

PRODUÇÃO DE METANO A PARTIR DE LODO DE FLOTADOR DE ABATEDOURO DE FRANGOS PRÉ-TRATADO COM KOH

Felippe Martins Damaceno - Universidade Estadual de Maringá (UEM), Campus Regional de Umuarama, Departamento de Meio Ambiente (DAM) – fmdamaceno2@uem.br

Monica Sarolli Silva de Mendonça Costa - Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PGAGRI) - monica.costa@unioeste.br

Thiago Edwiges - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) - thiago.edwiges@gmail.com

Tarcio Rocha Lopes - Universidade Estadual de Maringá (UEM) - trcrch@gmail.com

Ricardo Puziol de Oliveira - Universidade Estadual Paulista (UNESP) - rpuziol.oliveira@gmail.com

Resumo: Neste estudo foi avaliado o efeito do pré-tratamento alcalino com hidróxido de potássio (KOH) em diferentes concentrações na digestão anaeróbia do lodo de flotador de abatedouro de frangos (LFAF), visando à maximização da produção de metano. O LFAF, caracterizado por elevados teores de lipídios e proteínas, apresenta limitações à biodegradabilidade devido à baixa solubilidade e à lenta etapa de hidrólise. Foram aplicadas cinco concentrações de KOH (0,02 a 0,50 g/g_{SVsubstrato}), seguidas de ensaios de potencial bioquímico de metano em batelada sob condições mesofílicas (37 °C). Os resultados indicaram que o pré-tratamento promoveu aumento significativo da solubilização da matéria orgânica, com elevação da DQO solúvel e redução dos teores de lipídios na fração sólida, evidenciando a ocorrência de reações de saponificação. A produção de biogás apresentou antecipação do pico de geração nos tratamentos com KOH, além de incremento no teor de metano. O melhor desempenho foi observado na concentração de 0,50 g/g_{SVsubstrato}, com produção de 573,5 mL_N CH₄/g_{SV} e teor de metano de 82,2%, representando aumento de 53,2% em relação ao controle. Entretanto, concentrações elevadas resultaram em aumento do tempo necessário para estabilização do processo, possivelmente associado à inibição por íons K⁺. Os resultados demonstram que o pré-tratamento alcalino com KOH é uma estratégia eficaz para aumentar a biodisponibilidade do LFAF e potencializar a produção de metano, contribuindo para a valorização energética de resíduos agroindustriais.

Palavras-chave: Digestão anaeróbia, Resíduos agroindustriais, Pré-tratamento alcalino, Biogás

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

METHANE PRODUCTION FROM CHICKEN SLAUGHTERHOUSE FLOTATION SLUDGE PRE-TREATED WITH KOH

Abstract: This study evaluated the effect of alkaline pretreatment with potassium hydroxide (KOH) at different concentrations on the anaerobic digestion of poultry slaughterhouse flotation sludge (PSLS), aiming to maximize methane production. PSLS, characterized by high lipid and protein content, presents limitations to biodegradability due to low solubility and a slow hydrolysis step. Five KOH concentrations (0.02 to 0.50 g/gVS substrate) were applied, followed by batch methane biochemical potential assays under mesophilic conditions (37 °C). The results indicated that the pretreatment promoted a significant increase in the solubilization of organic matter, with an increase in soluble COD and a reduction in lipid content in the solid fraction, evidencing the occurrence of saponification reactions. Biogas production showed an earlier peak generation in the KOH treatments, in addition to an increase in methane content. The best performance was observed at a concentration of 0.50 g/gVS substrate, with a production of 573.5 mL N CH₄/gVS and a methane content of 82.2%, representing a 53.2% increase compared to the control. However, higher concentrations resulted in an increased time required for process stabilization, possibly associated with inhibition by K⁺ ions. The results demonstrate that alkaline pretreatment with KOH is an effective strategy to increase the bioavailability of LFAF and enhance methane production, contributing to the energy recovery of agro-industrial waste.

Keywords: Anaerobic digestion, Agro-industrial waste, Alkaline pretreatment, Biogas

1. INTRODUÇÃO

A cadeia produtiva do frango de corte possui relevância estratégica para a segurança alimentar global e para a economia de países emergentes. O Brasil destaca-se como o maior exportador mundial e o terceiro maior produtor de carne de frango, com cerca de 15 milhões de toneladas produzidas em 2024, das quais mais de 35% foram destinadas à exportação, gerando aproximadamente US\$ 9,9 milhões em receita (ABPA, 2025). Entretanto, a intensificação dessa atividade tem resultado no aumento expressivo da geração de resíduos orgânicos, especialmente aqueles oriundos das etapas de abate e processamento industrial.

Entre esses resíduos, o lodo de flotador de abatedouro de frangos (LFAF) merece destaque por ser proveniente do tratamento físico-químico das águas residuárias, contendo elevadas concentrações de lipídios e proteínas, que podem ultrapassar 80% da matéria orgânica (DAMACENO et al., 2022; DAMACENO et al., 2019). Apesar do elevado potencial energético, esse resíduo ainda é frequentemente subvalorizado, sendo destinado à compostagem, produção de farinha ou aterros, práticas limitadas por custos elevados, exigências sanitárias e restrições de mercado associadas a riscos sanitários (GOODING & MEEKER, 2016; WANG et al., 2018).

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Nesse contexto, a digestão anaeróbia (DA) se apresenta como alternativa promissora para a valorização energética desses resíduos, possibilitando a produção de biogás rico em metano, além da redução da carga orgânica e contribuição para metas de descarbonização e economia circular (DEUBLEIN & STEINHAUSER, 2011; Yin et al., 2023). O elevado potencial metanogênico de substratos lipídicos e proteicos, aproximadamente 1.014 e $740 \text{ LCH}_4 \cdot \text{kg}^{-1} \text{SVadic}$, respectivamente, em comparação aos carboidratos (cerca de $370 \text{ LCH}_4 \cdot \text{kg}^{-1} \text{SVadic}$) reforça essa viabilidade (WAN et al., 2011). Contudo, a aplicação da DA ao LFAF enfrenta limitações operacionais, como baixa solubilidade, hidrofobicidade, formação de crostas e espumas, além de uma etapa de hidrólise lenta, que compromete a eficiência do processo (ALQARALLEH et al., 2019; CUETOS et al., 2017).

Embora diferentes estratégias de intensificação da biodegradabilidade tenham sido propostas, a maioria dos estudos concentra-se em substratos lignocelulósicos, havendo lacunas quanto à aplicação em resíduos lipoproteicos como o LFAF (EDWIGES et al., 2019; MACHHIRAKE et al., 2024; YIN et al., 2023; KOWTHAMAN et al., 2021). Nesse sentido, os pré-tratamentos, classificados em físicos, térmicos, químicos e biológicos, têm sido empregados para promover a ruptura de estruturas complexas e aumentar a biodisponibilidade da matéria orgânica (ELALAMI et al., 2020; WANG et al., 2018). Dentre eles, o pré-tratamento alcalino se destaca pela capacidade de promover saponificação de lipídios e desnaturação de proteínas, aumentando a fração solúvel do substrato (LI et al., 2012), com eficiência mesmo em temperatura ambiente (BASTOS et al., 2021). O uso de agentes como NaOH e KOH tem demonstrado incrementos significativos na solubilização da matéria orgânica e na produção de metano (MACHHIRAKE et al., 2024; LIU et al., 2021).

Diante da elevada geração de LFAF, de sua complexidade físico-química e do seu potencial energético, torna-se fundamental aprofundar estudos sobre estratégias de pré-tratamento, especialmente alcalinas, e compreender melhor o desempenho de agentes como o KOH em diferentes concentrações na digestão anaeróbia. Assim, este estudo teve como objetivo avaliar os efeitos do pré-tratamento alcalino com KOH em diferentes concentrações aplicadas ao LFAF sobre a produção de metano em reatores anaeróbios em batelada, visando contribuir para a otimização da digestão anaeróbia de resíduos lipoproteicos e para o avanço de práticas mais eficientes de valorização energética no setor avícola.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Substrato e inóculo

O LFAF foi coletado em uma unidade de tratamento físico-químico da linha vermelha de uma agroindústria de abate de aves da região Oeste do Paraná/Brasil. O processo inclui um tratamento preliminar em que o efluente com sangue, vísceras e outros resíduos do abate passam por peneiras e tanque de equalização, seguido de tratamento físico-químico no flotor, local em que o material flotado é recolhido e encaminhado à centrifuga tridecanter que separa água, óleo e lodo.

O inóculo utilizado como fonte de microrganismos para os ensaios de digestão anaeróbia foi fornecido pelo Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás (CIBiogás), localizado em Foz do Iguaçu/Brasil. O inóculo foi composto por uma mistura de lodo de reatores anaeróbios que tratam dejetos suínos e bovinos, além de dejetos bovinos brutos na proporção $1: \frac{1}{2} : \frac{1}{2}$ (w/w).

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

respectivamente, visando garantir ao menos 50% de matéria orgânica (base em sólidos voláteis) e níveis adequados de conversão da matéria orgânica em biogás (EDWIGES et al., 2018).

2.2 Pré-tratamentos alcalinos com KOH

Foram aplicados pré-tratamentos alcalinos em cinco concentrações: 0,02, 0,05, 0,15, 0,25 e 0,5 g/g_{VSubstrato} com KOH. Os pré-tratamentos foram realizados com uma mistura de 250 mL de solução alcalina (água destilada + solução química) e 25 g de LFAF (em base seca), com três repetições para cada concentração. O teor de sólidos totais da mistura foi ajustado para 10% (MACHHIRAKE et al., 2024). Os reagentes utilizados foram de padrão analítico e a pureza do KOH foi de 85%. Após adicionar o LFAF às diferentes soluções de KOH, a mistura foi homogeneizada e ficou em reação durante um período de 60 minutos em temperatura ambiente e o material resultante foi utilizado como substrato nos ensaios em batelada.

2.3 Ensaios em batelada para a determinação do potencial bioquímico de metano

Após a aplicação dos pré-tratamentos, o ensaio de potencial bioquímico de metano (PBM) foi realizado de acordo com Holliger et al. (2016). A proporção entre inóculo e substrato (RIS) foi fixada em 3:1 em massa de sólidos voláteis. O experimento foi realizado em frascos reatores de vidro de 125 mL (com volume suficiente de *headspace* para armazenamento do biogás) e conduzido em temperatura mesofílica (37 °C) até o momento em que a produção diária de biogás representar menos de 1% da produção acumulada de biogás. Três reatores adicionais foram utilizados para avaliar a atividade biológica do inóculo, utilizando celulose microcristalina (Sigma-Aldrich, 20 µm de diâmetro) como amostra de referência (controle positivo), a fim de validar a eficácia do inóculo utilizado nos testes e três frascos foram abastecidos apenas com inóculo para avaliar a produção endógena de biogás (controle negativo). Após preenchimentos dos frascos foi expurgado Nitrogênio gasoso (N₂) visando criar imediatamente uma condição ambiental livre de oxigênio.

O biogás foi quantificado por meio do deslocamento do gás em uma seringa de vidro de 100 mL (Hamilton / Gastight) até que a pressão interna dos frascos fosse equivalente à pressão atmosférica (pressão manométrica). O volume de biogás produzido foi monitorado diariamente e padronizados nas condições normais de temperatura e pressão por meio da Equação 1.

$$V_0 = V \cdot \frac{(P_L - P_W) \cdot T_0}{P_0 \cdot T} \quad (1)$$

Em que:

V₀ = volume de biogás padronizado (mL);

V = volume de biogás registrado (mL);

P_L = pressão atmosférica no momento do registro (mbar);

P_W = pressão de vapor da água (mbar);

T₀ = temperatura normalizada (273 K);

P₀ = pressão normalizada (1,013 mbar);

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

T = temperatura ambiente (K).

