



Utilização de melaço de soja (resíduo) da produção de proteína de soja para a geração de biometano em reator UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*)


Utilization of by-product of soybean protein generation (Soybean Molasses) for production of biomethane in UASB reactor (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)


Utilización de melaza de soja (residuo) de la producción de proteína de soja para generación de biometano en reactor UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)


Utilisation de mélasse de soja (résidu) provenant de la production de protéines de soja pour la production de biométhane dans le réacteur UASB (Couverture de boues anaérobies à flux ascendant)

Brenda Clara Gomes Rodrigues 
brendaclaragr@gmail.com
Instituto de Química (Unesp)
Araraquara (SP)

Bruna Sampaio de Mello 
brunamelo30@gmail.com
Instituto de Química (Unesp)
Araraquara (SP)

Maria L. Gonsales da C. Araújo 
ml.araujo@unesp.br
Instituto de Química (Unesp)
Araraquara (SP)

Gustavo H. Ribeiro da Silva 
gustavo.ribeiro@uneps.br
Universidade Estadual Paulista (Unesp), Bauru (SP)

Arnaldo Sarti 
arnaldo.sarti@unesp.br
Instituto de Química (Unesp)
Araraquara (SP)

Resumo

A produção de biogás a partir da digestão anaeróbia de resíduos e subprodutos agroindustriais está conquistando cada vez mais destaque no cenário econômico, devido, principalmente, à produção de bioenergia por meio do reaproveitamento do biometano. Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar o potencial de produção de biogás (biometano) a partir do melaço de cana, um subproduto da produção de proteína de soja, com aplicação de reator anaeróbio de manta de lodo (UASB), cuja tecnologia é consolidada para a digestão anaeróbia. O reator de bancada (12 L) foi alimentado com melaço de soja, substrato para cinco condições operacionais (0,28 kgDQO.m⁻³.d⁻¹ a 3,91 kgDQO.m⁻³.d⁻¹), aumentando-se, de forma gradual, a concentração do substrato em termos de demanda química de oxigênio (DQO) de 500 a 4.000 mgO₂.L⁻¹. Além disso, testaram-se diferentes tempos de detenção hidráulicos, de 48h e 24h. Durante o período experimental (122 dias), verificou-se remoção média de matéria orgânica, de 77 a 83 % em termos de DQO_{total}, com produção máxima de biogás de 1,82 L.d⁻¹. Os resultados obtidos no trabalho permitem viabilizar a utilização do melaço de soja, substrato ainda não estudado, para a produção de biometano. Dessa forma, uma destinação mais adequada do melaço de soja pode ser aplicada para a atual queima em caldeiras da quase totalidade gerada na produção de proteína de soja.

Palavras-chave: Melaço de soja. Digestão anaeróbia. UASB. Biogás.

Abstract

Anaerobic digestion of agro-industrial waste is of significant interest to promote sustainable development of bioenergy. The objective of this study was to evaluate the potential biogas production of an agro-industrial by-product (soybean molasses) from the soybean meal industry. The experiment was conducted for 122 days of operation in an anaerobic sludge blanket reactor (UASB). The bench-scale reactor (12 L) was fed with soybean molasses as a sole carbon source for five different conditions in which the organic load rate (OLR) was increased from 0.28 kgCOD.m⁻³.d⁻¹ to 3.91 kgCOD.m⁻³.d⁻¹ as well as the substrate concentration (500 to 4,000 mgO₂.L⁻¹) and

the hydraulic detention time (TDH) was reduced from 48 to 24 hours. Under stable operating conditions after the startup period (0.28 kgCOD.m⁻³.d⁻¹), the values of total COD removal and biogas production achieved 83 % and 1.82 L.d⁻¹, respectively, demonstrating the potential applicability of this system for treating soybean molasses. The satisfactory results obtained allow the feasibility of the bioconversion of soybean molasses to biogas. In this case, a suitable destination can be feasible instead of burning in boilers.

Keywords: Soybean molasses. Anaerobic digestion. UASB reactor. Biogas.

Resumen

La producción de biogás a partir de la digestión anaerobia con residuos y subproductos agroindustriales está conquistando cada vez más enfoque en el escenario económico debido principalmente a la producción de bioenergía por medio de la reutilización del biometano. En este contexto, el principal objetivo de este estudio fue evaluar el potencial de producción de biogás (biometano) a partir de un subproducto de la producción de proteína concentrada de soja con aplicación de reactor anaerobio de manta de fango (UASB) cuya tecnología es consolidada para la digestión anaerobia. El reactor de bancada (12L) fue alimentado con melaza de soja como sustrato para cinco condiciones operacionales (0,28kgDQO.m⁻³.d⁻¹ a 3,91 kgDQO.m⁻³.d⁻¹), en las cuales hubo aumento de forma gradual de la concentración del sustrato en términos de demanda química de oxígeno (DQO) de 500 a 4.000mgO₂.L⁻¹. Además de esto, fueron testados diferentes tiempos de detención hidráulicos de 48h y 24h. Fue verificada, en el período experimental, la remoción media de materia orgánica, en términos de DQOtotal de 77 a 83%, con producción máxima de biogás de 1,82 L.d⁻¹. Los resultados obtenidos en el trabajo permiten viabilizar la utilización de la melaza de soja, sustrato este todavía no estudiado, para la producción de biometano. Así, un destino más adecuado de la melaza de soja, puede ser aplicada para la actual quema en calderas de casi la totalidad generada en la producción de proteína de soja.

Palabras-clave: Melaza de soja; Digestión anaerobia; UASB; Biogás.

Résumé

La production de biogaz à partir de la digestion anaérobie avec des résidus et des sous-produits agro-industriels prend de plus en plus d'importance dans le scénario économique, principalement en raison de la production de bioénergie par la réutilisation du biométhane. Dans ce contexte, l'objectif principal de cette étude a été d'évaluer le potentiel de production de biogaz (biométhane) à partir d'un sous-produit de la production de concentré protéique de soja à l'aide d'un réacteur à couverture de boues anaérobies (UASB) dont la technologie est consolidée pour le digestion anaérobie. Le réacteur banc (12 L) a été alimenté avec de la mélasse de soja comme substrat pour cinq conditions de fonctionnement (0,28 kg DCO.m⁻³.d⁻¹ à 3,91 kgDCO.m⁻³. d⁻¹), dans lesquelles la concentration du substrat en termes de demande chimique en oxygène (DCO) a été progressivement augmentée de 500 à 4 000 mgO₂.L⁻¹. De plus, différents temps de maintien hydraulique de 48h et 24h ont été testés. Pendant la période expérimentale (122 jours), il y a eu une élimination moyenne de la matière organique, en termes de DCO totale _ de 77 à 83%, avec une production maximale de biogaz de 1,82 Ld⁻¹. Les résultats obtenus dans ce travail permettent l'utilisation de la mélasse de soja, un substrat qui n'a pas encore été étudié, pour la production de biométhane. De cette façon, une destination plus appropriée pour la mélasse de soja peut être appliquée pour la combustion actuelle dans les chaudières de presque tous les produits de la production de protéines de soja.

Mots-clés: Mélasse de soja. Digestion anaérobie. UASB. Biogaz.

1 Introdução

O Brasil é considerado uma das principais potências mundiais cuja economia está baseada na agricultura, com destaque na produção e exportação de diversos grãos, gramíneas e frutas, entre outros (MAPA, 2015). A demanda em ascensão da industrialização de alimentos, vinculada à expansão demográfica mundial, proporcionou uma grande geração de resíduos e subprodutos agroindustriais, provindos da alta produtividade agrícola, proporcional ao avanço das fronteiras agrícolas brasileiras (ONU, 2012).

A soja se destaca, nesse cenário econômico, como um dos principais produtos agrícolas do país, por ser um grão versátil, relacionado a diversos produtos e subprodutos de interesse de vários setores industriais, desde agroindústrias a indústrias químicas, farmacêuticas e de alimentos (IMCOPA, 2017; LOMAN; JU, 2016). De acordo com dados do relatório trimestral da Fiesp (2018), o Brasil se tornou o maior produtor mundial de soja, com produção recorde de 120,5 milhões de toneladas durante a safra 2018/19, além de ocupar o posto de principal exportador e de quarto maior consumidor de grãos de soja.

Segundo projeções da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO - *Food and Agriculture Organization*), até 2025, o Brasil irá colher cerca de 135 milhões de toneladas de soja por safra. Além disso, aproximadamente 79% da soja colhida no Brasil é destinada para a produção de rações animais, na forma de farelo, com destaque para a crescente importância do grão na alimentação humana em termos de proteína de soja (substituta da proteína animal); 20% dos grãos são voltados para produção de óleo de soja e 1% é considerado sem destinação específica (MAPA, 2015). A cadeia produtiva da soja está vinculada à geração de subprodutos sem interesse comercial e resíduos sem tratamento e disposição consolidados ou ambientalmente corretos.

Produto de interesse no ramo alimentício, o farelo concentrado de soja (72% de proteína) gera, durante seu processamento, como subproduto, o melação de soja, que é um líquido concentrado remanescente da extração hidroalcolica do farelo de soja (YANG; YU, 2013). De acordo com Siqueira et al. (2008), para cada tonelada de soja processada, obtém-se cerca de 720 kg de farelo, o qual é utilizado para a obtenção de concentrados proteicos, gerando cerca de 190 kg de melação de soja.

Devido a sua composição rica em carboidratos (OBENDORF; KOSINA, 2011), o melação de soja já foi avaliado por pesquisadores como fonte de matéria-prima em processos fermentativos para obtenção de bioprodutos com elevado valor comercial, tais como: goma xantana (SILVA, 2010), ácidos lático e málico (CHENG et al., 2017), recuperação de lecitina residual (emulsificante) (FERREIRA, 2008) e etanol (SIQUEIRA et al., 2008; LETTI et al., 2012). Atualmente, nas unidades processadoras de soja, uma parcela do melação é utilizada como fonte de geração de energia, isto é, como combustível em caldeiras (queima).

Porém, até o momento, não existem processos consolidados para a utilização ou eventual disposição do melação de soja. Em sua composição são encontrados polissacarídeos e fibras insolúveis que encarecem sua utilização ao requerer pré-tratamentos para liberação dos monômeros fermentescíveis passíveis de serem utilizados na bioconversão (LOMAN; JU, 2016). Tal tratamento acarreta um aumento significativo nos custos envolvidos nos processos industriais, limitando a sua utilização como matéria-prima (CHENG et al., 2017).

Nesse contexto, devido à expansão do mercado da soja e seus derivados, torna-se imprescindível a destinação correta desses subprodutos, ainda com limitada perspectiva de mercado. Como uma alternativa sustentável e barata, a produção de bioenergia por meio da digestão anaeróbia do melação de soja tornou-se uma opção atrativa.

A partir da crescente procura por fontes energéticas renováveis, aliada à preocupação em se reduzir a dependência dos combustíveis fósseis, o processo de digestão anaeróbia (DA) tem sido amplamente aplicado para bioconversão de resíduos orgânicos a biogás, passível de ser utilizado como fonte de bioenergia, além de ser utilizado como fonte de calor por meio da queima e possível conversão em eletricidade (GRANGEIRO et al., 2019). A DA consiste em um bioprocessamento no qual um resíduo orgânico é convertido em produtos finais simples por um complexo grupo de microrganismos em um sistema livre de oxigênio. O biogás, contendo principalmente metano e gás carbônico, é gerado como produto, além de biomassa adicional (SPEECE, 1996).

A bioenergia gerada na forma de biogás por meio da DA apresenta diversas vantagens em relação a outras energias renováveis. O biogás pode ser armazenado, ao contrário da energia eólica ou solar, que apresentam oscilações a depender das condições de suas fontes específicas (EVANS et al., 2010). Em termos de bioenergia, a digestão anaeróbia é um processo amplamente conhecido, aplicado em muitas instalações de tratamento de resíduos em grande escala, apresentando baixo custo de operação e reduzido requerimento energético.

Dessa forma, reatores anaeróbios de alta taxa são utilizados, especialmente o reator anaeróbio de manta de lodo (reator UASB), no tratamento de diversos tipos de águas residuárias, promovendo a produção de biogás na grande maioria dos casos (LETTINGA, 1995). De acordo com Hulshoff Pol et al. (2004), a formação de lodo na forma granular, promovida pela configuração dos reatores UASB, é a razão do ótimo desempenho desse reator no tratamento via digestão anaeróbia de diversos resíduos e águas residuárias com elevada concentração de matéria orgânica. De fato, o reator UASB apresenta uma grande versatilidade em termos do tratamento de uma ampla variedade de resíduos, incluindo, inclusive, compostos recalcitrantes ou tóxicos.

Até o momento, não há relatos na literatura sobre o reaproveitamento de melaço de soja para produzir biogás por meio da digestão anaeróbia. Portanto, este trabalho visa a aplicação do reator anaeróbio (UASB), cuja tecnologia já é usada para vários tipos de resíduos e, agora, testada para subproduto agroindustrial (melaço de soja).

