEN, 2009).

A ligação dos reatores aos seus respectivos gasômetros se deu por conexões de PVC e mangueiras siliconadas. A tomada de gás era realizada por conexão T acoplada a mangueira e a quantificação de biogás é medida através do deslocamento vertical dos gasômetros e posterior conversão do volume para condições normais de temperatura e pressão (CNTP). O esquema construtivo dos biodigestores e gasômetros pode ser visualizado na Figura 1.

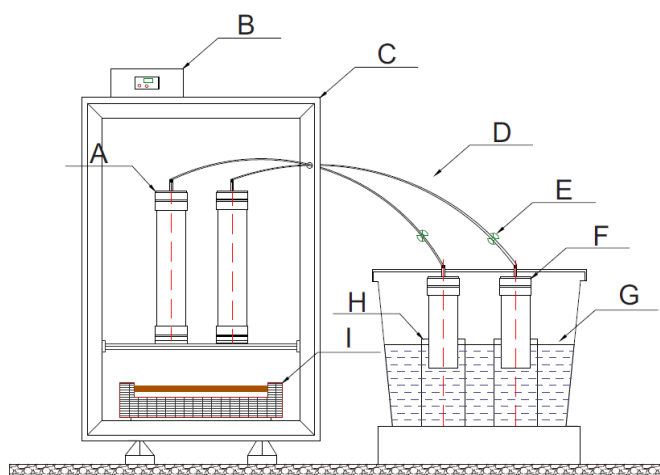


Figura 1. Esquema construtivo dos reatores e gasômetros, sendo: a) reatores PVC 100 mm; b) termostato para controle de temperatura; c) estufa caseira; d) mangueira de silicone de 1’’; e) conexão para tomada de gás; f) gasômetro PVC 100 mm; g) selo d’água; h) guia dos gasômetros; i) aquecedor.

Por serem resíduos de alta degradabilidade, estabeleceu-se como tempo de retenção hidráulica (TRH) 6 dias. Os reatores foram mantidos em incubadoras sob a temperatura de 35 °C ($\pm 1,0$ °C), tendo seus gasômetros localizados externamente as incubadoras e mantidos sob temperatura ambiente.

Parâmetros de tratamento do resíduo

Avaliou-se potencial hidrogeniônico (pH), alcalinidade total, intermediária e parcial, e acidez volátil, além de sólidos totais, voláteis e fixos (ST, STV e STF, respectivamente). Todas as análises realizadas no material de entrada do reator também foram efetuadas em amostras coletadas na saída deste, tornando possível o estudo, a comparação e a avaliação de todas as repetições dos tratamentos.

Caracterização do gás

Diversas metodologias são descritas para determinação do percentual de metano presente no biogás. A determinação da composição de metano presente no biogás pode ser realizada através de lavagem do gás, como descrito por Aquino et al. (2007), onde deve-se lavar o gás com solução de soda NaOH (15 %) de modo que ocorra a absorção do CO₂, assumindo que metano e dióxido de carbono são os componentes majoritários da mistura de gás. Segundo o mesmo autor, esta metodologia é descrita e utilizada por diversos grupos de

pesquisa, tendo como principal vantagem, a não necessidade de cromatógrafo para determinação da composição do gás.

Coletou-se o biogás dos reatores através de saco amostrador e utilizou-se método de lavagem de biogás em solução alcalina a partir de kit específico de biogás, composto basicamente de seringa de vidro acoplado por meio de suporte a outra seringa contendo solução alcalina.

O kit da empresa AlfaKit® com metodologia utilizada pela rede oficial de laboratórios de solos da EMBRAPA apresenta precisão de 2,5 % e tem por finalidade atender proprietários de biodigestores rurais controlando parâmetros como percentual de metano, dióxido de carbono, amônia e ácido sulfídrico presentes no biogás. A ficha técnica do kit pode ser visualizada na Tabela 1.