A pressão de vapor de água (P_w) também foi considerada, pois a mesma superestima entre 2 e 8% o volume do biogás produzido em condições normais de temperatura e pressão (STRÖMBERG, NISTOR, LIU, 2014). O cálculo da pressão de vapor de água foi realizado por meio da equação de Antoine (Equação 2), que considera a temperatura ambiente (T).

$$P_w = 10^{8,1962 - \frac{1730,63}{T - 39,724}} \quad (2)$$

2.4 Métodos analíticos

Os substratos (antes e depois dos pré-tratamentos) e os digestatos foram caracterizados por meio de análises físico-químicas. Os sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV), sólidos fixos (SF) e sólidos voláteis dissolvidos foram determinados pelos métodos gravimétricos, baseados na secagem, filtração e ignição da amostra (APHA, 2023). As Demandas Químicas de Oxigênio (DQOs) também foram determinadas de acordo com *Standard Methods* (APHA, 2023). O grau de solubilização da DQO foi calculado pela Equação (3), na qual DQO_{Si} é a demanda química de oxigênio solúvel antes do pré-tratamento, DQO_{Ti} é a demanda química de oxigênio total antes do pré-tratamento, DQO_{St} é a demanda química de oxigênio solúvel após o pré-tratamento (Park et al., 2017).

$$\text{solubilização da DQO} = \frac{DQO_{St} - DQO_{Si}}{DQO_{Ti} - DQO_{Si}} \quad (3)$$

As leituras de pH e CE foram realizadas com um pHmêtro e um condutivímetro de bancada. Para medir o pH das amostras sólidas (lodo) foram preparadas soluções aquosas de proporção 1:5 (massa:volume) e agitadas por 30 min (TEDESCO et al., 1995).

O Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK) foi determinado por meio da digestão das amostras com ácido sulfúrico, seguida da destilação utilizando o destilador de Kjeldahl e titulação com H_2SO_4 0,0025 mol (APHA, 2023).

O teor de lipídios foi obtido por extração contínua em aparelho do tipo Soxhlet usando o éter de petróleo como solvente extrator e quantificado por gravimetria (Cecchi, 1999). A proteína bruta foi estimada a partir do NTK como o produto do NTK e 6,25 (um fator de conversão de nitrogênio em proteína, FAO, 2002).

A determinação da composição do biogás foi realizada quinzenalmente por meio de cromatografia gasosa (Clarus 680, Perkin Elmer) com detector de condutividade térmica (TCD) e coluna empacotada Plot Q com comprimento de 30 metros e diâmetro interno de 0,32 milímetros. A vazão de 30 mL min⁻¹ de Hélio (He) foi utilizada como arraste. A calibração do cromatógrafo foi realizada com gás padrão de biogás contendo 2 ± 0,02% de oxigênio, 8 ± 0,1% de nitrogênio, 55 ± 1,0% de metano e 35 ± 0,7% de dióxido de carbono. A amostragem do biogás foi realizada em seringas de vidro próprias para gases.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

2.5 Análises estatísticas

O delineamento experimental aplicado tanto na primeira quanto na segunda fase foi inteiramente casualizado, com três repetições para cada tratamento. Os dados obtidos foram avaliados individualmente mediante medidas de tendência central e dispersão, bem como por análise de variância e teste de comparação múltipla de médias de Tukey com 5% de significância.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Efeito dos pré-tratamentos alcalinos no lodo de flotador

Os resultados apresentados na Tabela 1 evidenciam mudanças significativas nas propriedades físico-químicas do substrato após a aplicação de pré-tratamentos alcalinos. Tais alterações são determinantes para a eficiência da digestão anaeróbia em termos de solubilização de sólidos, liberação de nutrientes e modificações na composição orgânica do substrato.

Tabela 1 Características do LFAF antes e após a aplicação dos pré-tratamentos alcalinos utilizando KOH de 0,02 a 0,50 g / gVS_{substrato}.

Tratamento	pH	CE (mS/cm)	ST (%)	SV (%)	SF (%)	NTK (%)	PT (%SV)	LT (%SV)
Controle	7,19 ^e	2,9 ^e	10,1 ^c	91,4 ^a	8,6 ^d	5,7 ^a	35,8 ^a	22,8 ^a
KOH 0,02	7,34 ^d	5,1 ^d	10,8 ^c	90,4 ^a	9,6 ^d	5,1 ^b	31,9 ^b	23,0 ^a
KOH 0,05	9,50 ^c	5,2 ^d	10,3 ^c	87,3 ^a	12,7 ^c	4,9 ^{bc}	30,6 ^{bc}	20,4 ^a
KOH 0,15	10,57 ^b	18,4 ^c	10,5 ^c	77,4 ^b	22,6 ^b	4,7 ^{cd}	29,4 ^{cd}	9,7 ^b
KOH 0,25	10,66 ^b	38,7 ^b	11,8 ^b	65,7 ^c	34,3 ^b	4,4 ^d	27,5 ^d	6,7 ^c
KOH 0,50	12,73 ^a	74,7 ^a	13,5 ^a	49,3 ^d	50,7 ^a	3,6 ^e	22,5 ^e	4,4 ^d

CE: condutividade elétrica; ST: sólidos totais; SV: sólidos voláteis; NTK: nitrogênio total Kjeldahl; PT: proteína total; LT: lipídios totais. Teste de comparação múltipla de médias de Tukey ($p < 0,05$).
(média $\pm$ desvio padrão, $n = 3$)

O aumento do pH com o incremento das concentrações do alcalinizante era esperado, atingindo valores consideravelmente superiores ao controle (pH 7,19) e acima dos valores ideais recomendados para a digestão anaeróbia quando concentrações superiores a 0,02 g/gVS_{substrato} foram adicionadas. Os pré-tratamentos com KOH resultaram em elevações expressivas nos valores de pH (de 7,34 a 12,73). O KOH é classificado como monobase, isto é, possui um único radical OH⁻ na molécula e o seu grau de dissociação da ligação iônica (K_b) a 20 °C do KOH é de $3,16 \times 10^{-1}$ (SPOHRER; WYATT, 2020).

