



POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE DEJETOS DE CAPRINOS: ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA

POTENCIAL DE GENERACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUOS CAPRINOS: ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO DE LA PRODUCCIÓN CIENTÍFICA

BIOGAS GENERATION POTENTIAL FROM GOAT WASTE: A BIBLIOMETRIC ANALYSIS OF SCIENTIFIC PRODUCTION

Apresentação: Comunicação Oral

Eduardo Matheus Costa da Fonte¹; Welly Viviane da Silva Santos²; Leocádia Terezinha Cordeiro Beltrame³

DOI: <https://doi.org/10.31692/VICIAGRO.0093>

RESUMO

O presente artigo tem como objetivo principal realizar uma análise bibliométrica da produção científica sobre a geração de biogás a partir de dejetos de caprinos entre os anos de 2004 e 2024. A pesquisa se justifica pela escassez de estudos focados nos resíduos caprinos, especialmente no que diz respeito à digestão anaeróbia e ao potencial bioquímico de produção de metano. A fundamentação teórica do estudo baseia-se na relevância da pecuária para o agronegócio brasileiro e nos impactos ambientais negativos do descarte inadequado de resíduos, contrapondo esse cenário com o potencial sustentável da digestão anaeróbia para geração de biogás e reaproveitamento de nutrientes. A metodologia utilizada consistiu em uma análise bibliométrica a partir da base de dados Scopus, com uso do software VOSviewer e Microsoft Excel. A busca aplicou filtros específicos e identificou 86 documentos, sendo 38 selecionados para análise após triagem criteriosa. Os dados extraídos foram normalizados e tratados estatisticamente, permitindo análises quanto à evolução temporal das publicações, autores mais produtivos, instituições atuantes, países com maior volume de produção científica e redes de coocorrência de palavras-chave. Os resultados revelam que o tema é emergente, com crescimento acentuado a partir de 2015, alcançando um pico em 2017 e retomando força em 2021. As principais áreas temáticas abordadas foram Energia, Ciências Ambientais e Engenharia, representando 60% das publicações. A produção científica está geograficamente distribuída, com destaque para os Estados Unidos, Brasil, China e Grécia. A análise de palavras-chave indicou forte ênfase nos aspectos técnicos da digestão anaeróbia, evidenciando a predominância de estudos laboratoriais sobre viabilidade energética. Conclui-se que a digestão anaeróbia de dejetos caprinos representa uma alternativa tecnicamente viável e cientificamente relevante, alinhada aos princípios da sustentabilidade ambiental e da economia circular. O campo ainda se encontra em processo de consolidação, mas apresenta grande potencial para contribuir com soluções energéticas renováveis em regiões rurais, especialmente em áreas semiáridas com alta concentração de caprinocultura.

Palavras-Chave: Biogás, Caprinocultura, Dejetos animais, Digestão anaeróbia, Análise bibliométrica.

RESUMEN

El presente artículo tiene como objetivo principal realizar un análisis bibliométrico de la producción científica sobre la generación de biogás a partir de residuos caprinos entre los años 2004 y 2024. La investigación se justifica por la escasez de estudios enfocados en los desechos de cabras, especialmente en lo que respecta a la digestión anaeróbica y al potencial bioquímico de producción de metano. El marco teórico se basa en la relevancia de la ganadería para el agronegocio brasileño y en los impactos ambientales

¹ Engenharia Ambiental, Universidade Federal Rural de Pernambuco, eduardo.fonte@ufrpe.br

² