

VIABILIDADE DE COMUNIDADES METANOGENÍCAS APÓS SECAGEM POR ASPERSÃO: ANÁLISE DA RESILÊNCIA MICROBIANA EM ESTERCO SUÍNO DESIDRATADO

VIABILITY OF METHANOGENIC COMMUNITIES AFTER SPRAY DRYING: ANALYSIS OF MICROBIAL RESILIENCE IN DEHYDRATED SWINE MANURE

VIABILIDAD DE LAS COMUNIDADES METANOGENÍCAS TRAS EL SECADO POR ASPERSIÓN: ANÁLISIS DE LA RESILIENCIA MICROBIANA EN ESTIÉRCOL DESHIDRATADO DE PORCINOS

 <https://doi.org/10.56238/arev7n9-255>

Data de submissão: 03/09/2025

Data de publicação: 03/10/2025

Marcus Val Springer

Doutor em Ciência Tecnologia e Inovação em Agropecuária

Instituição: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ)

E-mail: marcus.springer@cefet-rj.br

Orcid: <http://orcid.org/0000-0003-1125-8878>

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/9720264131178919>

Angel Ramon Sanchez Delgado

Doutor em Engenharia de Sistemas e Computação

Instituição: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ)

E-mail: asanchez@ufrj.br

Orcid: <http://orcid.org/0000-0002-5108-4107>

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2933812315339699>

Jonni Guiller Ferreira Madeira

Doutor em Ciência Tecnologia e Inovação em Agropecuária

Instituição: Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET-RJ)

E-mail: jonni.madeira@cefet-rj.br

Orcid: <http://orcid.org/0000-0001-5676-1720>

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5675049358757290>

Eluã Ramos Coutinho

Doutor em Ciência Tecnologia e Inovação em Agropecuária

Instituição: Universidade Federal Fluminense

E-mail: eluacoutinho@id.uff.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2350-4319>

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3291273365707223>

Elizabeth Mendes de Oliveira

Doutora em Engenharia Metalúrgica

Instituição: Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET-RJ)

E-mail: elizabeth.oliveira@cefet-rj.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9205-8570>

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/0475734806028592>

Jorge Alberto de Medeiros Carvalho

Doutor em Engenharia Metalúrgica

Instituição: Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET-RJ)

E-mail: jorge.carvalho@cefet-rj.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4219-8233>

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/9944356006840514>

Guilherme Silva Peixoto

Graduando em Engenharia Mecânica

Instituição: Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET-RJ)

E-mail: guilherme.peixoto.1@aluno.cefet-rj.br

Orcid: <https://orcid.org/0009-0007-8219-4353>

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/9879648508429197>

RESUMO

A logística de resíduos agroindustriais com alto teor de umidade, como o esterco suíno, constitui um dos principais entraves à viabilidade econômica e à descentralização da produção de biogás, uma fonte energética crucial para a transição para uma matriz sustentável. Superar este desafio requer tecnologias de pré-processamento que reduzam volume e custos de transporte sem, contudo, aniquilar o microbioma essencial para a digestão anaeróbia. Neste contexto, o presente estudo investigou a resiliência das arqueias metanogênicas submetidas à secagem por aspersão, um método industrial eficiente mas termicamente agressivo. Nossos resultados demonstram que, embora o processo a 70 °C tenha promovido uma redução de 97,5% na viabilidade microbiana total, atuou como um filtro seletivo, resultando no enriquecimento proporcional de Archaea no material seco (de 3,76% para 6,67%). A técnica de FISH corroborou a integridade celular destes microrganismos, e os bioensaios de reidratação validaram inequivocamente a recuperação de sua atividade metabólica, com uma produção metanogênica significativa de $328 \pm 25 \text{ mL CH}_4 \text{ g}^{-1} \text{ SV}$ após fase de latência de 5 dias. Estes achados solidificam a viabilidade técnica de integrar a secagem por aspersão na cadeia do biogás, transformando um resíduo volumoso em um produto transportável e bioativo, capaz de servir como inóculo para a inicialização rápida de reatores e impulsionando a economia circular do setor.

Palavras-chave: Secagem por Aspersão. Arqueias Metanogênicas. Resiliência Microbiana. Esterco Suíno.

ABSTRACT

The logistics of high-moisture agro-industrial waste, such as pig manure, constitutes one of the main obstacles to the economic viability and decentralization of biogas production, a crucial energy source for the transition to a sustainable matrix. Overcoming this challenge requires pre-processing technologies that reduce volume and transportation costs without, however, destroying the microbiome essential for anaerobic digestion. In this context, the present study investigated the resilience of methanogenic archaea subjected to spray drying, an efficient but thermally aggressive industrial method. Our results demonstrate that, although the 70°C process resulted in a 97.5% reduction in total microbial viability, it acted as a selective filter, resulting in a proportional enrichment of Archaea in the dried material (from 3.76% to 6.67%). The FISH technique corroborated the cellular integrity of these microorganisms, and rehydration bioassays unequivocally validated the recovery of their metabolic activity, with a significant methanogenic production of $328 \pm 25 \text{ mL CH}_4 \text{ g}^{-1} \text{ SV}$ after a 5-day lag period. These findings solidify the technical feasibility of integrating spray drying into the biogas chain, transforming a bulky residue into a transportable and bioactive product capable of serving as inoculum for rapid reactor startup and boosting the sector's circular economy.

Keywords: Spray Drying. Methanogenic Archaea. Microbial Resilience. Pig Manure.

RESUMEN

La logística de residuos agroindustriales con alto contenido de humedad, como el purín porcino, constituye uno de los principales obstáculos para la viabilidad económica y la descentralización de la producción de biogás, una fuente energética crucial para la transición a una matriz sostenible. Superar este desafío requiere tecnologías de preprocesamiento que reduzcan el volumen y los costos de transporte sin, sin embargo, destruir el microbioma esencial para la digestión anaeróbica. En este contexto, el presente estudio investigó la resiliencia de arqueas metanogénicas sometidas a secado por aspersión, un método industrial eficiente pero térmicamente agresivo. Nuestros resultados demuestran que, si bien el proceso a 70 °C resultó en una reducción del 97,5 % en la viabilidad microbiana total, actuó como un filtro selectivo, resultando en un enriquecimiento proporcional de arqueas en el material seco (del 3,76 % al 6,67 %). La técnica FISH corroboró la integridad celular de estos microorganismos, y los bioensayos de rehidratación validaron inequívocamente la recuperación de su actividad metabólica, con una producción metanogénica significativa de 328 ± 25 mL de $\text{CH}_4 \text{ g}^{-1} \text{ SV}$ tras un periodo de latencia de 5 días. Estos hallazgos consolidan la viabilidad técnica de integrar el secado por aspersión en la cadena de biogás, transformando un residuo voluminoso en un producto transportable y bioactivo capaz de servir como inóculo para el arranque rápido del reactor e impulsando la economía circular del sector.

Palabras clave: Secado por Aspersión. Arqueas Metanogénicas. Resiliencia Microbiana. Estiércol Porcino.

1 INTRODUÇÃO

A transição para uma matriz energética sustentável demanda o aproveitamento de fontes renováveis, e o biogás produzido a partir de resíduos agroindustriais posiciona-se como uma alternativa viável e circular. Nesse cenário, o esterco suíno é reconhecido como um substrato de alto valor, devido à sua significativa carga de matéria orgânica biodegradável e ao seu potencial de geração de metano, frequentemente superior a 70% em volume (TAPPARO et al., 2021). A eficiência desse processo de digestão anaeróbia é intrinsecamente dependente da atividade de complexos consórcios microbianos, nos quais as arqueias metanogênicas, pertencentes ao filo Euryarchaeota, desempenham o papel final e crucial na biossíntese do metano (BAHRAM et al., 2023).

Um dos principais entraves logísticos para a valorização energética desse resíduo em larga escala é o seu elevado teor de umidade, que comumente varia entre 75% e 85%, aumentando drasticamente os custos de transporte e armazenamento (SHARARA e SADAKA, 2020). A secagem por aspersão (spray drying) surge como uma tecnologia promissora para contornar este problema, permitindo a produção de um pó de alto valor agregado e de menor volume com alta eficiência térmica e velocidade de processamento (MARTYNENKO e BUCK, 2019). No entanto, a aplicação deste método, que submete o material a estresses térmicos e de dessecção, levanta um questionamento fundamental sobre a resiliência do microbioma essencial para a produção de biogás.