A condutividade elétrica (CE) também aumentou progressivamente com a concentração dos alcalinizantes, sendo significativamente maior nos tratamentos com 0,25 e 0,50 g/gVS de KOH. Esse aumento está relacionado à presença de íons K⁺ adicionados, além dos íons liberados a partir da degradação dos compostos presentes no lodo (MOUNEIMNE et al., 2003; DIAMANTIS et al., 2021).

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Embora a elevação da CE possa representar um fator inibitório para a atividade metanogênica em concentrações extremas por causar danos às membranas da célula microbiana, Baek et al. (2021) relataram desempenhos na produção de metano igualmente satisfatórios em condições de baixa (6,5 mS/cm) e alta (304 mS/cm) condutividade elétrica.

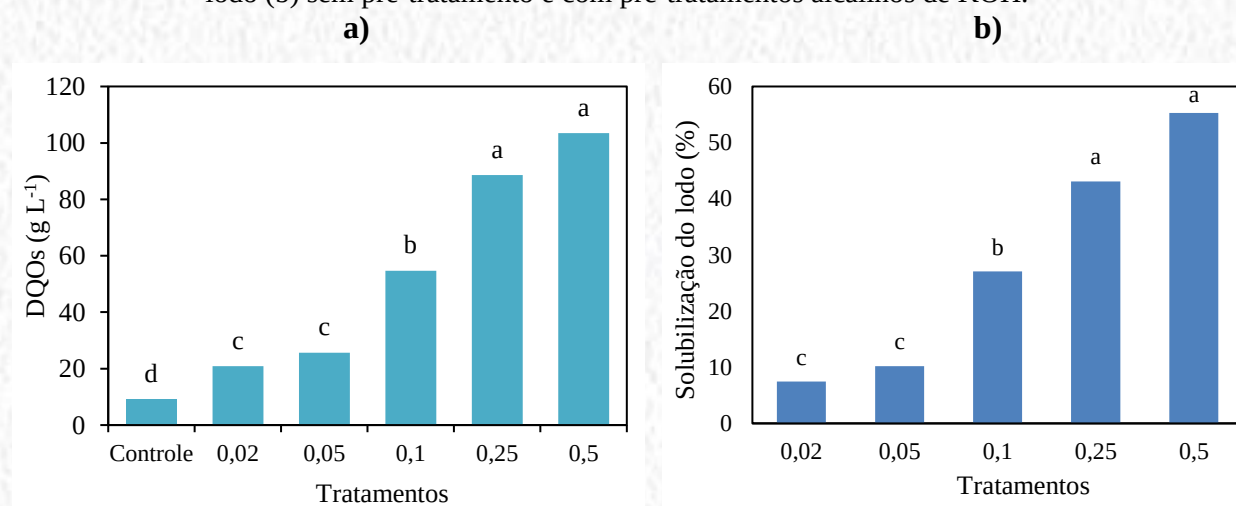
O aumento das concentrações de KOH aplicadas nos pré-tratamentos resultou em elevações progressivas nos teores de sólidos totais (ST) e, simultaneamente, em reduções nos teores de sólidos voláteis (SV), nitrogênio total Kjeldahl (NTK) e proteínas. No entanto, a interpretação direta desses parâmetros na matriz total pode ser limitada, uma vez que os reagentes alcalinos adicionados, de natureza mineral e não volátil, contribuem significativamente para o acréscimo de cinzas e para a diluição relativa dos constituintes orgânicos, como SV, NTK e proteínas.

Já o efeito dos pré-tratamentos alcalinos nos teores de lipídios foi observado na fração sólida. As concentrações de 0,15 a 0,5 g de KOH por g_{VSubstrato} resultaram em reduções expressivas no teor de lipídios em comparação com o controle (Tabela 1). Isso pode ser explicado pela reação de saponificação parcial, a qual quebra os triglicerídeos em gliceróis e sabão (ELALAMI et al., 2020).

3.2 Efeito dos pré-tratamentos alcalinos na solubilização do lodo

A simples avaliação da matriz sólida pode mascarar os reais efeitos dos pré-tratamentos sobre a desestruturação do lodo. Assim, a análise da fração líquida torna-se uma abordagem mais apropriada para elucidar os mecanismos de solubilização promovidos pelos álcalis, permitindo a mensuração mais precisa da liberação de compostos orgânicos e nitrogenados solúveis (GUO et al., 2022). Os pré-tratamentos exerceram efeitos significativos ($p < 0,05$) no aumento da concentração da DQOs, indicando efeito positivo na hidrólise química dos compostos orgânicos complexos presentes no LFAF (DIAMANTIS et al., 2021).

Figura 2 Concentrações de Demanda Química de Oxigênio Solúvel (DQOs) (a) e solubilização do lodo (b) sem pré-tratamento e com pré-tratamentos alcalinos de KOH.



Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Letras diferentes representam tratamentos estatisticamente diferentes (Tukey com $p < 0,05$).

A DQOs inicial do LFAF foi de $9,1 \pm 0,1 \text{ g L}^{-1}$ e subiu para $25,6 \text{ g L}^{-1}$, $25,8 \text{ g L}^{-1}$, $54,7 \text{ g L}^{-1}$, $95,3 \text{ g L}^{-1}$, $103,4 \text{ g L}^{-1}$, respectivamente (Figura 2a), quando o KOH foram adicionados em concentrações progressivas. Todos os pré-tratamentos utilizados aumentaram a DQOs do LFAF, sobretudo, nas concentrações a partir de $0,25 \text{ g}$ de KOH por g SV do substrato. Nessas concentrações a DQOs variou de $95,3$ a $103,4 \text{ g L}^{-1}$ e foram estatisticamente iguais ($p < 0,05$). Esse aumento significativo da DQOs do substrato, em parte, pode ser explicado pela reação entre a base e os ésteres de ácido graxo que resultam na produção de sais de ácidos graxos de cadeia longa (sabões) e glicerol. O hidrolisado resultante, além de altamente solúvel, é mais biodegradável devido à despolimerização de moléculas complexas e aumento da área de superfície para degradação microbiana (ARIAS et al., 2018).