Tabela 1. Ficha técnica e limites de detecção do kit de análise de biogás

PARÂMETROS	MÉTODO	INFORMAÇÃO
Amônia	Azul de Indofenol	Curva de calibração de 15 a 875 ppmV em 2 faixas: - Faixa 1 de 15 a 350 ppmV NH ₃ - Faixa 2 de 45 a 875 ppmV NH ₃
Gás sulfídrico	Azul de Metileno	Curva de calibração de 20 a 380 ppmV em 2 faixas: - Faixa 1 de 20 a 230 ppmV H ₂ S - Faixa 2 de 30 a 380 ppmV H ₂ S
Gás carbônico	Orsat	0 – 100 % resolução 2,5 %
Metano	Orsat	0 – 100 % resolução 2,5 %

Nota: ppmv é correspondente a mg.L⁻¹.

Fonte: Alfakit.ind.br (2013).

Análise Estatística

Realizou-se o estudo do efeito do aumento da produção de biogás pelo aumento gradativo do percentual de glicerol nos quatro resíduos. Para cada resíduo, realizaram-se 4 tratamentos (0 % - controle, 1 %, 3 %, 5 % de adição de glicerol, em base volumétrica) com 5 repetições para cada concentração de glicerol visando-se comparar a eficiência da remoção de sólidos, demanda química de oxigênio e produção de biogás.

Utilizou-se delineamento experimental inteiramente casualizado. Para verificar a diferença estatística entre os tratamentos empregou-se ANOVA e Teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

Resultados e discussão

Características de entrada dos resíduos

Com relação ao pH, ácidos voláteis e bases, os valores observados entre os tratamentos foram considerados favoráveis ao desenvolvimento do processo de biodigestão tendo pH final dos reatores variando entre 5,70 - 6,26 para a cama de aviário, 5,65 - 7,10 para a manipueira, 5,61 - 6,32 para a ARS e 5,56 - 6,22 para a vinhaça. A relação de Acidez Volátil e Alcalinidade Total também se encontrou dentro dos limites ótimos para condução de forma eficiente, sendo que uma boa relação é estabelecida quando se obtém valores inferiores a 0,5, tendo como faixa ideal 0,1 - 0,3 (VAN HAANDEL, 1994; FERNADES Jr., 1995).

Dentre os tratamentos estudados, a maior demanda bioquímica de oxigênio para qualquer adição ou não de glicerol é da cama de aviário. Pode-se explicar este resultado, já que a cama de aviário, que é de origem essencialmente agrícola, representa o local onde a ave passa grande parte de sua vida, depositando ali suas excretas, penas, descamações epiteliais, restos de ração, dentre outros. Isso acaba por definir características a este material que dificultam sua digestibilidade, tais como alta concentração de resíduos lignocelulósicos, elevados níveis de amônia e carbono além da baixa relação C/N (SHARMA et al., 2013).

Composição do biogás

A produção de metano e composição no biogás varia de acordo com a composição do material orgânico contido no substrato que é passível de se transformar em metano e dióxido de carbono (AMON et al. 2007). O biogás normalmente apresenta composição que varia entre 55 a 70 % (v/v) de metano, e 30 a 45 % (v/v) de dióxido de carbono e teores inferiores a 1 % de outros gases (BOTERO E PRESTON, 1987; LANSING et al. 2008). No presente trabalho, todos os tratamentos se enquadraram ou apresentaram teores superiores de metano aos verificados em literatura, tendo valores para manipueira e ARS de até 80 %.

Na Tabela 2, pode-se verificar os teores de metano, dióxido de carbono e sulfeto de hidrogênio presentes em amostras dos tratamentos testados.

Tabela 2. Composição do biogás nos tratamentos estudados

Tratamentos		Composição Biogás		
		CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	H ₂ S (ppmV)
Manipueira	0 %	80	20	26,54
	1 %	75	25	43,75
	3 %	60	40	4,62
	5 %	75	25	12,45
ARS	0 %	75	25	4,32
	1 %	80	20	10,02
	3 %	80	20	4,99
	5 %	70	30	5,22
Cama de Aviário	0 %	50	50	194,89
	1 %	65	35	243,11
	3 %	65	35	148,37
	5 %	55	45	99,12
Vinhaça	0 %	55	45	34,22
	1 %	65	35	17,89
	3 %	70	30	18,43
	5 %	65	35	29,38