2 Metodologia

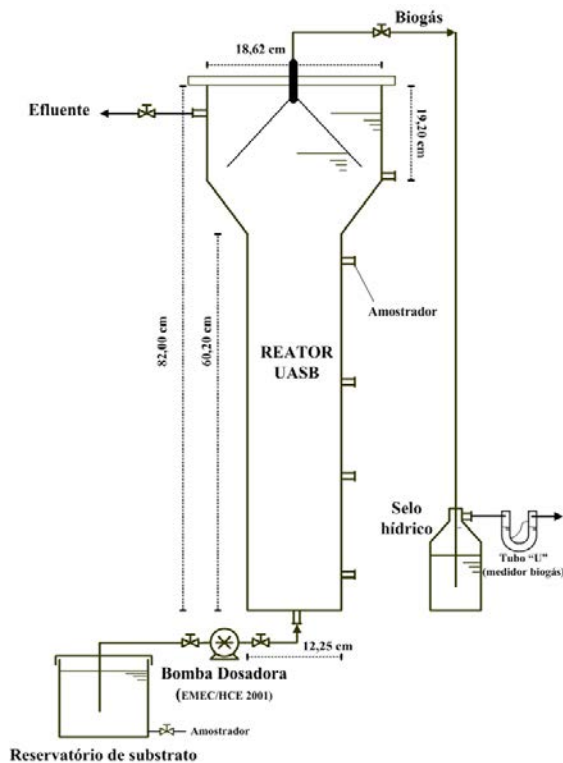
2.1 Aparato experimental

O reator UASB, construído em acrílico, possuía altura total de 82 cm, sendo o corpo principal do reator, destinado à manta de lodo, com 60,2 cm de comprimento e 12,25 cm de diâmetro (Figura 1). A parte superior, logo acima do corpo principal, tinha comprimento de 19,2 cm e 18,62 cm de diâmetro, perfazendo o volume total do reator de 12 L (Figura 2). A alimentação do reator foi realizada por meio de bomba dosadora (EMEC/HCE 2001), sendo o substrato armazenado em recipiente de vidro de 20 L.

O separador trifásico (gás-líquido-sólido) foi alocado na região superior do reator UASB, no formato de cone invertido, e interligado ao selo hídrico (Erlemmeyer - 1L). A medida de produção de biogás foi realizada por meio de deslocamento de líquido em um tubo de vidro em formato de “U” acoplado ao selo hídrico do reator. O sistema de medição foi construído para atender à necessidade de mensurar o volume de biogás gerado no reator, entre 120 a 3500 mL.d⁻¹, sendo esses valores relativos às concentrações de DQO mínima e máxima (500 e 4.000 mg.L⁻¹) previstas para o experimento, conforme cálculo teórico de produção de biogás proposto por Chernicharo (2007).

O tubo em formato de “U” faz parte do medidor de biogás, que foi confeccionado conforme a metodologia de Neto et al. (2014) e Falk (2011), com adaptações para melhor se adequar ao trabalho realizado. No tubo em forma de “U” havia uma conexão entre os vasos, chamada de válvula hidráulica, em forma de “J”. Esse tubo foi preenchido com líquido (KI - iodeto de potássio) para exercer as funções de selante e ponte salina. Também nele foram inseridos dois elétrodos de titânio, separados fisicamente, utilizados como eletroválvulas e ligados a uma placa *Arduino*. Essa placa consiste de uma plataforma de prototipagem eletrônica de código aberto com interface amigável e *hardware* e *software* de fácil utilização. A Figura 3 ilustra esquematicamente o medidor de biogás em “U”.

Figura 1 – Reator UASB utilizado no experimento



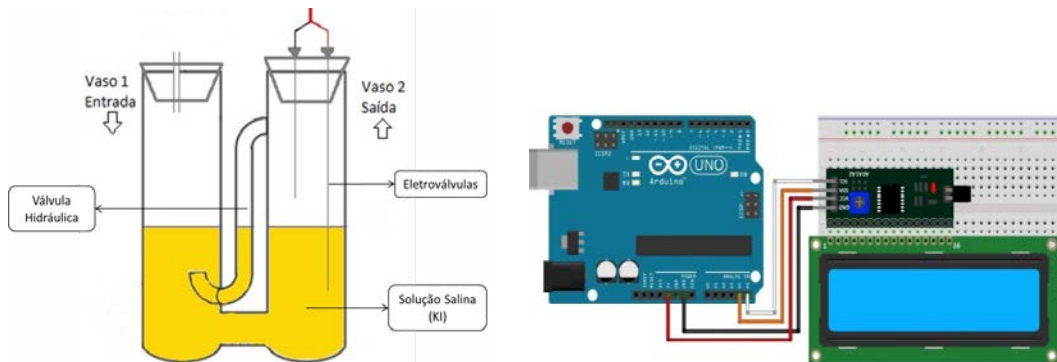
Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura – Foto do Reator UASB



Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 3 – Representação esquemática do medidor de biogás em tubo em “U” e placa Arduino



Fonte: Neto et al. (2014) com adaptações específicas da pesquisa.

Essa configuração de vasos comunicantes permite mensurar o volume de biogás produzido a partir do princípio de deslocamento de líquido. A saída do selo hídrico foi ligada ao medidor na entrada do vaso 1 do tubo em “U”, o qual era vedado para a atmosfera. A pressão crescente exercida pelo biogás no vaso 1 proporciona o deslocamento da coluna de líquido no interior do tubo até entrar em contato com os eletrodos, os quais foram alocados no vaso 2 (aberto para a atmosfera). Dessa forma, quando o líquido atinge os eletrodos, simultaneamente ocorre a recirculação pela válvula hidráulica (“J”), um volume fixo de biogás é liberado para a atmosfera pela mesma válvula e o sistema volta ao equilíbrio de volume de líquido nos vasos do tubo em “U”. Assim, o sistema estava pronto para o próximo ciclo de deslocamento, sendo o ciclo completo para o deslocamento de 2,5 mL no tubo “U”. A partir do contato do líquido com os eletrodos, a plataforma *Arduino* faz o controle eletrônico a cada ciclo. A calibração do sistema de medição foi feita conforme proposto por Neto et al. (2014), sendo a vazão de biogás máxima e mínima de 1 e 70 mL.min⁻¹, respectivamente.

2.2 Substrato e inóculo (lodo biológico)

O melão de soja *in natura*, utilizado no experimento, foi cedido pelo Grupo Caramuru de Alimentos S/A, situada na cidade de Sorriso/MT. A composição do melão de soja *in natura* está descrita na Tabela 1.

Tabela 1. Composição do melão de soja (*in natura*)

Composição	Unidades	Concentração (*)
Glicose	g.L ⁻¹	9,4
Frutose	g.L ⁻¹	10,1
Galactose	g.L ⁻¹	4,93
Sacarose	g.L ⁻¹	76,2
Rafinose	g.L ⁻¹	26,19
Estaquiase	g.L ⁻¹	80,6
Cálcio	mg/100mL	24,55
Fósforo	mg/100mL	60,16
Magnésio	mg/100mL	302,97
Potássio	mg/100mL	2.211
Enxofre	g/100mL	0,33
Sódio	mg/100mL	526,7
Cobre	mg/100mL	2,14
Zinco	mg/100mL	4,98
Proteína bruta	g.kg ⁻¹ (mínimo)	50,0
Fibra bruta	g.kg ⁻¹ (máximo)	3,0

Fonte: Caramuru Alimentos S.A. (*). Dados não disponíveis para consulta aberta.

O inóculo anaeróbio utilizado para a digestão anaeróbia do melão de soja era proveniente de reator UASB utilizado na estação de tratamento de águas residuárias da Avícola Dacar (Tietê/SP). A biomassa inoculada era de característica granular, com concentração de sólidos totais (ST) e de sólidos voláteis (SV) de 28,5 gST.L⁻¹ e 24,4 gSV.L⁻¹, respectivamente. O volume introduzido foi de 1/3 do volume útil do reator UASB, ou seja, de cerca de 3,5 L.