Com o aumento da DQOs, observou-se melhores condições de solubilização do substrato, entre 7% a 55% nos tratamentos de KOH (Figura 2b). Cabe salientar que os resultados dos pré-tratamentos nas concentrações de $0,25$ e $0,50$ gramas de KOH foram estatisticamente iguais ($p < 0,05$) em relação à solubilização do lodo, revelando possibilidade de economia de reagentes e melhoria nos indicadores de aplicação desta estratégia em escala real. Resultados semelhantes foram relatados por Park et al. (2017) ao pré-tratarem lodo ativado de estação de tratamento de efluentes com NaOH até o pH 12, obtendo solubilização do substrato de até 58%, respectivamente. Lee e Han (2013) obtiveram solubilizações de 40, 37 e 15% de lodo ativado pré-tratado com NaOH, KOH e Ca(OH)_2 a 1 mol L^{-1} , respectivamente.

O melhor efeito de solubilização do LFAF foi observado nas concentrações de $0,25$ e $0,50 \text{ g/g}_{\text{SVsubstrato}}$. Além disso, os resultados obtidos nessas concentrações foram relativamente semelhantes, considerando que a concentração mássica foi dobrada. Isso permite a inferência de que pré-tratamentos mais severos em concentrações superiores a $0,50 \text{ g/g}_{\text{SVsubstrato}}$ não resultariam em solubilizações expressivas de constituintes do lodo, além de onerar a estratégia a ponto de inviabilizá-la economicamente (DIAMANTIS et al., 2021). Ademais, Park et al. (2017) relataram que altos teores de solubilização não significam, necessariamente, maiores produções de metano, visto que compostos intermediários potencialmente inibidores das atividades microbianas podem ser formados, tais como ácidos orgânicos de cadeia curta e longa em grandes concentrações.

3.3 Influência dos pré-tratamentos na produção de biogás e de metano

O pico de produção diária de biogás do substrato sem pré-tratamento foi de $57 \text{ mL}_N/\text{g}_{\text{SV}}$ no 10º dia de digestão, revelando a baixa biodegradabilidade do LFAF em razão dos elevados teores de proteína e lipídeo, quando comparados aos substratos ricos em carboidratos, com pico de produção diária geralmente nos primeiros 5 dias de digestão (Figura 3). Já o volume acumulado de biogás do controle foi de $569 \text{ mL}_N/\text{g}_{\text{SV}}$ com T_{90} (tempo demandado para alcançar 90% da produção de biogás total) foi atingido após 23 dias de incubação. Damaceno et al. (2022) relataram uma produção de biogás semelhante de $576 \text{ mL}_N/\text{g}_{\text{SV}}$ para o mesmo tipo de substrato.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700