A partir dos resultados constatou-se que todos os resíduos independentemente da quantidade de glicerol adicionada garantiram teores de metano no biogás superior aos 50 % tendo suas maiores proporções alcançadas 1 e 3 % de ARS e no controle da manipueira. Segundo Barreira (2011), o poder calorífico do metano é de aproximadamente 25 MJ m⁻³, composições acima de 50 % em teor de metano garantem que o poder calorífico do gás obtidos nos experimentos seja igual ou superior ao da lenha de pinus e eucalipto, além de aproximar-se do poder energético obtido de briquetes e pellets dessas madeiras.

Segundo Arias (2010), limites de H₂S inferiores a 1000 ppm garantem a utilização do biogás em caldeiras e valores inferiores a 100 ppm possibilitam a utilização do gás em motores de combustão interna. Os teores de sulfeto de hidrogênio encontrados em todos os tratamentos foram relativamente baixos, podendo-se empregar o biogás em aplicações como fonte de calor em caldeiras. Os maiores valores encontrados na cama de aviário se relacionam diretamente a composição do material digerido, que por sua natureza, é rico em enxofre.

Produção de Biogás

Os perfis de produção de biogás para todos os resíduos testados podem ser visualizados na Figura 2. Para a cama de aviário e ARS, os maiores picos diários foram obtidos nos tratamentos utilizando-se 1 % de glicerol, enquanto que nos resíduos de vinhaça e manipueira os níveis que utilizaram 5 % de glicerol alcançaram os picos diários mais elevados. Essa diferença de produção varia com o tipo de substrato envolvido, e é alcançada com o equilíbrio entre as quantidades de biogás e metano gerado e a quantidade de glicerol necessário para isso.

A vinhaça e a manipueira são resíduos de rápida degradação e conversão de matéria orgânica em ácidos voláteis, desta forma maiores concentrações de glicerol podem garantir o tamponamento que o meio necessita para que o pH não flutue bruscamente, devido ao fato do aditivo conter pH elevado e grande disponibilidade de alcalinidade na forma de hidróxido de sódio (base utilizada na catálise para produção de biodiesel).

Em todos os tratamentos, as maiores taxas de produção de biogás foram obtidas até o terceiro dia de digestão.

A partir destes resultados, considera-se que resíduos mais solúveis que apresentam acidificação acelerada apresentam incremento de produção de biogás superior aos resíduos com característica mais complexa e que dificultam o acesso das bactérias. Com isso, mesmo que proporcione elevada produção de biogás, faz-se necessário um controle sobre a carga de glicerina adicionada ao meio. Além disso, características como o pH podem variar em função do processo em que o glicerol foi gerado. De acordo com Hutñan et al. (2013) a concentração de sulfato também variar com o processo e acaba influenciando o pH. Outro fator que pode contribuir para redução do pH é a presença de ácidos graxos livres no glicerol (SILVESTRE et al., 2015).

