

## III-880 - INFLUÊNCIA DO PRÉ-TRATAMENTO TERMO-ALCALINO NA BIOMETANIZAÇÃO A PARTIR DE DEJETO SUÍNO

### **Amanda de Sousa e Silva**

Engenheira Ambiental e Sanitarista pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE). Mestre em Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Doutoranda em Saneamento Ambiental na UFC.

### **Amanda Lima Moraes dos Santos**

Engenheira Ambiental e Sanitarista pela Universidade Federal do Maranhão (UFMA). Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento pela Universidade Federal de Alagoas (UFAL). Doutoranda em Saneamento Ambiental na Universidade Federal do Ceará (UFC).

### **Isabele Clara Cavalcante Malveira**

Graduanda em Biotecnologia na Universidade Federal do Ceará (UFC).

### **Bianca Holanda Albano Girão**

Graduanda em Biotecnologia na Universidade Federal do Ceará (UFC).

### **André Bezerra dos Santos<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Ceará (UFC). PhD em Environmental Sciences pela Wageningen University, Holanda. Professor Titular do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da UFC.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** R. Prof. Armando Farias, 713, Pici – Fortaleza, Ceará, Brasil – CEP: 60.440-900 – E-mail: [andre23@ufc.br](mailto:andre23@ufc.br)

## **RESUMO**

A suinocultura é um importante setor para o agronegócio brasileiro, visto que o Brasil figura como quarto maior produtor mundial. No entanto, com a atividade em expansão, há a geração de uma grande quantidade de dejetos que, por muitas vezes, não recebem tratamento e destino adequados, se configurando como uma potencial fonte de impacto poluidor capaz de contaminar solos, cursos de água e até mesmo o ar. Para realizar a limpeza dos locais, são utilizados grandes volumes de água o que agrava ainda mais o fator ambiental do processo e, além disso, as opções de tratamento do dejetos comumente utilizadas são onerosas e pouco sustentáveis. A gestão inadequada do dejetos suíno continua sendo um grande desafio para a suinocultura, sendo fundamental um maior investimento em tecnologias de gestão de resíduos e que os produtores de suínos sejam incentivados a adotar práticas sustentáveis em suas atividades. Uma alternativa viável para o destino do dejetos suíno (DS) é a digestão anaeróbia (DA), que permite a degradação desses subprodutos ao converter a matéria orgânica em biogás rico em metano, que pode ser utilizado como fonte de energia, até mesmo no ambiente das suinoculturas. Nesse contexto, o objetivo do presente estudo foi avaliar o efeito do pré-tratamento termo-alkalino na produção de biogás a partir do dejetos suíno e outros parâmetros operacionais da digestão, à exemplo da determinação da razão substrato:inóculo (S/I) do dejetos pré-tratado, visando a melhoria na eficiência da DA. O pré-tratamento termo-alkalino com NaOH 3% em autoclave a 121 °C promoveu o aumento da produção de biogás rico em metano a partir da digestão anaeróbia do dejetos suíno em condições mesofílicas com alto teor de ST (10%). Ademais, a razão S/I influencia na produção de biogás, sendo o aumento dessa relação benéfico ao processo até certo ponto, pois excesso de substrato pode ser inibitório, aumentando a fase *lag*. Neste trabalho, a relação S/I mais adequada foi 3 g SVsubstrato g SVinóculo<sup>-1</sup>, com produção de 366 mL de biogás/gSV até o final do experimento (90 dias) com teor de metano de 65-68%. Assim, verifica-se que a digestão anaeróbia com alto teor de ST de fato é uma alternativa interessante para o tratamento de DS, com possível agregação de valor econômico.