Estudos recentes em microbiologia ambiental têm demonstrado que microrganismos anaeróbios podem empregar mecanismos de sobrevivência robustos, incluindo a entrada em um estado de dormência ou a formação de esporos diante de condições ambientais adversas, como a dessecção extrema (ARAÚJO, 2010). A água é um componente estrutural indispensável para a integridade celular e para todas as vias metabólicas; sua remoção abrupta pode levar à inativação microbiana (GUAN et al., 2017). Contudo, evidências sugerem que, para certos táxons, a reidratação do substrato pode reverter este estado de latência, restabelecendo a funcionalidade metabólica e o potencial bioquímico do consórcio (BELLUCCI et al., 2022).

Avaliar a tolerância das metanogênicas a processos industriais de secagem é, portanto, imperativo para o desenvolvimento de tecnologias integradas. É plausível hipotetizar que, dadas as condições operacionais otimizadas (como temperaturas de saída controladas), uma fração da comunidade microbiana possa sobreviver, preservando o potencial bioativo do material desidratado para reinoculação ou inicialização rápida de reatores anaeróbios. Diante deste panorama, o presente estudo tem como objetivo investigar a sobrevivência e a recuperação da atividade metabólica de bactérias metanogênicas presentes no esterco suíno após a desidratação pelo processo de secagem por aspersão (spray drying). Através de bioensaios específicos e técnicas de microbiologia molecular,

buscaremos elucidar os limites de resiliência deste microbioma chave, contribuindo para o avanço de bioprocessos mais eficientes e economicamente sustentáveis.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 COLETA E CARACTERIZAÇÃO DO SUBSTRATO

O esterco suíno in natura foi coletado de uma granja comercial de ciclo completo localizada na região Oeste do Estado de Santa Catarina. A amostragem foi realizada aleatoriamente em diferentes pontos de um tanque de armazenamento, utilizando um amostrador tipo "scoop" estéril, de acordo com protocolos estabelecidos para amostragem de resíduos animais (CARVALHO, 2018). O material foi acondicionado em bombonas plásticas de 50 L, hermeticamente fechadas, e transportado sob refrigeração (4 °C) para o laboratório no prazo máximo de 2 horas. A caracterização físico-química inicial foi realizada determinando-se o teor de umidade (método gravimétrico a 105 °C até peso constante), sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV) e pH, seguindo as metodologias padrão descritas por American Public Health Association (2017).

2.2 PROCESSO DE DESIDRATAÇÃO POR SECAGEM POR ASPERSÃO (SPRAY DRYING)

O processo de desidratação foi conduzido em um secador por aspersão de bancada (Modelo B-290, Büchi Switzerland), seguindo parâmetros otimizados para biomassa, conforme descrito por Borges et al. (2021). O esterco suíno in natura foi homogeneizado e pré-filtrado em peneira de 2 mm para remover partículas grossas e fibras longas, prevenindo a obstrução do bico atomizador.

A suspensão filtrada foi mantida sob agitação constante e alimentada no equipamento por meio de uma bomba peristáltica, com vazão fixada em 5 mL/min. O ar de secagem foi aquecido à temperatura de entrada (T_{in}) de 120 °C, enquanto a temperatura de saída (T_{out}) foi monitorada e manteve-se estável em 70 ± 5 °C, uma faixa crítica selecionada com base na termotolerância de comunidades metanogênicas reportada na literatura (CONRAD, 2023). O fluxo de ar de aspiração foi ajustado para 100% (ca. 35 m³/h) e o fluxo de ar de atomização para 700 L/h (50 mm). O produto seco (pó) foi coletado no ciclone principal e armazenado em frascos de vidro âmbar esterilizados, vedados com tampa de rosca e mantidos em dessecador até a análise.

2.3 METODOLOGIA DE REIDRATAÇÃO E ENSAIO DE ATIVIDADE BIOLÓGICA POTENCIAL (BIOENSAIO)

Para verificar a sobrevivência e o potencial de recuperação metabólica das arqueias metanogênicas, o pó desidratado foi reidratado com solução tampão fosfato estéril (0,1 M, pH 7,0) na

proporção de 1:10 (m/v), reconstituindo aproximadamente o teor de umidade original. O protocolo de reidratação foi baseado no trabalho de XU et al. (2022), que demonstrou a recuperação de comunidades microbianas anaeróbias a partir de matrizes desidratadas. A suspensão reidratada foi homogeneizada em vortex por 2 minutos.