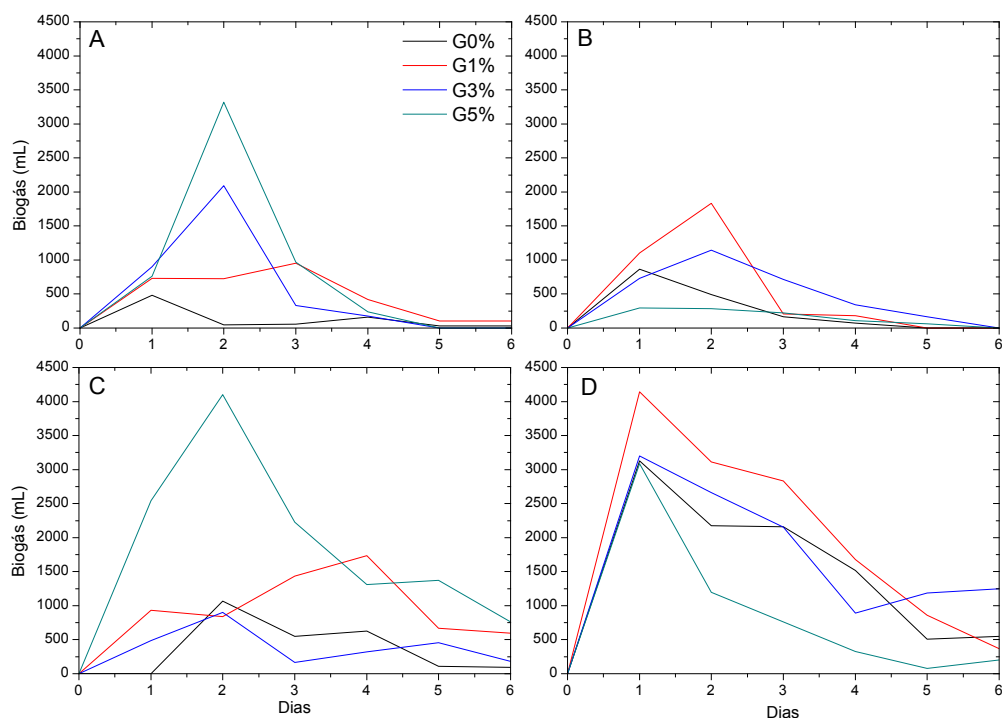


Figura 2. Perfil de produção de biogás nos tratamentos: (a) Manipueira; (b) ARS; (c) Vinhaça; (d) Cama de aviário.

A produção máxima acumulada e a taxa de produção de biogás para todos os resíduos testados nos diferentes níveis de adição de glicerol podem ser visualizadas nas Figura 3 e Tabela 3.

O modelo descreveu adequadamente e se ajustou muito bem aos dados experimentais, obtendo valores de R^2 superiores a 0,9 para todos os casos. Cama de aviário foi o aditivo que resultou na maior produção de biogás (Tratamento com 1 % - $P = 13.200$ mL) e também na maior velocidade de produção ($R = 165,2$ mL h^{-1}). Já o aditivo em ARS apresentou os piores resultados quando comparado aos demais resíduos em termos de produção máxima de biogás (P). Na variável analisada P é possível ranquear os melhores níveis de adição para cada resíduo em: Cama de Aviário (1 %) > Vinhaça (5 %) > Manipueira (5 %) > ARS (1 %). Para os quatro tratamentos listados acima, as velocidades de produção de biogás foram superiores a 100 mL h^{-1} .

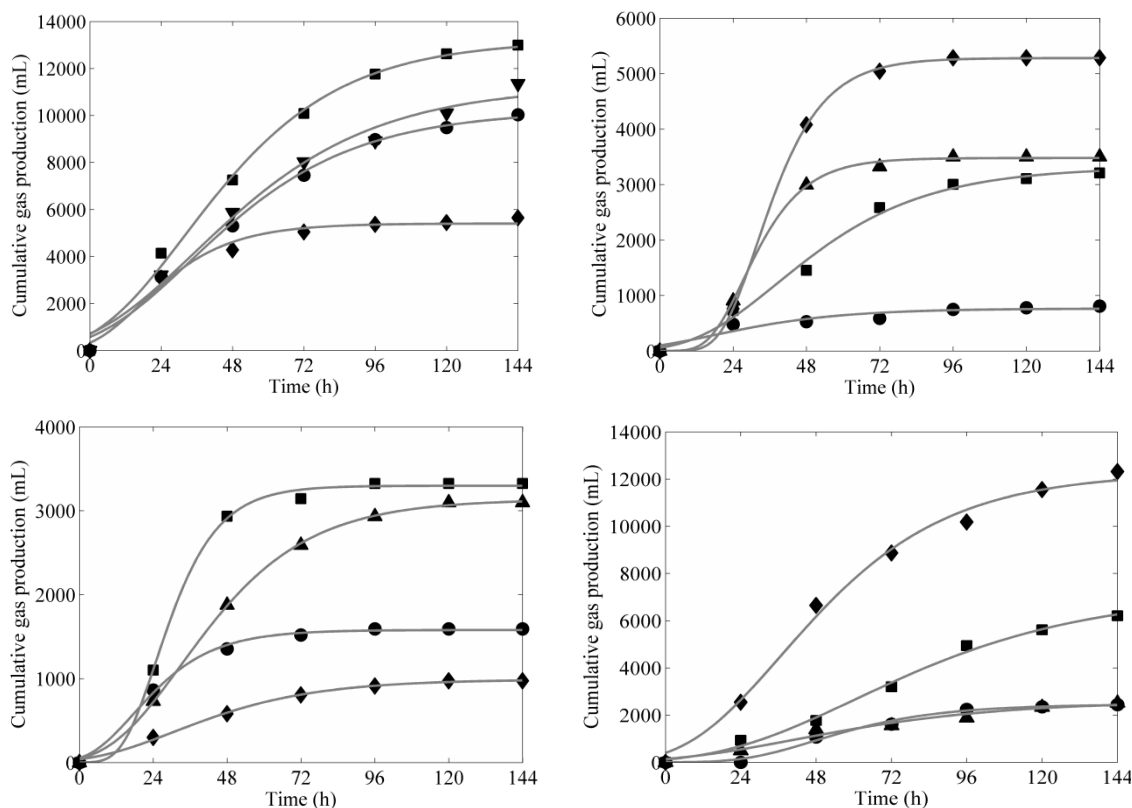


Figura 3. Produção de acumulada de biogás com ajuste de Gompertz nos 4 resíduos testados, sendo cama de aviário (sup. esq.); manipeira (sup. dir.); ARS (inf. esq.); vinhaça (inf. dir.). Controle (círculo), 1 % (quadrado), 3 % (triângulo) e 5 % (losango).

Apesar das altas taxas de produção de biogás obtidas nos níveis de aditivo testados na cama de aviário, considera-se pequeno seu incremento visto a elevada taxa de produção observada pelo tratamento controle. Desta forma, comparando-se o aumento na taxa de produção de biogás (mL h^{-1}) dos níveis controle frente aos níveis de melhor resposta para cada resíduo consideramos aumento de: 38,6 % para cama de aviário; 1293,1 % para a manipeira; 169,5 % para ARS; e 274,5 % para a vinhaça.

Em termos de maior incremento na taxa de produção (mL h^{-1}) é possível ranquear os melhores níveis de adição para cada resíduo em: manipeira (5 %) > vinhaça (5 %) > ARS (1 %) > cama de aviário (1 %). Valores relacionados a taxas de produção são muito importantes do ponto de vista industrial onde deseja-se determinar-se a taxa máxima de produção e mantê-la de forma a otimizar-se a produção de biogás.

Com esses resultados constata-se que resíduos de maior solubilidade apresentam melhores respostas com relação a taxa de produção, ao adicionar-se maiores concentrações de aditivo enquanto materiais orgânicos de compostos mais complexos apresentam respostas mais significativas com pequenas concentrações de aditivo mediante os TRHs testados.

Tabela 4. Parâmetros do modelo de Gompertz otimizados a partir dos tratamentos experimentais

Tratamentos	$P(mL)$	$R(mL/h)$	$\lambda(h)$	R^2
Cama de aviário				
G0% (controle)	1 021,0	119,2	1,89	0,9925
G1%	13 200,0	165,2	2,34	0,9941
G3%	11 260,0	120,0	0,52	0,9859
G5%	5 402,0	119,0	0,52	0,9836
Manipueira				
G0% (controle)	763,9	11,6	-6,75	0,9112
G1%	3 314,0	44,6	11,16	0,9891
G3%	3 478,0	114,1	16,09	0,9987
G5%	5 280,0	161,6	19,90	0,9999
ARS				
G0% (controle)	1 579,0	40,6	3,34	0,9966
G1%	3 298,0	109,4	13,90	0,9987
G3%	3 136,0	50,19	9,91	0,9995
G5%	990	14,1	4,79	0,9971
Vinhaça				
G0% (controle)	2 451,0	40,4	25,07	0,9906
G1%	7 203,0	62,3	17,75	0,9946
G3%	2 604,0	25,0	2,86	0,9725
G5%	12 280,0	151,3	6,97	0,9937

P= Produção de biogás acumulada observada; R= Taxa de Produção de biogás obtida; λ = Tempo da fase lag.