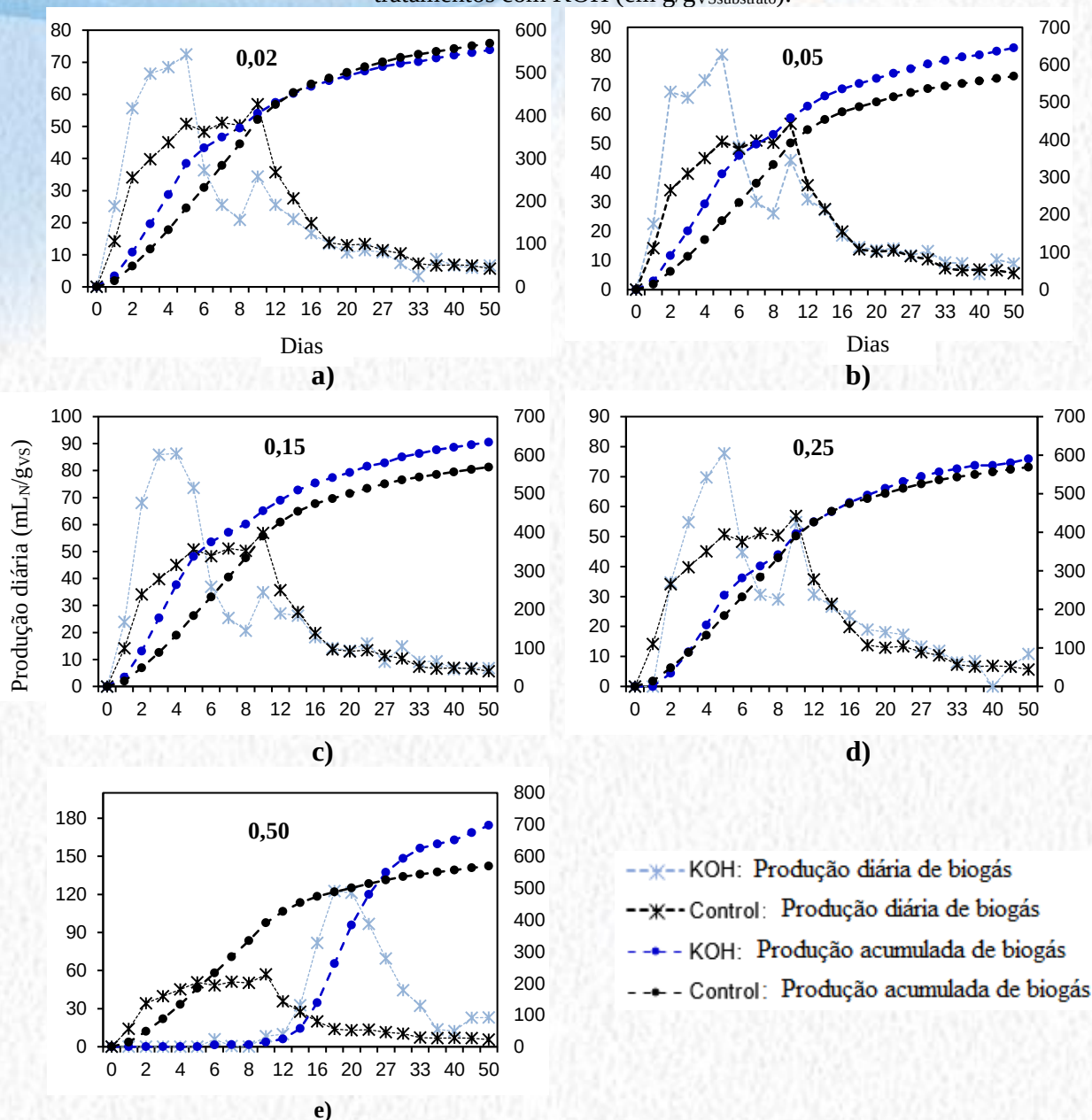


abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Figura 3 Produções diárias e acumuladas de biogás do LFAF não tratado (controle) e dos pré-tratamentos com KOH (em g/gvSubstrato).



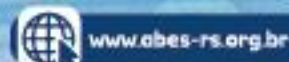
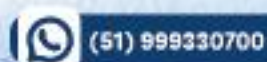
Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



Todos os pré-tratamentos com adição de KOH resultaram em antecipação do pico de produção de biogás em relação ao controle de 10 para 4-5 dias, exceto o pré-tratamento cuja concentração foi de 0,50 g_{KOH}/g_{VSubstrato}. Os picos de produção diária de biogás para os pré-tratamentos de 0,02, 0,05, 0,15, 0,25 e 0,50 g_{KOH}/g_{VSubstrato} ocorreram no 5º, 5º, 4º, 5º e 18º dia e foram de 73, 81, 86, 78 e 123 mL_N/g_{Vs} e as produções acumuladas foram 554, 645, 634, 591 e 698 mL_N/g_{Vs}, respectivamente. O T₉₀ do pré-tratamento 0,50 g_{KOH}/g_{VSubstrato} ocorreu aos 40 dias de teste enquanto os demais pré-tratamentos com KOH ocorreram entre 20 e 23 dias. O K⁺ pode ser a razão de atrasos, pois, apesar de ele ser um cátion essencial para regular a pressão osmótica intracelular, em concentrações elevadas, podem induzir o efluxo de K⁺ das células, causando desequilíbrio da pressão osmótica e, finalmente, lise e morte celular (HOU et al., 2021). Zhang et al. (2015) e Gagliano et al. (2017) pontuaram que o K⁺ como um osmólito alternativo favorável nas células pode ser transportado através do sistema único de bomba de potássio na membrana celular, atenuando efeitos adversos de resíduos altamente salinos (mais de 20 g L⁻¹ de Na⁺). Portanto, pesquisas futuras utilizando pré-tratamentos combinando NaOH com KOH podem ser elucidativos nesse aspecto.

Na Tabela 2 são apresentados os resultados de produção acumulada de biogás, teor de metano no biogás, produção acumulada de metano e efeito dos pré-tratamentos em relação ao controle. Quando se compara todas as concentrações de pré-tratamentos com KOH, o pré-tratamento 0,50 g_{KOH}/g_{VSubstrato} destacou-se com a maior produção de biogás (697,6 mL_N/g_{Vs}), apesar de ter levado praticamente o dobro do tempo para atingir o T₉₀ quando comparado com os demais tratamentos.

Tabela 2 Produção acumulada de biogás, teor de metano no biogás, produção acumulada de metano e efeito dos pré-tratamentos em relação ao controle.

Tratamento	Produção de biogás (mL _N /g _{Vs})	Teor de CH ₄ (%)	Produção de CH ₄ (mL _N /g _{Vs})	Variação da produção de CH ₄ em relação ao controle (%)	Efeito
Controle	569,2 ^d	65,8 ^c	374,4 ^c	-	-
KOH 0,02	553,8 ^d	64,7 ^c	358,0 ^c	-4,4	antagônico
KOH 0,05	645,0 ^b	65,2 ^c	420,8 ^{bc}	+12,4	sinérgico
KOH 0,15	633,9 ^{bc}	66,1 ^c	418,8 ^{bc}	+11,9	sinérgico
KOH 0,25	590,7 ^c	68,9 ^b	407,2 ^{bc}	+8,8	sinérgico
KOH 0,50	697,6 ^a	82,2 ^a	573,5 ^a	+53,2	sinérgico

Os maiores teores de metano foram obtidos nos pré-tratamentos 0,50 g_{KOH}/g_{VSubstrato} (82,2%), destacando-se do controle (65,8%). De modo geral, o teor de metano nos tratamentos apresentou uma tendência de aumento conforme a concentração da base foi maior (Tabela 2). Isso pode ser explicado pela elevação do pH e fornecimento da alcalinidade ao sistema, o que atribui maior estabilidade à atividade metanogênica e menor formação de CO₂ livre devido à sua conversão em metano (HOU et al., 2021). Li et al. (2017) realizaram pré-tratamento de lodo de esgoto com Ca(OH)₂, até pH 10, em escala piloto e relataram teores de metano de 75,4% no biogás. Os elevados teores de metano, provocados pelos pré-tratamentos alcalinos, podem melhorar potencialmente o

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

aproveitamento energético do biogás (Liu et al., 2021). Os elevados teores de metano nos tratamentos supracitados fizeram que os volumes de metano também se destacassem. Com a produção de aproximadamente 573 mL_N/g_{VS} do pré-tratamento 0,50 g_{KOH}/g_{VSsubtrato}, observou-se um efeito sinérgico de 53,2% sobre o controle.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de KOH como agente de pré-tratamento mostrou-se eficiente na solubilização do LFAF e no aumento da produção de metano, especialmente em concentrações mais elevadas (0,25 e 0,50 g_{KOH}/g_{VSsubtrato}).

Contudo, deve-se considerar o equilíbrio entre ganhos energéticos e possíveis efeitos inibitórios e operacionais. Concentrações intermediárias podem representar uma alternativa mais viável sob a perspectiva técnico-econômica.

O estudo reforça o potencial da digestão anaeróbia como rota sustentável para o aproveitamento de resíduos da indústria avícola, contribuindo para a economia circular e mitigação de impactos ambientais.

REFERÊNCIAS

ABPA, Associação Brasileira de Proteína Animal. **Relatório anual de 2024**. Associação Brasileira de Proteína Animal, São Paulo, 2025.

ALQARALLEH R.M., KENNEDY K., DELATOLLA R. Microwave vs. alkaline-microwave pretreatment for enhancing thickened waste activated sludge and fat, oil, and grease solubilization, degradation and biogas production, **Journal of Environmental Management**, v.1, 2019, p.378-392.

APHA, American Public Health Association. **Standard methods for the examination of water and wastewater**, Washington, American Water Works Association, 24 ed., 2023.

ARIAS, J. Z.; REUTER, T.; SABIR, A.; GILROYED, B. H. Ambient alkaline hydrolysis and anaerobic digestion as a mortality management strategy for whole poultry carcasses, **Waste Management**, v.81, 2018, p.71-77.

BAEK, G.; ROSSI, R.; SAIKALY, P. E.; LOGAN, B. E. The impact of different types of high surface area brush fibers with different electrical conductivity and biocompatibility on the rates of methane generation in anaerobic Digestion. **Science of The Total Environment**, v.787, n.15 2021, 147683.

Bastos, J.A.; Remor, P.V.; Alino, J.H.L.; Frare, L.M.; Lofhagen, J.C.P.; Edwiges, T. Hydrolysate recycling improves economic feasibility of alkaline pretreatment for bioenergy production, **Journal of Environmental Chemical Engineering**, Volume 9, Issue 5, 2021, 105935, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105935>.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

CECCHI, H. M. **Theoretical and practical fundamentals in food analysis**, Campinas, UNICAMP, 1999.

CUETOS, M. J.; MARTINEZ, E. J.; MORENO, R.; GONZALEZ, R.; OTERO, M.; GOMEZ, X. Enhancing anaerobic digestion of poultry blood using activated carbon. **Journal of Advanced Research**, v.8, n.3, p.297-307, 2017.

Damaceno, F.M.; Bastos, J.A.; Alino, J.H.L.; Remor, P.V.; Costa, M.S.S.M.; Edwiges, T. Effect of thermal, alkaline, and thermal-alkaline pretreatments on the anaerobic digestion of poultry slaughterhouse waste. **Environmental Engineering and Management Journal**, May 2022, Vol. 21, No. 5, 727-735.

Damaceno, F.M.; Buligon, E.L.; Restrepo, J.C.P.S.; Chiarello, M.; Niedzialkoski, R.K.; Costa, L.A.M. Lucas Junior J., Costa, M.S.S.M. Semi-continuous anaerobic co-digestion of flotation sludge from broiler chicken slaughter and sweet potato: Nutrients and energy recovery. **Science of The Total Environment**, Volume 683, 2019, Pages 773-781, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.314>.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from waste and renewable resources**. Weinheim: Wiley-VCH, 2011. 450 p.

DIAMANTIS, V.; EFTAXIAS, A.; STAMATELATOU, K.; NOUTSOPOULOS, C.; VLACHOKOSTAS, C.; AIVASIDI, A. Bioenergy in the era of circular economy: Anaerobic Digestion technological solutions to produce biogas from lipid rich wastes, **Renewable Energy**, v.168, 2021, p.438-447

EDWIGES T., FRARE L., MAYERA B., LINS L., TRILO J. M., FLOTATS X., COSTA M.S.S.M. Influence of chemical composition on biochemical methane potential of fruit and vegetable waste, **Waste Management**, v.71, 2018, p.618-625.

Edwiges, R.; Bastos, J. A.; Alino, J. H.L.; D'avila, L.; Frare, L.M.; Somer, J.G. Comparison of various pretreatment techniques to enhance biodegradability of lignocellulosic biomass for methane production, **Journal of Environmental Chemical Engineering**, Volume 7, Issue 6, 2019, 103495, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103495>.

ELALAMI, D.; CARRERE, H.; ABDELOUAHDI, K.; GARCIA-BERNET, D.; PEYDECASTAING, J.; VACA-MEDINA, G.; OUKARROUM, A.; ZEROUAL, Y.; BARAKAT, A. Mild microwaves, ultrasonic and alkaline pretreatments for improving methane production: Impact on biochemical and structural properties of olive pomace. **Bioresource Technology**, v.299, 2020, 122591.

FAO, (2002), Food and Nutrition Paper 77: Food Energy, In: Methods of Analysis and Conversion, Factors, Food and agriculture organization of the united nations, Rome, On line at:

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

https://www.sennutricion.org/media/Docs_Consenso/Food_energy_methods_of_analysis_and_conversion_factors-FAO_2002.pdf

Gagliano, M.C.; Ismail, S.B.; Stams, A.J.M.; Plugge, C.M.; Temmink, H.; Van Lier, J.B. Biofilm formation and granule properties in anaerobic digestion at high salinity. **Water Research**, Volume 121, 2017, Pages 61-71, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.05.016>.

GOODING C.H., MEEKER D.L., (2016), Review: Comparison of 3 alternatives for large-scale processing of animal carcasses and meat by-products, **The Professional Animal Scientist**, 32, 259-270.

GUO, G.; LI, Y.; ZHOU, S.; CHEN, Y.; QIN, Y.; LI, Y.-Y. Enhanced degradation and biogas production of waste activated sludge by a high-solid anaerobic membrane bioreactor together with in pipe thermal pretreatment process. **Bioresource Technology**, v.346 2022, 126583.

HOLLIGER, C.; ALVES, M.; ANDRADE, D.; ANGELIDAKI, I.; ASTALS, S.; BAIER, U.; BOUGRIER, C.; BUFFIÈRE, P.; CARBALLA, M.; WILDE, V. DE; EBERTSEDER, F.; FERNÁNDEZ, B.; E. FICARA, I. FOTIDIS, J.-C. FRIGON, H.F. DE LACLOS, D.S.M. GHASIMI, G. HACK, M. HARTEL, I. WIERINCK. Towards a standardization of biomethane potential tests, **Water Sci. Technol.**, 74, 2016, p. 2515-2522.

HOU, T.; ZHAO, J.; LEI, Z.; SHIMIZU, K.; ZHANG, Z. Supplementation of KOH to improve salt tolerance of methanogenesis in the two-stage anaerobic digestion of food waste using pre-acclimated anaerobically digested sludge by air-nanobubble water. **Bioresource Technology**, 2021, 126360

Kowthaman, C.N.; Selvan, V. A. M.; Kumar, P. S. Optimization strategies of alkaline thermochemical pretreatment for the enhancement of biogas production from de-oiled algae. **Fuel**, Volume 303, 2021, 121242, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121242>.

LEE, I.; HAN, J.-I. The effects of waste-activated sludge pretreatment using hydrodynamic cavitation for methane production, **Ultrasonics Sonochemistry**, v.20, n.6, 2013, p.1450-1455.

LI, C.; WANG, X.; ZHANG, G.; YU, G.; LIN, J.; WANG, Y. Hydrothermal and alkaline hydrothermal pretreatments plus anaerobic digestion of sewage sludge for dewatering and biogas production: Bench-scale research and pilot-scale verification. **Water Research**, v.117, 2017, p.49-57.

LI, H.; LI, C.; LIU, W.; ZOU, S. Optimized alkaline pretreatment of sludge before anaerobic Digestion. **Bioresource Technology**, v.123, p. 189-194, 2012.

LIU, H.; LI, X.; ZHANG, Z.; NGHIEM, L. D.; GAO, L.; WANG, Q. Semi-continuous anaerobic digestion of secondary sludge with free ammonia pretreatment: Focusing on volatile solids

Realização



Correalizadores



Apoio Institucional



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

destruction, dewaterability, pathogen removal and its implications. **Water Research**, v.202, n.1, 2021, 117481.

LIU, X.; WANG, Q.; TANG, Y.; PAVLOSTATHIS, S.G. Hydrothermal pretreatment of sewage sludge for enhanced anaerobic digestion: Resource transformation and energy balance. **Chemical Engineering Journal**, v.410, 2021, 127430.

Machhirake, N.; Singh, D.; Yadav, B.R.; Tembhare, M.; Kumar, S. Optimizing alkali-pretreatment dosage for waste-activated sludge disintegration and enhanced biogas production yield. **Environmental Research**, Volume 252, Part 2, 2024, 118876, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118876>.

MOUNEIMNE, A. H.; CARRÈRE, H.; BERNET, N.; DELGENÈS, J. P. Effect of saponification on the anaerobic digestion of solid fatty residues. **Bioresource Technology**, v.90, n.1, p. 89-94, 2003.

PARK, S.; YOON, Y.-M.; HAN, S. K.; KIM, D.; KIM, H. Effect of hydrothermal pre-treatment (HTP) on poultry slaughterhouse waste (PSW) sludge for the enhancement of the solubilization, physical properties, and biogas production through anaerobic digestion. **Waste Management**, v.64, p. 327-332, 2017.

SPOHRER, C.; WYATT, Z. **Polyprotic Acids & Bases**. LibreTexts libraries, 2020. Acessado em: 25/01/22. Disponível em: <[https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_\(Physical_and_Theoretical_Chemistry\)/Acids_and_Bases/Monoprotic_Versus_Polyprotic_Acids_And_Bases/Polyprotic_Acids_and_Bases_1](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Acids_and_Bases/Monoprotic_Versus_Polyprotic_Acids_And_Bases/Polyprotic_Acids_and_Bases_1)>.

STRÖMBERG, S.; NISTOR, M.; LIU, J. Towards eliminating systematic errors caused by the experimental conditions in Biochemical Methane Potential (BMP) tests. **Waste Management**, v. 34, p. 1939-1948, 2014.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; WOLKWEISS, S. J. **Analysis of soil, plants and other materials**, UFRS, Porto Alegre, 2rd ed., 1995.

WAN, C.; ZHOU, Q.; FU, G.; LI, Y. Semi-continuous anaerobic co-digestion of thickened waste activated sludge and fat, oil and grease. **Waste Management**, v.31, n.8, p. 1752-1758, 2011.

WANG SHUNLI; UMAKANTA JENA; KESHAV C. DAS. Biomethane production potential of slaughterhouse waste in the United States. **Energy Conversion and Management**, v. 173, p. 143-157, 2018.

Yin, Z.; Wang, J.; Wang, M.; Liu, J.; Chen, Z.; Yang, B.; Zhu, L.; Yuan, R.; Zhou, B.; Chen, H. Application and improvement methods of sludge alkaline fermentation liquid as a carbon source for

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

biological nutrient removal: A review. **Science of The Total Environment**, Volume 873, 2023, 162341. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162341>.

ZHANG, S.; GUO, H.; DU, L.; LIANG, J.; LU, X.; LI, N.; ZHANG, K. Influence of NaOH and thermal pretreatment on dewatered activated sludge solubilisation and subsequent anaerobic digestion: focused on high-solid state. **Bioresource Technology**, v.185, 2015, p. 171-177.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



PUCRS



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br