2.3 Condições operacionais e análises de monitoramento

A pesquisa realizada teve o intuito de avaliar o desempenho de um reator UASB submetido a diferentes condições operacionais (Fases 1 a 5) para produção de biogás, bem como o efetivo tratamento do substrato à base de melão de soja. Na Tabela 2 são apresentadas todas as fases operacionais em termos de concentração de substrato (demanda química de oxigênio - DQO) e tempo de detenção hidráulico (TDH). Vale ressaltar que a Fase 1, devido ao melão ser ainda um produto não aplicado para o tratamento biológico anaeróbio, foi considerada uma etapa de adaptação do inóculo (lodo anaeróbio) ao substrato alimentado ao reator UASB (500 mgDQO_{total}.L⁻¹ e TDH de 48h). Ressalta-se que todo o aparato experimental foi instalado no Laboratório do Instituto de Pesquisa em Bioenergia (IPBEN) do Instituto de Química da Unesp/Araraquara (SP).

Tabela 2. Condições operacionais aplicadas ao reator UASB

Fases operacionais	DQO (mg.L ⁻¹)	TDH (h)	Vazão (L.h ⁻¹)	Duração (dias)
1	500	48	0,25	52
2	1.000	48	0,25	21
3	2.000	48	0,25	16
4	2.000	24	0,50	14
5	4.000	24	0,50	19

Fonte: Elaboração própria (2020)

Previamente, foi determinada a concentração em termos de DQO relativa a cada grama de melão de soja (8 amostras analisadas), cuja concentração média apresentou o valor de $570 \pm 33 \text{ mgDQO}_{\text{total}} \cdot \text{L}^{-1}$. Nesse caso, para atingir as concentrações desejadas (Tabela 2), foi necessário diluir o melão em água do sistema de abastecimento público. Assim, nas fases de 1 a 5, foram adicionadas ao substrato de alimentação (20 L) as quantidades de melão de soja de 1,0; 2,0; 4,0 e 8,0 $\text{g}_{\text{melão}} \cdot \text{L}^{-1}$, respectivamente.

A introdução de bicarbonato de sódio ($1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ até $4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) como alcalinizante foi importante para manter o tamponamento do substrato de alimentação em virtude do valor de pH do melão de soja estar entre 5,3 e 5,5. Além disso, o melão foi considerado a única fonte de matéria orgânica e de macro (N e P) e micronutrientes presentes, não havendo a necessidade da introdução de outras fontes externas para propiciar a digestão anaeróbia. O resíduo é composto por grande quantidade de carboidratos, como açúcares de cadeia curta e longa (glicose, sacarose, rafinose, frutose, estaquiose e galactose), com potencial favorável para degradação em sistemas anaeróbios (Tabela 1).

A diluição do melão de soja foi necessária para a composição do substrato de alimentação em menores concentrações, em termos de DQO, em função do melão de soja ser um semissólido (massa específica = $1,35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$). A proposta para viabilizar a digestão anaeróbia em reator UASB com diluição do substrato permite a utilização do efluente tratado, como água de reuso, para a diluição inicial do afluente, ou seja, operação em circuito fechado com reposição eventual de água (“make-up”) ou até a utilização de outra água de processo para a diluição inicial. O reator UASB seria considerado apenas como uma unidade específica de produção de biometano, com reduzido descarte de efluente.

Para o acompanhamento do desempenho da unidade de tratamento, foram coletadas amostras do afluente e efluente do reator e realizadas as análises de: demanda química de oxigênio (DQO), bruta e filtrada (membrana de fibra de vidro/ $1,2 \mu\text{m}$), sólidos suspensos totais (SST), sólidos suspensos voláteis (SSV), alcalinidade a bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT). Além do acompanhamento de produção de biogás, avaliou-se a temperatura ambiente e do meio líquido, a vazão de alimentação e o pH.

A análise específica para avaliação da quantidade relativa de metano presente no biogás foi determinada por meio de cromatografia gasosa (CG) e realizada no cromatógrafo Shimadzu (modelo GC 2014), com detector de condutividade térmica e coluna HP-PLOT (ADORNO et al., 2014). O gás de arraste foi o hidrogênio, com vazão de $15 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$. Amostras de gás (0,5 mL) foram injetadas em duplicata. A frequência das análises e suas respectivas referências estão demonstradas na Tabela 3.

Tabela 3. Variáveis analisadas e a frequência de análises de monitoramento

Variáveis	Frequência	Método	Referência
pH	3/semana	4500 H+B	APHA (2005)
Vazão	3/semana	Proveta graduada e cronômetro	-
Produção biogás	Diária	Deslocamento de líquido	Neto et al. (2014); FALK (2011)
Temperatura	1/semana		
DQO (Total/Filtrada)	3/semana	Termômetro	-
SST/SSV	3/semana	5220-B	APHA (2005)
AB/AVT	2/semana	2540-C e 2540-E	APHA (2005)
	3/semana	Titulométrico	Ripley et al. (1986); Dilallo & Albertson (1961)

Fonte: Elaboração própria (2020)

3 Resultados e discussão

3.1 Desempenho do reator UASB

O monitoramento físico-químico do reator UASB foi estabelecido em fases, conforme a mudança de concentração do substrato e TDH (Tabela 1). Inicialmente, são apresentados na Tabela 4 os resultados médios

(M) e desvio padrão (dp) obtidos das variáveis relativas ao substrato (melaço de soja) nas várias etapas (fases) referentes aos 122 dias de operação do reator. Já na Tabela 5 são apresentados os resultados obtidos das análises físico-químicas do efluente do reator UASB (122 dias de operação). Salienta-se que os valores médios de temperatura do meio líquido (efluente) estiveram ao redor de 22 °C (22±2 °C).

Tabela 4. Valores médios (M) e desvio padrão (dp) das variáveis aplicadas ao reator UASB nas várias etapas de operação. COV = carga orgânica volumétrica

Variáveis	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5
	M±dp	M±dp	M±dp	M±dp	M±dp
Tempo de operação (dias)	52	21	16	14	19
TDH total (h)	48	48	48	24	24
Temperatura ambiente (°C)	23±1	25±1	23±2	24±2	24±1
COV _{aplicada} (kgDQO.m ⁻³ .d ⁻¹)	0,28±0,02	0,46±0,05	1,0±0,12	1,88±0,10	3,91±0,10
DQO _{total} (mg.L ⁻¹)	515 ±80	947 ±71	1903 ±147	1951 ±278	4038 ±604
DQO _{filtrada} (mg.L ⁻¹)	384 ±92	753 ±88	1506 ±168	1529 ±140	3483 ±669
AB (mgCaCO ₃ .L ⁻¹)	147 ±52	172 ±61	234 ±82	371 ±116	950 ±300
AVT (mgHac.L ⁻¹)	96 ±27	172 ±68	583 ±96	639 ±80	873 ±141
pH	7,7	7,6	7,4	7,3	7,5
SST (mg.L ⁻¹)	71 ±46	127 ±104	276 ±130	186 ±21	298 ±193
SSV (mg.L ⁻¹)	81 ±38	115 ±93	251 ±131	176 ±24	265 ±164