A partir da Tabela 5 pode-se visualizar os resultados referentes as eficiências de remoção de sólidos totais voláteis (STV) e DQO e produção de biogás nos tratamentos estudados.

Os níveis de tratamento que apresentaram as maiores produções acumuladas também foram responsáveis pelas maiores conversões de SV em biogás. O mesmo foi observado para no resíduo de manipueira e cama de aviário, com relação a conversão da DQO em biogás. Nos tratamentos de ARS e vinhaça, as maiores taxas de conversão de DQO em biogás foram obtidas nos testes de controle (branco).

A variação de produção de biogás nos diferentes tratamentos (Figura 2) pode estar associada também ao fato de que as bactérias anaeróbias precisam de um tempo para adaptação com a carga orgânica adicionada. Isso intensifica a necessidade de que a adição de glicerol seja realizada de forma lenta e gradual. No trabalho desenvolvido por Minho et al. (2012) foi aplicado 6 % de glicerina do volume de amostra de dejetos de aves poedeiras no reator, a primeira fase sem a presença de glicerina gerou cerca de 6565 mL de biogás e

3816 mL de metano dentro de 28 dias; com a posterior adição da glicerina, no terceiro e quarto dia observaram aumento nos volumes diários de 1065 mL e 1755 mL de biogás. De acordo com os autores após 53 dias de experimento após a adição do glicerol houve um aumento de 216,6 % em relação ao biogás e 279,7 % em relação ao volume de metano.

Tabela 4. Eficiências de remoção de matéria orgânica e produção de biogás nos tratamentos estudados

Resíduos / Tratamentos	Glicerol	Produção	
		Biogás/SV	Biogás/DQO
		(mL g ⁻¹)	
Manipueira	0 %	23,06c	128,63b
	1 %	120,17a	332,36a
	3 %	87,19b	69,02b
	5 %	115,35a	73,44b
Anova (Teste F)		163,48*	20,83
CV (%)		9,04	30,25
ARS	0 %	97,54c	245,11a
	1 %	179,56a	143,01b
	3 %	112,23bc	59,57cd
	5 %	37,37d	19,51d
Anova (Teste F)		85,90*	23,14*
CV (%)		13,95	32,81
Cama de Aviário	0 %	272,13b	383,45a
	1 %	2278,72a	439,54a
	3 %	394,34b	157,52b
	5 %	166,36b	62,23c
Anova (Teste F)		22,86*	161,28*
CV (%)		60,42	12,15
Vinhaça	0 %	290,55b	474,94a
	1 %	630,70a	307,04ab
	3 %	203,45c	50,15b
	5 %	626,48a	184,41b
Anova (Teste F)		199,95*	6,70*
CV (%)		8,06	61,43

Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste Tukey, ao nível de 5 % de probabilidade. C.V.(%) = coeficiente de variação. *significativo ao nível de 5 % de probabilidade.

Com relação à produção de biogás por gramas de STV removidos, constata-se aumento para ARS de 84,08 % no nível de adição de 1 % de glicerol. Amon et al. (2006), obtiveram resultados diferenciados utilizando 6 % de adição de glicerol, com 182 % de aumento na produção de metano em base de remoção de STV.

Astals et al. (2013), utilizando ARS com incremento de glicerol limitado ao percentual de 3 % obtiveram valores de produção de biogás de 180 % superior ao tratamento

controle. Diferente disso, Álvarez et al. (2010), digerindo mistura de ARS com resíduo de abate de peixes utilizando proporções de 9 a 22 % de adição de glicerol obtiveram incremento na produção de metano em base de STV de 225 a 520 %. Em trabalho realizado por Wohlgemut et al. (2009) com ARS, o aumento da produção de metano pela adição de 1 e 2 % de glicerol foi significativo, no entanto, a o incremento de produção de biogás e metano pela remoção de STV não foi relativamente significativo se comparado ao tratamento controle.