**PALAVRAS-CHAVE:** Digestão anaeróbia; Dejetos suíno; Pré-tratamento; Biogás; Razão substrato:inóculo.

## **INTRODUÇÃO**

A suinocultura é uma atividade agropecuária presente em todas as regiões do mundo. De acordo com dados da *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO), em 2021, foram produzidos cerca de 122,5

milhões de toneladas de carne de porco, tornando a suinocultura responsável pela segunda maior oferta de proteína animal do mundo e o Brasil como o quarto maior produtor mundial (FAOSTAT, 2022). Em geral, são demandados elevados volumes de água para manutenção das condições sanitárias nas granjas suínas, gerando diariamente cerca de 4 a 8 L de água residuária (AR) por animal, o que apresenta um elevado potencial poluidor devido a elevadas concentrações de matéria orgânica, sólidos em suspensão, nutrientes e patógenos nesta AR (CHENG *et al.*, 2019; NAGARAJAN *et al.*, 2019).

Por outro lado, é possível reduzir o consumo de água e gerar um menor volume de resíduos utilizando técnicas de limpeza a seco, em que o prévio umedecimento e raspagem das baias, facilitam a limpeza (MAPA, 2016). Assim, o resíduo gerado (dejeito suíno – DS) apresenta maior teor de sólidos, sendo a digestão anaeróbia (DA) um processo bastante atrativo para a degradação desses subprodutos, pois biodigestores anaeróbios convertem a matéria orgânica em metano (CH<sub>4</sub>), que pode ser utilizado como fonte de energia (calor e eletricidade), inclusive nas próprias suinoculturas (ANDRÉ; PAUSS; RIBEIRO, 2018; FREITAS *et al.*, 2019). Além disso, a combustão do metano produz bem menos gases tóxicos e de efeito estufa em relação aos combustíveis fósseis, reduzindo os impactos ambientais negativos (WANG; BAO; HU, 2023). Portanto, a geração de energia por uma biotecnologia ecologicamente correta se torna uma alternativa promissora para tratar a urgência de demanda energética e ambiental.

No entanto, a DA tradicional ainda é limitada pelos longos tempos de partida (fase *lag*), baixas eficiências de acidificação, lento metabolismo sintrófico de intermediários fermentativos e alta sensibilidade a fatores inibitórios (BHARATHIRAJA *et al.*, 2018; YIN; GU; WU, 2020). Dessa forma, a melhoria da eficiência da DA na produção de metano é um importante nicho de pesquisa na disposição de DS (ZHANG *et al.*, 2019). Assim, com a finalidade de aprimorar a produção de metano na DA de um substrato complexo, como o dejeito suíno, utilizam-se de técnicas de pré-tratamento, cujo objetivo é melhorar a etapa de hidrólise no processo de DA de resíduos orgânicos, uma vez que esta etapa já foi reconhecida como limitante da velocidade do processo de DA, aumentando a acessibilidade da matéria orgânica e otimizando a transferência de massa (GÊ; XU; LI, 2016; COARITA *et al.*, 2020).

Os métodos para pré-tratar resíduos orgânicos podem ser divididos em biológicos, químicos e físicos (mecânico e térmico). Os pré-tratamentos mecânicos envolvem moagem, desintegração eletrocinética, homogeneização de alta pressão, radiação de micro-ondas e ultrassom, objetivando a redução do tamanho das partículas, o aumento da acessibilidade de enzimas ao modificar a estrutura das paredes e membranas celulares e a solubilização de compostos biodegradáveis (COARITA *et al.*, 2020; LI *et al.*, 2023). O método químico envolve oxidação, alcalinização e acidificação, que por sua vez solubiliza a matéria orgânica, quebra a estrutura do resíduo, controla inibições endógenas e hidrolisa compostos celulósicos (TULUN; BILGIN, 2019; REZANIA *et al.*, 2020).

Já o pré-tratamento térmico envolve submeter a matéria orgânica a baixas ou altas temperaturas e congelamento/descongelamento, possui vantagens ao reduzir sólidos, quebrar as ligações químicas das paredes e membranas celulares, e solubilizar proteínas e matéria orgânica (SERRANO *et al.*, 2015). Enquanto métodos biológicos envolvem técnicas aeróbias, anaeróbias e de adição enzimática, objetivando aceleração da atividade hidrolítica, redução de sólidos, degradação de compostos lignocelulósicos e quebra de substâncias poliméricas (REZANIA *et al.*, 2020). Porém, a escolha do método utilizado deve levar em conta a conscientização ambiental por parte da geração de possíveis resíduos tóxicos e a desvantagem econômica do processo que envolve gastos com energia e reagentes.