Fonte: Elaboração própria (2020)

Tabela 5. Valores médios (M) e desvio padrão (dp) das variáveis obtidas pelo reator UASB nas várias etapas de operação. COV = carga orgânica volumétrica

Variáveis	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5
	M±dp	M±dp	M±dp	M±dp	M±dp
Temperatura do líquido (°C)	22±2	24±3	23±2	24±1	25±2
COV _{remanescente} (kgDQO.m ⁻³ .d ⁻¹)	0,06±0,02	0,09±0,05	0,17±0,12	0,37±0,10	0,87±0,10
DQO _{total} (mg.L ⁻¹)	107 ±23	189 ±42	326 ±100	387 ±88	899 ±340
Remoção (%)	79	80	83	80	77
DQO _{filtrada} (mg.L ⁻¹)	75 ±18	146 ±29	230 ±46	243 ±57	683 ±200
Remoção (%)	85	84	88	88	83
AB (mgCaCO ₃ .L ⁻¹)	201 ±29	309 ±81	653 ±171	942 ±150	1841 ±200
AVT (mgHac.L ⁻¹)	81 ±21	177 ±62	228 ±71	259 ±58	272 ±135
pH	7,6	7,6	7,7	7,6	7,9
SST (mg.L ⁻¹)	71 ±46	127 ±104	276 ±130	186 ±21	298 ±193
SSV (mg.L ⁻¹)	81 ±38	115 ±93	251 ±131	176 ±24	265 ±164

Fonte: Elaboração própria (2020)

A avaliação do reator foi realizada desde a partida (Fase 1 - 56 dias), sendo mantido em operação com concentração média de 515±80 mgDQO_{total}.L⁻¹ e 384±92 mgDQO_{filtrada}.L⁻¹, com TDH superior (48 h) a outros de etapas subsequentes, cujo intuito específico era a adaptação da biomassa inoculada ao substrato alimentado ao reator. De acordo com Chernicharo (2007), o período de partida é uma etapa crucial para o desenvolvimento e o estabelecimento da população microbiana necessária ao tratamento anaeróbio.

Em relação à eficiência de remoção em termos de DQO durante esse período, o efluente apresentou valores médios de 107±23 mgDQO_{total}.L⁻¹ e 75±18 mgDQO_{filtrada}.L⁻¹, o que corresponde às médias de 79% (DQO_{total}) e 85% (DQO_{filtrada}). Em termos de sólidos, o afluente apresentou valores médios de 71±46 mgSST.L⁻¹ e 81±38 mgSSV.L⁻¹, e o efluente 32±15 mgSST.L⁻¹ e 33±7 mgSSV.L⁻¹. Os reduzidos valores de DQO e sólidos suspensos presentes no efluente indicaram que o reator teve reduzida perda de biomassa na fase de adaptação (fase 1), com rápida assimilação do substrato pelo inóculo anaeróbio presente.

Durante a fase de adaptação, não foi possível afirmar a estabilidade do processo anaeróbio em função da efetiva produção de AB nem o respectivo consumo de AVT durante o processo. Esse fato está relacionado com a presença inicial no substrato de AVT e com a introdução de bicarbonato de sódio na alimentação do reator para manter o sistema tamponado. As concentrações médias em termos de AB foram de $147 \pm 52 \text{ mgCaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ (afluente) e $201 \pm 29 \text{ mgCaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ (efluente), e as concentrações médias de AVT atingiram $96 \pm 27 \text{ mgHAc} \cdot \text{L}^{-1}$ (afluente) e $81 \pm 21 \text{ mgHAc} \cdot \text{L}^{-1}$ (efluente). Os valores médios de pH para afluente e efluente durante a fase 1 foram de 7,7 e 7,6, respectivamente.

Indicador do bom funcionamento do reator, o equilíbrio na concentração de AVT está relacionado com a interação sinérgica entre as bactérias acidogênicas e *arqueas* metanogênicas (SPEECE, 1996). A inibição do processo anaeróbio por AVT está associada ao pH, sendo que baixos valores de pH geralmente estão relacionados a altas concentrações de AVT, podendo, conseqüentemente, promover a falência de todo o sistema anaeróbio (SILVA; NOUR, 2005; KUS; WIESMANN, 1995).

O comportamento das variáveis físico-químicas durante as fases de 2 (21 dias), 3 (16 dias), 4 (14 dias) e 5 (19 dias) do reator UASB foi dependente das condições operacionais aplicadas (Tabela 1). Vale salientar que a mudança de condição de operação em cada fase foi feita a partir da constatação da estabilidade do sistema pelos parâmetros físico-químicos, como DQO e AVT.

Nas cinco fases, as eficiências médias de remoção mantiveram-se entre 77% e 83% e de 83% a 88%, tanto para $\text{DQO}_{\text{total}}$ como para a $\text{DQO}_{\text{filtrada}}$, respectivamente (Tabela 5). Em relação à qualidade do efluente em termos de $\text{DQO}_{\text{total}}$, foram obtidos valores médios de $189 \pm 42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (fase 2), $326 \pm 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (fase 3), $387 \pm 88 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (fase 4) e $899 \pm 340 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (fase 5).

Conforme pode ser observado na Tabela 5, na comparação entre os valores médios de $\text{DQO}_{\text{total}}$ e $\text{DQO}_{\text{filtrada}}$ nas referidas fases nota-se apenas diferença acentuada na fase 5, com TDH de 24 h e concentração média afluente de $4038 \pm 604 \text{ mgDQO}_{\text{Total}} \cdot \text{L}^{-1}$. Esse fato está relacionado com os valores de SST e SSV no efluente, sendo que, nas fases 2, 3 e 4, as baixas concentrações de DQO particulada no efluente, ou seja, relativa à presença de sólidos suspensos, pode indicar alta retenção de sólidos e pouca perda de biomassa.

Na fase 3 foi constatado o comportamento de geração de AB e ao consumo de AVT presente no reator, a fim de caracterizar o equilíbrio entre os microrganismos acidogênicos e metanogênicos. Portanto, nessa fase, a geração de AB e o consumo de AVT foram mais efetivos, com concentrações médias no efluente de $653 \pm 171 \text{ mgCaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ e $228 \pm 71 \text{ mgHAc} \cdot \text{L}^{-1}$ (fase 3), de $942 \pm 150 \text{ mgCaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ e $259 \pm 58 \text{ mgHAc} \cdot \text{L}^{-1}$ na fase 4 e de $1841 \pm 200 \text{ mgCaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ e $272 \pm 135 \text{ mgHAc} \cdot \text{L}^{-1}$ na fase 5. Nesse caso, as respostas ao aumento de concentração de substrato (COV) e na redução de TDH foram positivas para o processo anaeróbio. Durante essas fases, o pH do efluente manteve-se entre 7,6 e 7,9, e a temperatura do efluente entre 21 e 27 °C.

A produção de biogás com a utilização do medidor de tubo "U", após as calibrações necessárias para o experimento, foi quantificada para as várias fases de operação do UASB (Tabela 1), demonstrando a viabilidade de tratamento do melação de soja pela via anaeróbia. Na Tabela 6 são apresentados os valores médios, máximos e mínimos de produção de biogás para as fases de operação.

Tabela 6. Produção e concentração média de metano no biogás do reator UASB (fases 1 - 5)

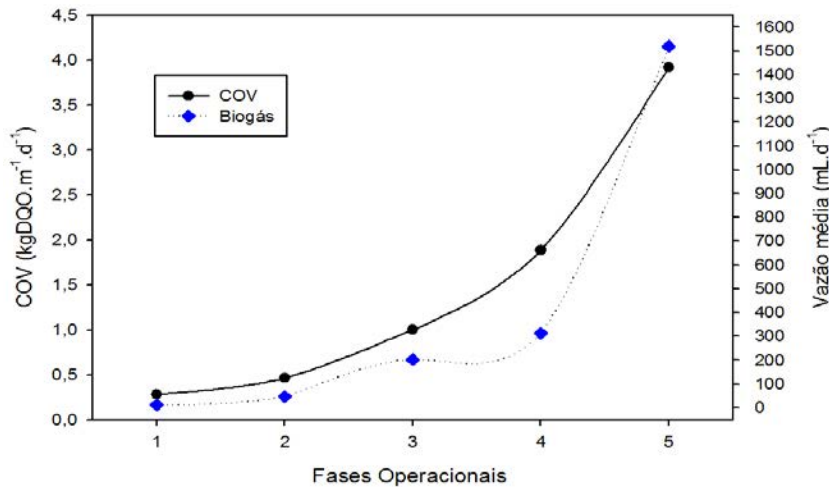
Fases	Período de medição (dias)	Produção média ($\text{mL} \cdot \text{d}^{-1}$)	Produção máxima ($\text{mL} \cdot \text{d}^{-1}$)	Produção mínima ($\text{mL} \cdot \text{d}^{-1}$)	Concentração metano (%)
1	6	12 ± 5	16,5	4,5	82,1
2	12	47 ± 30	90	7,5	81,7
3	9	202 ± 161	447	25	81,2
4	11	313 ± 162	465	135	81,1
5	5	1519 ± 333	1822	1000	80,1

Fonte: Elaboração própria (2020).

É possível notar que a produção de biogás aumentou de acordo com o aumento da carga orgânica aplicada (COV) em cada fase, entre $0,28 \text{ kgDQO} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ (fase 1) a $3,91 \text{ kgDQO} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ (fase 5), em conjunto

com a redução do TDH. Esse fato pode ser levado em consideração, pois o abaixamento do TDH influiu no aumento significativo da produção de biogás em reduzido intervalo de tempo de operação. Dessa forma, houve, ainda, a manutenção da elevada eficiência de remoção de carga orgânica no reator. Na Figura 4 é apresentada a variação temporal da produção média de biogás para as várias fases de operação do reator UASB em função da carga orgânica volumétrica aplicada (COV).

Figura 4 – Variação da produção média de biogás em função da COV aplicada (fases 1 a 5)



Fonte: Elaboração própria (2020)

A partir da quantidade de melação de soja adicionada ao substrato de alimentação na fase 5 ($8 \text{ g}_{\text{melaço}} \cdot \text{L}^{-1}$), a geração de biogás atingiu o valor máximo de $1,82 \text{ L}_{\text{biogás}} \cdot \text{d}^{-1}$ ($1822 \text{ mL}_{\text{biogás}} \cdot \text{d}^{-1}$) para $\text{TDH} = 24 \text{ h}$. Para esse valor máximo de produção, a vazão mássica diária de melação admitida no reator foi de $96 \text{ g}_{\text{melaço}} \cdot \text{d}^{-1}$ (vazão volumétrica x quantidade de melação). Portanto, a relação diária de produção de biogás é de $0,019 \text{ L}_{\text{biogás}}/\text{g}_{\text{melaço}}$ ou $0,019 \text{ m}^3_{\text{biogás}}/\text{kg}_{\text{melaço}}$ ($1,82/96$). Portanto, para cada tonelada de melação gerado na produção de proteína, pode-se produzir cerca de 20 m^3 de biogás. Considerando um valor médio de concentração de metano no biogás de 81%, teremos, em termos de biometano, o valor de $16,2 \text{ m}^3$.

Por se tratar de um estudo recente, não existem dados disponíveis na literatura que apresentem a produção de biogás a partir do melação de soja, no entanto o reator UASB se enquadra como um reator amplamente utilizado, logo, é possível comparar o desempenho desse estudo a outros envolvendo reatores UASB empregados no tratamento de resíduos agroindustriais, tal como o melação de soja (Tabela 7). De fato, em um estudo conduzido por Montes et al. (2019) para avaliar a produção de biogás a partir de águas residuárias provenientes da produção de gin em um reator UASB (1,3 L), nota-se que os autores aplicaram uma carga orgânica similar ao presente estudo ($3,9 \text{ kgDQO} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$) e obtiveram uma produção de metano de, aproximadamente, $1000 \text{ mL} \cdot \text{d}^{-1}$. Em termos de concentração de metano no biogás, nota-se que o presente estudo apresentou um valor superior aos trabalhos de Gür & Demirer (2019) e Cruz-Salomón et al. (2017), ressaltando a boa qualidade do biogás gerado a partir do melação de soja.

Tabela 7. Performance de reatores UASB utilizados para o tratamento de resíduos agroindustriais

Substrato (água residuária)	COV (kgDQO m ⁻³ d ⁻¹)	Biogás (mLCH ₄ d ⁻¹)	Eficiência de remoção de DQO (%)	CH ₄ (%)	Referência
Gin	3,9	1000	97	63 – 83	Montes et al., (2019)
Chocolate	2 - 6	300 - 1900	39 - 94	-	Esparza-Soto et al., (2019)
Pistacho	1,37 – 4,56	~3000	85-89	67,6	Gür & Demirer (2019)
Vinhaça	10,2	2140	91	67	Cruz-Salomón et al., (2017)
Melaço de soja	0,28 – 3,91	12 - 1822	77-83	81	Este estudo

Fonte: Elaboração própria (2020)

A partir da quantidade de melação de soja adicionada ao substrato de alimentação na fase 5 (8 g_{melaço}·L⁻¹), a geração de biogás atingiu o valor máximo, de 1,82 L_{biogás}·d⁻¹ (1822 mL_{biogás}·d⁻¹) para TDH = 24 h. Para esse valor máximo de produção, a vazão mássica diária de melação admitida no reator foi de 96 g_{melaço}·d⁻¹ (vazão volumétrica x quantidade de melação). Portanto, a relação diária de produção de biogás é de 0,019 L_{biogás}/g_{melaço} ou 0,019 m³_{biogás}/kg_{melaço} (1,82/96), isto é, cada tonelada de melação gerada na produção de proteína pode produzir cerca de 20 m³ de biogás. Considerando um valor médio de concentração de metano no biogás de 81%, teremos, em termos de biometano, o valor de 16,2 m³.

O biogás apresenta como principais constituintes o metano e o gás carbônico, havendo, também, baixas concentrações de monóxido de carbono, sulfeto de hidrogênio e amônia, entre outros (CHERNICHARO, 2007). No entanto as características do biogás dependem diretamente da composição do substrato, da temperatura e da pressão do sistema, além da concentração de metano e de gases inertes. Em condições normais, o biogás não é considerado tóxico por apresentar baixo teor (0% e 0,1%) de monóxido de carbono (CRIBARI, 2004). Seu poder calorífico para queima está diretamente relacionado à concentração de metano, logo, o biogás se torna mais energético quanto maior for a quantidade de metano. Na Tabela 6 são apresentados os valores obtidos de concentração de metano. Pode-se observar que, em todas as fases de operação, o teor de metano no biogás está dentro da faixa preconizada para reatores anaeróbios, de 65 a 85% (NOYOLA et al., 2006).

A Tabela 8 apresenta uma análise comparativa do biogás com outros combustíveis usuais em termos de equivalência de 1m³. O valor produzido de 20 m³ para cada tonelada de melação de soja pode representar, por exemplo, cerca de 9 kg de GLP, 12 L de gasolina, 15 kg de carvão mineral ou 130 kWh.

Tabela 8. Relação comparativa de biogás (1m³) com combustíveis usuais

Gases	Valor (unidade)
Gasolina	0,61 L
Biodiesel	0,55 L
Querosene	0,58 L
GLP	0,45 kg
Álcool anidro	0,79 L
Gás de cozinha	0,45 L
Carvão mineral	0,74 kg
Eletricidade	6,5 kWh
Lenha	1,6 a 3,5 kg

Fonte: Adaptado de Salomon e Silva Lora, (2009).

4 Conclusão

A partir dos dados obtidos foi possível constatar que o melaço de soja pode ser convertido a biogás pelo processo de digestão anaeróbia em reator UASB com TDH de até 24 h e concentração de substrato de 4.000 mgDQO.L⁻¹. Para as várias fases operacionais (COV entre 0,28 kgDQO.m⁻³.d⁻¹ e 3,91 kgDQO.m⁻³.d⁻¹), o tratamento biológico anaeróbio foi efetivo, atingindo-se eficiências médias próximas de 80% em termos de remoção de matéria orgânica e uma produção máxima de biogás de 1822 mL.d⁻¹. Dessa forma, é possível concluir que o melaço de soja é um substrato interessante para geração de biogás para uso energético de forma sustentável pela utilização de processo biológico anaeróbio, sem a introdução de fontes externas de matéria orgânica, macro e micronutriente. As baixas concentrações de matéria orgânica no efluente permitem vislumbrar seu uso para a diluição inicial do melaço de soja, ou seja, operação em circuito fechado e com reposição eventual de água. Nesse contexto, outro destino mais adequado pode ser dado a esse resíduo ao invés de sua queima em caldeira. Para tanto, novos estudos deverão ser viabilizados para aplicação em sistemas anaeróbios de maior escala para otimização de processo e ampliação da quantidade de melaço de soja a ser utilizada (> 8 g_{melaço}.L⁻¹), sendo necessários, ainda, trabalhos visando verificar a influência da recirculação de efluente final para o não descarte do efluente.

Referências

- ADORNO, M.; HIRASAWA, J.; VARESCHE, M.. Development and validation of two methods to quantify volatile acids. **Am. J. Anal. Chem.**, [S. l.], v. 5, p. 406–414, 2014.
- BRASIL. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. **Projeções do agronegócio: Brasil 2014/15 a 2024/25: projeções de longo prazo**, Brasília: Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento, 2015.
- Cheng, C.; Zhou, Y.; Lin, M.; Wei, P.; Yang, S. T.. Polymalic acid fermentation by *Aureobasidium pullulans* for malic acid production from soybean hull and soy molasses: fermentation kinetics and economic analysis. **Bioresource Technology**, [S. l.], v. 23, p. 166-174, 2017.
- CHERNICHARO, C. A. L. **Princípio do tratamento biológico de águas residuárias – reatores anaeróbios**. 2. ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2007. 380p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.5).
- CRIBARI, B. S. **Secagem térmica do lodo de esgoto gerado em uma estação de tratamento do tipo UASB + biofiltro aerados submersos**. 2004. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2004.
- CRUZ-SALOMÓN, A.; MEZA-GORDILLO, R.; ROSALES-QUINTERO, A.; VENTURA-CANSECO, C.; LAGUNAS-RIVERA, S.; CARRASCO-CERVANTES, J.. Biogas production from a native beverage vinasse using a modified UASB bioreactor. **Fuel**, [S. l.], v. 198, p. 170-174, jun. 2017.
- DILALLO, R.; ALBERTSON, O. E. Volatile acids by direct titration. **Journal WPCF**, [S. l.] v. 33, p. 356-365, 1961.
- ESPARZA-SOTO, M. *et al.* Anaerobic treatment of chocolate-processing industry wastewater at different organic loading rates and temperatures. **Water Science and Technology**, [S. l.], v. 79, n. 12, p. 2251-2259, 2019.
- Evans, A., Strezov, V.; Evans, T.J. Sustainability considerations for electricity generation from biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 14, p. 1419-1427, 2010.
- FALK, H. M. **Monitoring the anaerobic digestion process**. 2011. Tese (Doctor Biochemical Eng.) - Jacobs University, Bremen, 2011.

FEDEARÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Boletim informativo**: safra mundial de soja 2018/19 – 3º levantamento do USDA. São Paulo, 2017.

FERREIRA, P. Pioneirismo mundial troca resíduos de soja por soluções. **Inovação em Pauta**, Rio de Janeiro, v. 3, p. 41-43, 2008.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED. **OECD-FAO agricultural outlook 2016-2025: special focus: sub-saharn Africa** Paris: OECD Publishing, 2016.

GRANGEIRO, L. C. *et al.*. New trends in biogas production and utilization. In: RAI, Mahendra; INGLE, Avinash P. (ed.). **Sustain. Bioenergy**. [S. l.: s. n.], 2019. p. 199-223.

APHA. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21st ed. Washington, DC: American Public Health Association, 2005.

GÜR, E.; DEMIRER, G. N. Anaerobic digestability and biogas production capacity of pistachio processing wastewater in UASB reactors. **Journal of Environmental Engineering**, [S. l.], v. 145, n. 8, p. 1-7, 2019.

HULSHOFF POL, L. W. *et al.* Anaerobic sludge granulation. **Water Research**, [S. l.], v. 38, n. 6, p. 1376-1389, 2004.

IMCOPA. **Texto sobre a soja**. Disponível em: <http://www.imcopa.com.br/index.php>. Acesso em: 24 mar. 2017.

KUS, F.; WIESMANN, U. Degradation kinetics of acetate and propionate by immobilized anaerobic mixed cultures. **Water Research**, [S. l.], v. 29, n. 6, p. 1437-1443, 1995.