Para os resíduos de manipueira, os níveis 1 e 5 % proporcionaram aumento de produção por matéria orgânica removida de aproximadamente 410 %. Valores muito superiores aos encontrados por Ma et al. (2008), em trabalho de biodigestão de água residuária do processamento de batata, onde obtiveram produção de biogás 1,5 vezes maior nos tratamentos aditivados se comparado ao tratamento controle.

As maiores taxas de conversão obtidas no presente trabalho foram obtidas no tratamento de 1 % da cama de aviário onde visualizou-se elevação na conversão de 737,09 %, enquanto que na vinhaça os níveis de tratamento 1 e 5 % foram responsáveis por incremento de aproximadamente 116 %.

Athanasoulia et al. (2014), realizando digestão de lamas de depuração aditivadas com glicerol em níveis 2, 3, e 4 % obtiveram coeficiente estimado de produção de de 0,8 L de biogás por g STV removidos. Além disso, a codigestão com glicerol proporcionou aumento na produção acumulada de biogás de 3,8 a 4,7 vezes. Já Nartker et al. (2014), também realizando codigestão de lamas de depuração com glicerol em taxas de 0 a 70 % em peso seco obtiveram aumento na produção de biogás de 2,8 vezes. No entanto, altas taxas de adição de glicerol proporcionaram inibição e sobrecarga dos reatores anaeróbios.

Considerações finais

A adição de glicerol no processo de biodigestão anaeróbia atua como aditivo no incremento da produção de biogás apresentando resultados positivos no que tange a produção de biogás em todos os resíduos testados.

Apesar disso, as concentrações ideais de aditivo variam conforme as características dos resíduos tratados. Concentrações elevadas proporcionaram melhores respostas a resíduos mais solúveis e que apresentam maior tendência a acidificação, principalmente devido ao

aumento da alcalinidade presente na forma de hidróxido de sódio advinda do glicerol. Diferentemente, taxas de produção de biogás mais elevadas foram obtidas com menores concentrações de glicerol em resíduos mais complexos como a ARS e cama de aviário.

Referências

- ÁLVAREZ, J.A.; OTERO, L.; LEMA, J.M. A methodology for optimising feed composition for anaerobic co-digestion of agro-industrial wastes. **Bioresource Technology**, v.101, n.4, p.1153-58, 2010.
- AMON, T.; AMON, B.; KRYVORUCHKO, V.; ZOLLITSCH, W.; MAYERC, K.; GRUBERD, L. Biogas production from maize and dairy cattle manure—Influence of biomass composition on the methane yield. *Agriculture, Ecosystems & Environmental*, v.118, n.1-4, p.173-182. 2007.
- AMON, T.; AMON, B.; KRYVORUCHKO, V.; BODIROZA, V.; PÖTSCH, E.; ZOLLITSCH, W. Optimising methane yield from anaerobic digestion of manure: effects of dairy systems and of glycerine supplementation. **International Congress Series**, v.1293, p.217–220. 2006.
- AQUINO, S.F.; CHERNICHARO, C.A.L.; FORESTI, E.; DOS SANTOS, M. de L.F.; MONTEGGIA, L.O. Metodologias para determinação da atividade metanogênica específica (AME) em lodos anaeróbios. **Eng. Sanit. Ambient.**, v.12, n.2, p.192-201. 2007.
- ARIAS, J.A.V. Remoción del sulfuro de hidrógeno (H₂S(g))/ácido sulfhídrico (H₂S(aq)) em el biogás. **ECAG Informa**, v.53, p.16-21. 2010.
- ASTALS, S.; NOLLA-ARDÈVOLB, V.; MATA-ALVAREZA, J. Thermophilic co-digestion of pig manure and crude glycerol: Process performance and digestate stability. **Journal of Biotechnology**, v.166, n.3, p.97–104. 2013.
- ATHANASOULIA, E.; MELIDIS, P.; AIVASIDIS, A. Co-digestion of sewage sludge and crude glycerol from biodiesel production. **Renewable Energy**, v.62, p.73-78. 2014.
- BARREIRA, P. **Biodigestores: energia, fertilidade e saneamento para a zona rural**. 3ed. São Paulo: Íncone, 2011. 106p.
- BOTERO, R.; PRESTON, T.R. **Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas**. Manual para su instalación, operación y utilización, Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria (CIPAV), Cali, Colombia. 1987.
- FERNANDES JR., A. **Digestão anaeróbia de manipueira com separação de fases: cinética da fase acidogênica**. 1995. 140f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

HUTNAN, M.; KELESÁROVÁ, N.; BODÍK, I.; CZOLDEROVÁ, M. Long-term monodigestion of crude glycerol in a UASB reactor. **Bioresource Technology**, v.130, p.88-96, 2013.

LANSING, S.; BOTERO, R.B.; MARTIN, J.F. Waste treatment and biogas quality in small-scale agricultural digesters. **Bioresource Technology**, v.99, n.13, p.5881-5890, 2008.

LARSEN, A.C. **Co-digestão anaeróbia de glicerina bruta e efluente de fecularia**. 2009. 55f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel-PR.

MA, J.; WAMBEKE, M.V.; CARBALLA, M.; VERSTRAETE, W. Improvement of the anaerobic treatment of potato processing wastewater in a UASB reactor by co-digestion with glycerol. **Biotechnol Lett.**, v.30, p.861-867, 2008.

MINHO, C.V.; KONRAD, O.; KOCH, F.F.; KLEINSCHMITT, A.B.; CASARIL, C.; LUMI, M. Uso da glicerina residual na geração de biogás a partir do lodo de estação de tratamento de efluentes e dejetos de aves poedeiras. *Engenharia Ambiental*, v.9, p.41-50, 2012.

NARTKER, S.; AMMERMAN, M.; AURANDT, J.; STOGSDIL, M.; HAYDEN, O.; ANTLE, C. Increasing biogas production from sewage sludge anaerobic co-digestion process by adding crude glycerol from biodiesel industry. **Waste Management**, v.34, n.12, p.2567-2571, 2014.

THOMPSON, J.C.; HE, B.B. Characterization of crude glycerol from biodiesel production from multiple feedstocks. **Applied Engineering in Agriculture**, v.22, p.261-265, 2006.

SANTIBAÑEZ, C.; VARNERO, M.T.; BUSTAMANTE, M. Residual glycerol from biodiesel manufacturing, waste or potential source of bioenergy: a review. **Chilean Journal of Agricultural Research**, v.71, n.3, p.469-475, 2011.

SERRANO, A.; SILES, J.A.; CHICA, A.F.; MARTIN, M.A. Improvement of mesophilic anaerobic co-digestion of agri-food waste by addition of glycerol. **Journal of Environmental Management**, v.140, p.76-82. 2014.

SHARMA, D.; ESPINOSA-SOLARES, T.; HUBER, D.H. Thermophilic anaerobic co-digestion of poultry litter and thin stillage. **Bioresource Technology**, v.136, p.251-256, 2013.

SILVESTRE, G.; FERNÁNDEZ, B.; BONMATÍ, A. Addition of crude glycerine as strategy to balance the C/N ratio on sewage sludge thermophilic and mesophilic anaerobic co-digestion. **Bioresource Technology**, v.193, p.377-385, 2015.

VAN HAANDEL, A.C. Influence of the Digested Cod Concentration on the Alkalinity Requirement in Anaerobic Digesters. **Water Science Tech**, v.30, n.8, p.23-34, 1994.

WOHLGEMUT, O.; CICEK, N.; OLESZKIEWICZ, J.; SPARLING, R. Co-digestion of hog manure with glycerol to boost biogas and methane production. **Transactions of the ASABE**, v.54, n.2, p.1-5, 2009.

XAVIER, C.A.N.; LUCAS JR., J. Parâmetros de dimensionamento para biodigestores batelada operados com dejetos de vacas leiteiras com e sem uso de inoculo. **Engenharia Agrícola**, v.30, n.2, p.212-223, 2010.

Recebido para publicação em: 16/11/2016

Aceito para publicação em: 18/11/2016