Destaca-se que o pré-tratamento termo-alcalino une as vantagens de ambos os métodos, térmico e químico, e fornece efeitos sinérgicos em digestão anaeróbia de alto teor de sólidos (GUO *et al.*, 2017). Esse método combinado solubiliza as macromoléculas, diminui a viscosidade do meio, aumenta o rendimento de biogás, melhora a transferência de massa, aumenta a cinética da DA e evita a produção de espuma no reator (TOUTIAN *et al.*, 2021). Além disso, os efeitos do método combinado térmico e alcalino na produção de metano é maior que os efeitos da aplicação de apenas um dos pré-tratamentos, uma vez que impulsiona a degradação do resíduo, libera maior quantidade de matéria orgânica para os microrganismos e reduz significativamente a inibição por acidificação (ZOU *et al.*, 2020).

Ademais, sabe-se que, além da complexidade do substrato, diversos fatores podem influenciar no processo de DA, como, concentração do inóculo, carga orgânica, relação substrato/inóculo (S/I), pH, temperatura, entre outros (COMA *et al.*, 2017). Nesse contexto, o presente trabalho objetivou analisar o efeito do pré-tratamento termo-alcalino na biometanização do dejeito suíno em diferentes relações S/I em sistema de DA mesofílico

operado em batelada. Com isso, visa-se promover a melhoria da qualidade ambiental e do uso sustentável de recursos naturais que envolvem a suinocultura brasileira por meio do desenvolvimento de processos e tecnologias inovadoras voltadas para o tratamento de dejetos suíno e recuperação de recursos para o aumento da competitividade desse setor agropecuário, a fim de promover a liderança do agronegócio brasileiro de forma sustentável.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O DS utilizado neste experimento foi proveniente da higienização a seco das baias de suínos, com raspagem dos dejetos sólidos e lavagem por lâmina d'água com baixo volume de água. Após a coleta, o DS *in natura* foi caracterizado (análises físico-químicas) e refrigerado a 4 °C até o seu uso. Então, foi realizado o pré-tratamento termo-alcalino em dejetos suíno com adição do alcalinizante hidróxido de sódio (NaOH 3%) na proporção de 40% massa/volume e incubação em autoclave a 121 °C por 30 minutos.

Em seguida, foram realizados testes biológicos de Potencial Bioquímico de Metano (PBM) para avaliar o efeito do pré-tratamento no processo biológico, principalmente com relação à produção volumétrica de metano. Os experimentos foram realizados em triplicata em reatores operando em regime de batelada referentes a frascos de borossilicato de 250 mL, sendo 70 mL o volume de trabalho. O meio reacional foi constituído de DS pré-tratado, inóculo (lodo de estação de tratamento anaeróbio de água residuária de cervejaria) e solução de macro e micronutrientes. O teor de ST foi ajustado para 10% com adição de água deionizada, com ajuste de pH do meio para 7,0 e tamponamento do meio basal com bicarbonato de sódio. O teste se deu em diferentes relações substrato para inóculo (S/I): 1, 3 e 5 (g SVsubstrato g SVinóculo<sup>-1</sup> – LDpt 1, LDpt 3 e LDpt 5). Foram adotados os seguintes grupos controles: DS *in natura* (D), DS pré-tratado (Dpt), lodo (L), lodo com glicose (LG) e lodo com DS *in natura* (LD).

Os reatores foram selados com rolhas de borracha butílica e purgados com N<sub>2</sub>, durante 1 minuto, a fim de formar um ambiente anaeróbio e então armazenados em incubadora shaker (MA-420, Marconi LTDA, Brasil) sob agitação orbital de 150 rpm a 37 °C por 90 dias.

A quantificação da produção de biogás foi feita de modo indireto por meio da medição da pressão manométrica no reator. Já a análise qualitativa do biogás foi feita em um cromatógrafo gasoso com detecção de descarga por ionização de barreira dielétrica (*gas chromatography-barrier ionization discharge*, GC BID-2010 Plus, Shimadzu Corporation, Japão), equipado com coluna GS-GASPRO (60 m x 0,32 mm) (Agilent Technologies Inc., EUA). As temperaturas do forno, do injetor e do detector foram de 250, 50 e 100 °C, respectivamente. O gás hélio (White Martins LTDA, Brasil) foi utilizado como gás de arraste em um fluxo de 2 mL min<sup>-1</sup>, e o tempo de corrida do método foi de 9 min. A quantificação do biogás produzido no experimento foi realizada por um transmissor de pressão manométrico (Warme LTDA, Brasil).

Além da produção de biogás ao longo do tempo, no início e no final dos experimentos, foram analisados os seguintes parâmetros de controle do processo: pH e série de sólidos da mistura e demanda química de oxigênio (DQO) e amônia NH<sub>3</sub> da fração solúvel de acordo com APHA (2017).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

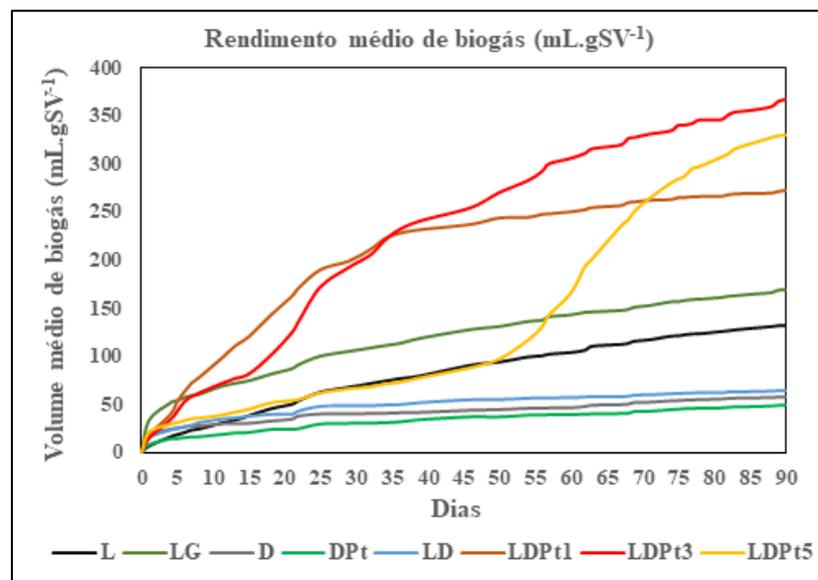
O resultado médio das análises físico-químicas realizadas no início e no final dos experimentos encontram-se na Tabela 1. No que diz respeito aos efeitos de solubilização e consumo de matéria orgânica, os grupos L, LG, LDpt1 e LDpt3 apresentaram diminuição na DQO solúvel, enquanto os grupos D, Dpt, LD e LDpt5 apresentaram aumento. No controle L houve uma leve redução, advinda da aclimação do lodo. Nos reatores LG, a DQO reduziu em função do consumo da glicose, um substrato facilmente oxidável pelos microrganismos. LD apresentou maior aumento de DQO percentual, em comparação com o grupo D, devido à uma hidrólise mais expressiva, justificada pela presença de microrganismos adaptados à DA. Em Dpt, nota-se que há um aumento na DQO solúvel, caracterizado pela hidrólise. No entanto, com a presença do lodo atribuída ao grupo LDpt1, houve uma redução na DQO, justificada pela metanogênese efetiva. O grupo LDpt3 foi o mais eficiente do experimento, em termos de remoção de matéria orgânica, visto que sua redução foi ainda maior do que em LDpt1. Na condição que continha a maior razão S/I (LDpt5), o aumento na DQO é explicado possivelmente em função da etapa metanogênica, que não foi expressiva no tempo esperado para os grupos LDpt, havendo a solubilização da matéria orgânica, mas não a remoção efetiva com a conversão em metano.