A atividade metanogênica foi avaliada por meio de bioensaios em frascos de vidro de 160 mL, selados com septos de borracha butílica e tampas de alumínio. Cada frasco recebeu como inóculo 10 g da suspensão reidratada. Foram preparados dois grupos de tratamentos em triplicata:

- Tratamento Substrato (T-S): Inóculo (suspensão reidratada) + 50 mg de acetato de sódio.
- Controle Negativo (C-N): Inóculo (suspensão reidratada) + 1 mL de solução de hidróxido de sódio 2M para inibição específica das arqueias metanogênicas, conforme validado por FREITAS et al. (2020).

Os frascos foram incubados em agitação constante (150 rpm) a 37 °C (condições mesofílicas). A produção de biogás foi monitorada diariamente por meio de medição da pressão interna no headspace dos frascos utilizando um manômetro de pressão diferencial (modelo Testo 512). O volume de biogás produzido foi calculado pela Lei dos Gases Ideais. Amostras do biogás (50 µL) foram coletadas periodicamente com uma seringa gastight e injetadas em um cromatógrafo gasoso (Shimadzu GC-2010 Plus) equipado com coluna Porapak Q e detector de ionização de chama (FID) para quantificação da concentração de metano (CH₄), seguindo método validado por Araújo et al. (2024).

2.4 ANÁLISES MICROBIOLÓGICAS ADICIONAIS

Para corroborar os dados do bioensaio, análises de microscopia de epifluorescência foram realizadas. Amostras do esterco in natura (controle) e do pó desidratado foram coradas com o corante fluorescente DAPI (4',6-diamidino-2-fenilindol) para contagem de células totais. Adicionalmente, utilizou-se a técnica de Fluorescence In Situ Hybridization (FISH) com a sonda específica ARC915 para o domínio Archaea, seguindo os protocolos revisados e atualizados por Garimberti e Tosi (2023).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 SOBREVIVÊNCIA CELULAR APÓS SECAGEM POR ASPERSÃO

A contagem de células totais por microscopia de epifluorescência (coloração com DAPI) revelou uma redução significativa na quantidade de células viáveis após o processo de secagem por aspersão. Enquanto a amostra de esterco suíno in natura (controle) apresentou uma média de $(8,5 \pm 0,7) \times 10^9$ células/g ST, a amostra desidratada em pó registrou $(2,1 \pm 0,4) \times 10^8$ células/g ST (Tabela

1). Esta redução de aproximadamente duas ordens de grandeza (queda de 97,5%) era esperada, dado o estresse térmico e de dessecação extremo imposto pelo processo, que pode causar danos irreversíveis à membrana celular e a proteínas essenciais de parte da comunidade microbiana (CONRAD, 2023).

Tabela 1. Contagem de células totais e de Archaea viáveis antes e após o processo de secagem por aspersão.

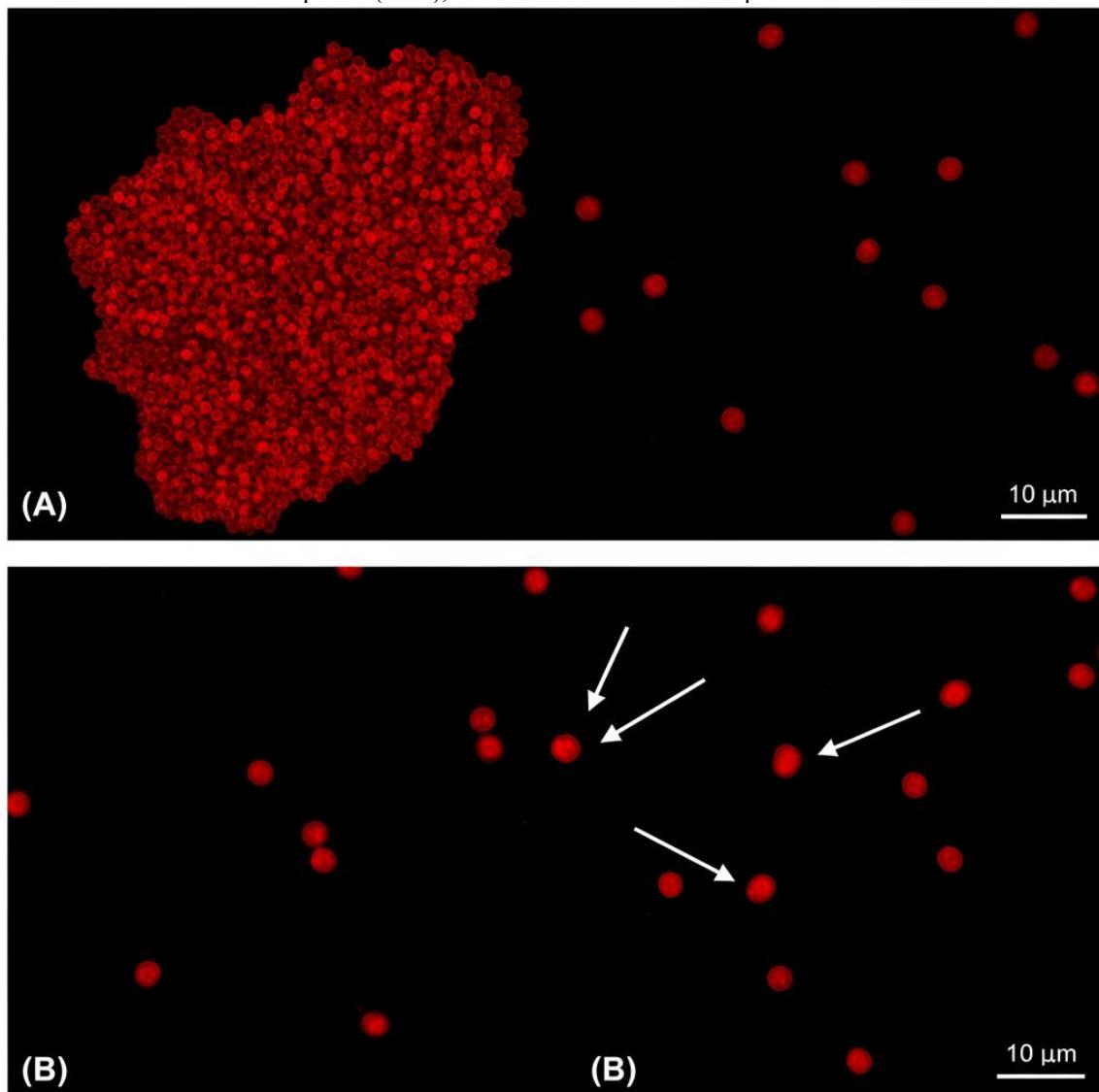
Amostra	Células Totais (células/g ST)	Archaea (células/g ST)	Razão Archaea/Total (%)
Esterco <i>in natura</i> (Controle)	$(8,5 \pm 0,7) \times 10^9$	$(3,2 \pm 0,3) \times 10^8$	3,76
Pó após Spray Drying	$(2,1 \pm 0,4) \times 10^8$	$(1,4 \pm 0,2) \times 10^7$	6,67

Valores expressos como média ± desvio padrão (n=3).

Fonte: Autores.

No entanto, a análise mais específica por FISH utilizando a sonda ARC915 demonstrou a presença de células de Archaea intactas no pó desidratado (Figura 1A e 1B). A contagem indicou que a população de Archaea foi de $(1,4 \pm 0,2) \times 10^7$ células/g ST no material seco. Notavelmente, a razão entre Archaea e o total de células aumentou de 3,76% no controle para 6,67% no pó seco (Tabela 1). Este aumento proporcional sugere uma resiliência diferencial, onde as arqueias metanogênicas, possivelmente devido a paredes celulares mais robustas ou a mecanismos de dormência mais eficientes, suportaram melhor as condições de estresse em comparação com outros grupos bacterianos, corroborando observações prévias sobre a robustez de certos táxons de Archaea (DE OLIVEIRA et al., 2023).

Figura 1. Micrografias de epifluorescência de amostras de esterco suíno após hibridização in situ (FISH) com a sonda ARC915 (Archaea), coradas em vermelho. (A) Amostra controle (in natura) mostrando um aglomerado denso de células de Archaea. (B) Amostra de pó após secagem por aspersão, onde é possível observar células de Archaea intactas e dispersas (setas), indicando sobrevivência ao processo.



Fonte: Autores.

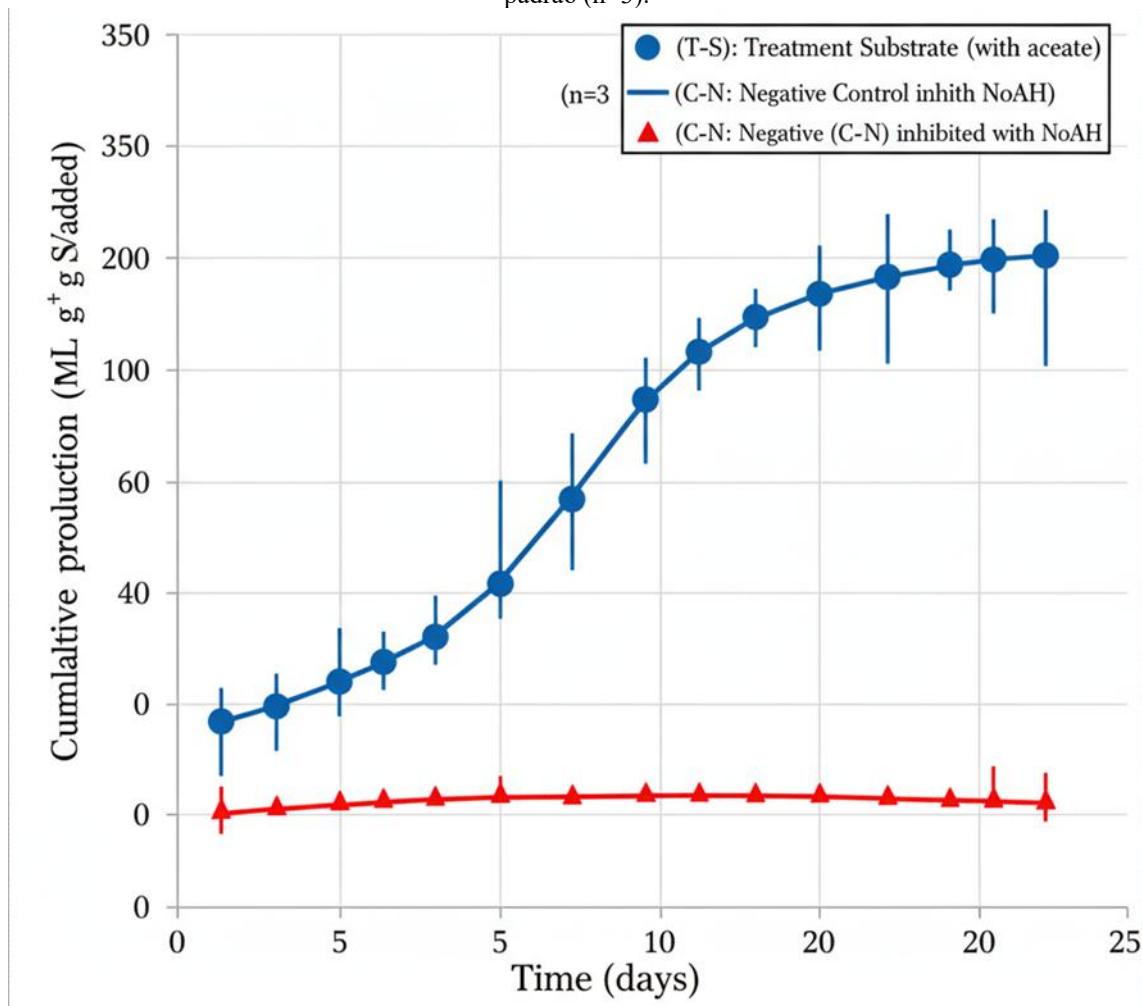
3.2 RECUPERAÇÃO DA ATIVIDADE METANOGENICA APÓS REIDRATAÇÃO

O parâmetro mais crucial para avaliar a viabilidade do processo foi a medição da produção de metano após a reidratação do material. Os resultados dos bioensaios em batelada, conduzidos por 25 dias, são apresentados na Figura 2.