LOMAN, A. Al; JU, L. K. Soybean carbohydrate as fermentation feedstock for production of biofuels and value-added chemicals. **Process Biochemistry**, [S. l.], v. 51, n. 8, p. 1046-1057, 2016.

Letti, L. A. J.; Karp S.G.; Woiciechowski, A. L.; SOCCOL, R.C. Ethanol production from soybean molasses by *Zymomonas mobilis*. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 44, p. 80-86, 2012.

LETTINGA, G. Anaerobic digestion and wastewater treatment systems. **Antonie van Leeuwenhoek**, [S. l.], v. 67, p. 3-28, 1995.

MONTES, J. A. *et al.* Biogas production from the liquid waste of distilled gin production: optimization of UASB reactor performance with increasing organic loading rate for co-digestion with swine wastewater. **Bioresource Technology**, [S. l.], v. 274, p. 43-47, 2019.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Rio +20 o futuro que queremos**. Rio de Janeiro: Departamento de Informação Pública das Nações Unidas, 2012.

NOYOLA, A.; MORGAN-SAGASTUME, J. M.; LÓPEZ-HERNÁNDEZ, J. E. Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odour control energy/resource recovery. **Reviews in Environmental Sciences and Bio/Technology**, [S. l.], v. 5, p. 93- 114, 2006.

NETO, J. G. *et al.* Quantificação de biogás em reatores anaeróbios através do método de deslocamento de volume de água. **REA – Revista de estudos ambientais**, Blumenau, v. 16, n. 1, p. 45-53, 2014.

OBENDORF, R. L.; KOSINA, S. M. Soluble carbohydrates in soybean. In: NG, T. B. (ed.). **Soybean: biochemistry, chemistry and physiology**. Londres: In Tech, 2011. p. 201-228.

RIPLEY, L. E.; BOYLE, W. C.; CONVERSE, J. C. Improved alkalimetric monitoring for anaerobic digestion of high-strength wastes. **Journal WPCF**, [S. l.], v. 58, p. 406-411, 1986

SALOMON, K. R.; SILVA LORA, E. E. Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 33, n. 9, p. 1101-1107, 2009.

SILVA, C. R. **Remoção de galactooligossacarídeos em melão de soja para obtenção de produtos de interesse industrial**. 2010. 60 f. Tese (Doctor Scientiae) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

SILVA, G. H. R.; NOUR, E. A. A. Reator compartimentado anaeróbio/aeróbio: sistema de baixo custo para tratamento de esgotos de pequenas comunidades. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 2, p. 268-275, 2005.

SIQUEIRA, P. F., Karp S.G.; Carvalho J. C.; Wilerson, S.; Rodríguez-León, J.A. Jean-Luc, T.; Singhania, R. R.; Pandey, A.; SOCCOL, R.C. Production of bio-ethanol from soybean molasses by *Saccharomyces cerevisiae* at laboratory, pilot and industrial scales. **Bioresource Technology**, [S. l.], v. 99, p. 8156-8163, 2008.

SPEECE, R. E. **Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters**. Nashville: Archae Press, 1996.

YANG, S. T.; YU, M. Integrated biorefinery for sustainable production of fuels, chemicals and polymers. *In*: YANG, Shang-Tian; EL-ENSASHY, Hesham; THONGCHUL, Nuttha (ed.). **Bioprocessing technologies in biorefinery for sustainable production of fuels, chemicals and polymers**. United States: Wiley, 2013. cap. 1, p. 1-26.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP/PROCESSO no 15/15880-1) pelo apoio financeiro para a execução da pesquisa.

Sobre os autores

Brenda Clara Gomes Rodrigues

Doutoranda em Biotecnologia pelo Instituto de Química da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - Unesp/Araraquara-SP. Mestra em Biotecnologia, área de concentração em biotecnologia industrial e ambiental, pelo Instituto de Química da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - Unesp/Araraquara-SP. Engenheira de bioprocessos e biotecnologia pela Universidade Federal do Tocantins - UFT, com graduação sanduíche pelo programa Ciências Sem Fronteiras na Università di Pisa – Itália (2014 a 2015). Atuação na área de tratamento de resíduos agroindustriais para geração de bioenergia. Atualmente, interage em bioprospecção de microrganismos do complexo celulolítico, bioprocessos fermentativos e digestão anaeróbia em biorreatores, geração de bioenergia por biomassas, biorrefinarias.

Bruna Sampaio de Mello

Doutoranda em Química da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita. Mestra em Química pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (2020) – Unsp/ Instituto de Química de Araraquara-SP Filho. Graduada em Engenharia Química pela Universidade Estadual de Maringá (2012). Tem experiência na área de Engenharia Química, com ênfase em saneamento, atuando principalmente nos seguintes temas: tratamento de efluentes agroindustriais, reatores anaeróbios, biogás e bioenergia.

Maria Lucia Gonsales da Costa Araujo

Doutora em Engenharia Química pela Universidade Federal de São Carlos (1996). Mestra em Engenharia Química pela Universidade de São Carlos (1991). Graduada em Engenharia Química pela Universidade de São Paulo (1979). Professora assistente da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - Unesp (Instituto de Química/ Araraquara-SP). Tem experiência na área de Engenharia Química, com ênfase em processos bioquímicos (cinética de bioprocessos, modelagem, simulação, fluxos metabólicos de sistemas biológicos).

Gustavo Henrique Ribeiro da Silva

Pós-doutor pela Universidade de Wageningen / Instituto Holandês de Ecologia (2016). Doutorado em Hidráulica e Saneamento pela EESC – USP, com período sanduíche na Universidade de Wageningen-Holanda, em (2008). Mestre em Saneamento e Ambiente pela Unicamp (2001). Graduado em Engenharia Civil (1998). Atualmente, é professor associado da Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, campus de Bauru, do Departamento de Engenharia Civil (UNESP). Coordenador de curso de Pós-Graduação Interunidades em Engenharia Civil e Ambiental. Tem experiência na área de Engenharia Sanitária, gestão de resíduos, com ênfase em técnicas avançadas de tratamento de esgotos, atuando principalmente nos seguintes temas: ozonização, cloração, peroxidação, subprodutos, tratamento anaeróbio, reator compartimentado, esgoto sanitário, alagados construídos (constructed wetlands) água negra, microalgas, recuperação de N e P.

Arnaldo Sarti

Pós-doutor em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo - USP (2009). Doutor em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo - USP (2004). Mestre em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo - USP (1999). Graduado em Engenharia Química pela Universidade Federal de São Carlos - UFSC (1990). Atualmente, é docente do Departamento de Engenharia, Física e Matemática no Instituto de Química (Unesp/Campus de Araraquara) do curso de Engenharia Química e participa de Programa CAPES-PRINT (*Novel Chemical Approaches to Tackle the Challenges in Water Quality*). Tem experiência na área de saneamento, com atuação nos seguintes temas: tratamento de água, tratamento de esgoto sanitário, tratamento de águas residuárias industriais, reatores anaeróbios e aeróbios, e tratamento avançado (N e P).

Recebido em: 09.05.2020

Aceito em: 22.06.2020