**Tabela 1: Análises físico-químicas realizadas no início e no final dos experimentos.**

Amostras	DQO mg O <sub>2</sub> /L		ST (%)			SV (%)		
	Inicial	Final	Inicial	Final	Redução	Inicial	Final	Redução
<b>L</b>	1.538	1.433	7,76	2,39	69	6,02	1,81	70
<b>LG</b>	2.871	1.835	8,39	2,47	71	6,35	1,79	72
<b>D</b>	17.274	49.033	9,49	2,95	69	6,19	2,20	64
<b>DPt</b>	6.872	28.514	8,74	1,79	79	5,22	1,05	80
<b>LD</b>	6.961	37.646	10,76	3,41	68	7,36	2,65	64
<b>LDPt 1</b>	11.406	10.138	8,53	2,27	73	6,05	1,46	76
<b>LDPt 3</b>	11.940	7.714	7,64	2,42	68	4,67	1,23	74
<b>LDPt 5</b>	12.562	27.246	10,09	2,93	71	5,69	1,64	71

Com relação ao teor de sólidos (Tabela 1), em todos os reatores houve redução de sólidos de forma efetiva. Contudo, o grupo DPt obteve maior redução em teor de sólidos voláteis (SV), visto que o dejetto pré-tratado se torna mais biodegradável devido ao pré-tratamento (KHAN; AHRING, 2021). Observa-se também que os reatores D e LD tiveram menores percentuais de redução de SV, em razão do estado de dejetto in natura, que é de difícil degradação. No grupo LDPT, foi observado que o aumento da relação S/I fez com que diminuísse o percentual de redução de sólidos, o que é condizente com o incremento de matéria orgânica remanescente nos reatores ao final do experimento.

Em relação à produção de biogás (Figura 1), os reatores LDPT 1 apresentaram maior rendimento até o 34º dia de operação, quando os LDPT 3 passaram ter o maior rendimento, produzindo cerca de 366 mL de biogás por gSV até o final do experimento (90 dias), enquanto os LDPT 1 alcançaram rendimento máximo de 273 mL.gSV<sup>-1</sup> nesse mesmo período. Já os LDPT 5 apresentaram a produção de biogás mais baixa entre os grupos de lodo com DS pré-tratado até o 71º, quando passaram a ter rendimento superior ao LDPT 3, atingindo 330 mL.gSV<sup>-1</sup> ao final do experimento. Todos os reatores que passaram pelo pré-tratamento (LDPT 1, 3 e 5) alcançaram maior produção que os LD. Os rendimentos de produção de biogás dos demais reatores em ordem crescente foram: DPt (49 mL.gSV<sup>-1</sup>), D (58 mL.gSV<sup>-1</sup>), LD (64 mL.gSV<sup>-1</sup>), L (132 mL.gSV<sup>-1</sup>) e LG (170 mL.gSV<sup>-1</sup>).



**Figura 1: Volume médio de biogás ao longo do teste de Potencial Bioquímico de Metano (PBM).**

Os reatores D obtiveram produção de biogás superior ao grupo DPt, porque o DS *in natura* já possui uma comunidade microbiana complexa, porém a incubação na autoclave durante o pré-tratamento termo-alcalino

(121°C, 30 minutos) pode levar à morte de boa parte destes microrganismos, causando um balanço de energia negativo no reator (ANDRÉ; PAUSS; RIBEIRO, 2018). Destaca-se também que o LD foi ligeiramente superior ao D, devido aos microrganismos presentes no lodo que eram adaptados a condições de digestão anaeróbia, porém não adaptados ao substrato DS. Entretanto, nenhum desses 3 grupos apresentou produção significativa de metano, sendo o biogás composto praticamente por CO<sub>2</sub>.

Na Figura 1 também é possível observar que nos 4 primeiros dias de operação os LG apresentaram maior inclinação da reta de rendimento de biogás, seguidos pelos LDpt 1 e 3, enquanto os controles DPt, D e LD desenvolveram menor inclinação, sem variações acentuadas ao longo do tempo.

Todos os reatores que passaram pelo pré-tratamento (LDpt 1, 3 e 5) alcançaram maior produção que os LD, pois esse processo aumenta a acessibilidade à matéria orgânica, tornando a hidrólise menos limitante e reduzindo a fase *lag* (KHAN; AHRING, 2021). As diferentes razões S/I testadas apresentaram perfis diferentes, em que o aumento da relação S/I a princípio não foi favorável à produção de biogás, provavelmente porque a maior quantidade de substrato pode acarretar um aumento de fatores inibitórios (ANDRÉ; PAUSS; RIBEIRO, 2018). Entretanto, a partir do 34º dia a produção de biogás do LDpt 3 ultrapassou a do LDpt 1, e a partir do 71º dia o LDpt 5 também superou o LDpt 1, o que indica uma possível adaptação dos microrganismos ao longo do tempo (CAO *et al.*, 2020).

Os grupos controles também apresentaram diferenças significativas no que diz respeito à sua produção de biogás. Os reatores LG apresentaram maior inclinação da reta de rendimento de biogás no início do experimento, indicando menor tempo de fase *lag*, já que a glicose é um substrato prontamente biodegradável pela comunidade microbiana (ALTAMIRANO-CORONA *et al.*, 2021; LIU *et al.*, 2016).

Quanto à composição do biogás, os reatores LG e LDpt 1 e 3 produziram biogás com 65-68% de CH<sub>4</sub> e L de 59%, valores condizentes com o esperado na digestão anaeróbia (50-70%), enquanto D, DPt e LD não produziram quantidade significativa de metano, sendo a composição quase 100% de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), provavelmente advindo majoritariamente da adição de bicarbonato de sódio para o tamponamento do sistema, indicando a não ocorrência satisfatória da etapa da metanogênese (BRASIL, 2015). Já o LDpt 5 não gerou quantidade significativa de CH<sub>4</sub> até o 39º dia, porém a partir desse dia até o final do experimento produziu biogás com composição média de 65% de CH<sub>4</sub>, possivelmente porque a etapa metanogênica só ocorreu de forma significativa a partir deste dia, após a adaptação das arqueias metanogênicas ao meio (DAI, *et al.*, 2016).

## CONCLUSÕES

O pré-tratamento termo-alcálico com NaOH 3% em autoclave a 121 °C promoveu o aumento da produção de biogás rico em metano a partir da digestão anaeróbia do dejetos suíno em condições mesofílicas com alto teor de ST (10%). Ademais, a razão S/I influencia na produção de biogás, sendo o aumento dessa relação benéfico ao processo até certo ponto, pois excesso de substrato pode ser inibitório, aumentando a fase *lag*. Neste trabalho, a relação S/I mais adequada foi 3 g SVsubstrato g SVinóculo<sup>-1</sup>, com produção de 366 mL de biogás/gSV até o final do experimento (90 dias) com teor de metano de 65-68%. Assim, verifica-se que a digestão anaeróbia com alto teor de ST de fato é uma alternativa interessante para o tratamento de DS, com possível agregação de valor econômico.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico–CNPq, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior–CAPES, da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais–FAPEMIG e do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto–INCT ETEs Sustentáveis.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALTAMIRANO-CORONA, María F.; ANAYA-REZA, Omar; DURÁN-MORENO, Alfonso. Biostimulation of food waste anaerobic digestion supplemented with granular activated carbon, biochar and magnetite: A comparative analysis. *Biomass and Bioenergy*, v. 149, p. 106105, 2021.
2. ANDRÉ, L.; PAUSS, A.; RIBEIRO, T. Solid anaerobic digestion: State-of-art, scientific and technological hurdles. *Bioresource Technology*, vol. 247, p. 1027–1037, 2018.
3. BHARATHIRAJA, B. *et al.* Biogas production – A review on composition, fuel properties, feed stock and principles of anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 90, p. 570–582, 2018.