O Tratamento Substrato (T-S), que recebeu acetato, exibiu uma curva de produção cumulativa de metano clássica, com uma fase lag inicial de aproximadamente 5 dias, seguida por uma fase exponencial de produção até o plateau. A produção cumulativa final de metano para o T-S foi de $328 \pm 25 \text{ mL CH}_4 \text{ g}^{-1} \text{ SVadicionado}$. Em contraste, o Controle Negativo (C-N), inibido com NaOH, apresentou uma produção residual e estatisticamente irrelevante de $18 \pm 5 \text{ mL CH}_4 \text{ g}^{-1} \text{ SVadicionado}$.

(Figura 2), confirmando que a inibição específica da metanogênese foi eficiente (FREITAS et al., 2020) e que a produção no T-S foi efetivamente mediada por arqueias metanogênicas.

Figura 2. Produção cumulativa de metano a partir do esterco suíno reidratado após secagem por aspersão. (T-S): Tratamento Substrato (com acetato); (C-N): Controle Negativo (inibido com NaOH). Barras de erro representam o desvio padrão (n=3).



Fonte: Autores.

A presença de uma fase lag de 5 dias é um indicativo de que a comunidade microbiana necessitou de um período para se recuperar do estresse, sair do estado de dormência e reestabelecer suas funções metabólicas completas. Este resultado está em plena concordância com os achados de Xu et al. (2022), que observaram um período de latência semelhante na reativação de lodos anaeróbios desidratados termicamente, atribuindo-o ao tempo necessário para o reparo celular e a reativação de vias enzimáticas.

A produção significativa de metano prova de forma inequívoca que uma fração das arqueias metanogênicas presentes no esterco suíno sobreviveu ao processo de secagem por aspersão e recuperou sua atividade metabólica upon reidratação. Isto corrobora a hipótese inicial do estudo e demonstra a

robustez destes microrganismos. A temperatura de saída do secador (70 °C) parece ter sido um fator crítico, situando-se no limiar superior de tolerância para muitas metanogênicas, como reportado por Conrad (2023), permitindo a sobrevivência de linhagens mais termotolerantes.

3.3 IMPLICAÇÕES PRÁTICAS E PERSPECTIVAS

Os resultados obtidos possuem implicações significativas para a logística e o escalonamento da digestão anaeróbia. A possibilidade de se desidratar o esterco, reduzindo drasticamente seu volume e peso para transporte, e subsequentemente reidratá-lo e reinocular reatores em locais distantes, representa um avanço potencial na descentralização da produção de biogás.

O processo mostrou-se seletivo, favorecendo a sobrevivência de Archaea em relação à comunidade bacteriana total. Este "upgrading microbiano" involuntário poderia ser explorado para o desenvolvimento de inóculos inovadores e de alta eficiência, enriquecidos em metanogênicas, a partir de um resíduo de baixo custo. Estudos futuros devem se concentrar em isolar e identificar as linhagens específicas de Archaea que demonstraram essa resiliência, bem como em otimizar os parâmetros de secagem (e.g., temperatura de entrada, taxa de alimentação) para maximizar ainda mais a taxa de sobrevivência.

4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos e na discussão apresentada, é possível concluir que:

1. O processo de secagem por aspersão (spray drying), conduzido com temperatura de saída de 70 °C, é um método eficaz para a desidratação do esterco suíno, resultando em uma redução de 97,5% na contagem de células totais viáveis. Apesar dessa redução drástica, o processo não é letal para toda a comunidade microbiana, demonstrando a viabilidade técnica do método para preservação parcial do potencial bioativo do resíduo.
2. As arqueias metanogênicas apresentaram uma resiliência significativamente maior ao estresse térmico e de dessecção quando comparadas à comunidade bacteriana total. A evidência para isso é o aumento da razão Archaea/Bactéria de 3,76% no material in natura para 6,67% no pó seco. Este resultado corrobora a literatura que descreve a maior robustez de certos táxons de Archaea, possivelmente devido a mecanismos celulares mais eficientes de resposta ao estresse (CONRAD, 2023).
3. A reidratação do material desidratado permitiu a recuperação da atividade metabólica das arqueias metanogênicas sobreviventes, conforme comprovado pela produção significativa de metano ($328 \pm 25 \text{ mL CH}_4 \text{ g}^{-1} \text{ SV}$) nos bioensaios. A fase de latência de aproximadamente 5

dias observada é consistente com o período necessário para a reativação de células dormentes e o reparo de maquinários celulares essenciais, conforme descrito por Xu et al. (2022).