4. Brasil. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o Brasil: substratos, digestores e uso de biogás / Probiogás; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ); autores, Oliver Jende ... [et al.]. – Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2015. 83 p.
5. CAO, Leipeng et al. Effects of temperature and inoculation ratio on methane production and nutrient solubility of swine manure anaerobic digestion. *Bioresource technology*, v. 299, p. 122552, 2020.
6. CHENG, D. L.; NGO, H. H.; GUO, W. S. Microalgae biomass from swine wastewater and its conversion to bioenergy. *Bioresource Technology*, vol. 275, no. October 2018, p. 109–122, 2019.
7. COARITA FERNANDEZ, H. et al. Mechanical pre-treatments evaluation of cattle manure before anaerobic digestion. *Waste and Biomass Valorization*, v. 11, p. 5175-5184, 2020.
8. COMA, M. et al. Organic waste as a sustainable feedstock for platform chemicals. *Faraday Discussions*, v.202, p. 175–195, 2017.
9. DAI, Xiaohu et al. Metabolic adaptation of microbial communities to ammonium stress in a high solid anaerobic digester with dewatered sludge. *Scientific Reports*, v. 6, n. 1, p. 28193, 2016.
10. FAOSTAT. Livestock Primary. 2021. Disponível: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QL>.
11. FREITAS, F. F. et al. The Brazilian Market of Distributed Biogas Generation: Overview, Technologies, Development and Case Study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 101, p. 146–157, 2019.
12. GE, Xumeng; XU, Fuqing; LI, Yebo. Solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: Recent progress and perspectives. *Bioresource Technology*, v. 205, p. 239-249, 2016.
13. GUO, Haigang et al. Influence of alkaline-thermal pretreatment on high-solids anaerobic digestion of dewatered activated sludge. *BioResources*, v. 12, n. 1, p. 195-210, 2017.
14. KHAN, Muhammad Usman; AHRING, Birgitte K. Anaerobic digestion of digested manure fibers: Influence of thermal and alkaline thermal pretreatment on the biogas yield. *BioEnergy Research*, v. 14, n. 3, p. 891-900, 2021.
15. LIU, Can et al. Characterization of methanogenic activity during high-solids anaerobic digestion of sewage sludge. *Biochemical Engineering Journal*, v. 109, p. 96-100, 2016.
16. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, P. e A. (MAPA). Suinocultura de Baixa Emissão de Carbono: Tecnologias de Produção Mais Limpa e Aproveitamento Econômico dos Resíduos da Produção de Suínos. 2016.
17. NAGARAJAN, D. et al. Current advances in biological swine wastewater treatment using microalgae-based processes. *Bioresource Technology*, vol. 289, p. 121718, 2019.
18. REZANIA, Shahabaldin et al. Different pretreatment technologies of lignocellulosic biomass for bioethanol production: An overview. *Energy*, v. 199, p. 117457, 2020.
19. SERRANO, Antonio et al. Improvement of the biomethanization of sewage sludge by thermal pre-treatment and co-digestion with strawberry extrudate. *Journal of Cleaner Production*, v. 90, p. 25-33, 2015.
20. TULUN, Şevket; BILGIN, Melayib. Enhancement of anaerobic digestion of waste activated sludge by chemical pretreatment. *Fuel*, v. 254, p. 115671, 2019.
21. YIN, Q.; GU, M.; WU, G. Inhibition mitigation of methanogenesis processes by conductive materials: A critical review. *Bioresource Technology*, vol. 317, no. June, p. 123977, 2020.
22. ZHANG, J. et al. Effects of magnetite on anaerobic digestion of swine manure: Attention to methane production and fate of antibiotic resistance genes. *Bioresource Technology*, vol. 291, no. July, p. 121847, 2019.
23. ZOU, Xuemei et al. Effects of mixed alkali-thermal pretreatment on anaerobic digestion performance of waste activated sludge. *Journal of Cleaner Production*, v. 259, p. 120940, 2020.