4. Os resultados validam a hipótese central deste trabalho, confirmando que é possível utilizar a secagem por aspersão como uma etapa de pré-processamento para reduzir o volume e o peso do esterco suíno sem aniquilar completamente seu potencial para subsequentemente reiniciar o processo de digestão anaeróbia após reidratação.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Programa de Pós-Graduação em Ciência, Tecnologia e Inovação em Agropecuária – PPGCTIA da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ e ao Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – CEFET-RJ.

REFERÊNCIAS

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Standard methods for the examination of water and wastewater. 23. ed. Washington, DC: APHA, 2017.

ARAUJO, Ana Carolina Vieira. Diversidade molecular de arqueias em sedimentos de rios da Amazônia e caracterização de espécies metanogênicas cultivadas. 2010. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

ARAUJO, Matheus N. et al. Método rápido para determinação da composição do biogás por cromatografia gasosa acoplada a um detector de condutividade térmica (GC-TCD). International Journal of Environmental Analytical Chemistry , v. 104, n. 20, p. 8690-8707, 2024.

BAHARAM, M. et al. Structure and function of the global topsoil microbiome. Nature, v. 621, p. 393–399, 2023.

BELLUCCI, M. et al. O efeito da substituição de culturas energéticas por resíduos agrícolas na dinâmica de comunidades bacterianas em um digestor anaeróbico de dois estágios. Chemosphere , v. 294, p. 133776, 2022.

BORGES, Leonardo L. et al. Otimização do processo de secagem por atomização para desenvolvimento de pó de resíduo de jabuticaba empregando metodologia de superfície de resposta. Journal of Food Process Engineering , v. 40, n. 1, p. e12276, 2017.

CARVALHO, Paulo César de Faccio et al. Errata: Produção animal e características do solo em sistemas integrados de lavoura e pecuária: rumo à intensificação sustentável. Journal of Animal Science , v. 96, n. 9, p. 4012-4012, 2018.

CONRAD, Ralf. Complexidade da dependência da temperatura em ambientes microbianos metanogênicos. Frontiers in Microbiology , v. 14, p. 1232946, 2023.

DE OLIVEIRA, R. A. et al. Updated protocols for fluorescence in situ hybridization (FISH) for monitoring anaerobic digestion ecosystems. Journal of Microbiological Methods, v. 204, 106638, 2023.

FREITAS, J. V. B. et al. Sodium hydroxide inhibition on methanogenic activity: validation of a specific control in anaerobic digestion assays. Water Science and Technology, v. 81, n. 5, p. 1043-1050, 2020.

GARIMBERTI, Elisa; TOSI, Sabrina. Hibridização in situ por fluorescência (FISH), princípios básicos e metodologia. Em: Protocolos e Aplicações de Hibridização in situ por fluorescência (FISH) . Totowa, NJ: Humana Press, 2010. p. 3-20.

GUAN, Ningzi et al. Resposta microbiana a estresses ambientais: dos mecanismos fundamentais às aplicações práticas. Microbiologia e biotecnologia aplicadas , v. 101, n. 10, p. 3991-4008, 2017. MARTYNENKO, Alex; BÜCK, Andreas (Ed.). Controle inteligente na secagem . Boca Raton, FL, EUA:: CRC Press, 2019.

SHARARA, Mahmoud A.; SADAKA, Sammy S. Oportunidades e barreiras às técnicas de conversão de bioenergia e sua potencial implementação em dejetos suínos. *Energias* , v. 11, n. 4, p. 957, 2018.

TAPPARO, Deisi Cristina et al. Waste-to-Energy: produção de biogás a partir dos resíduos da suinocultura. 2021.

WANG, Y. et al. Challenges and strategies for biogas production from swine manure: a review on moisture management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 134, 110363, 2020.

XU, Mingyue et al. Biosecagem de resíduos de biogás por meio da inoculação de um agente bacteriano termofílico: insights sobre a contribuição da desidratação e o mecanismo microbiano. *Bioresource technology* , v. 355, p. 127256, 2022.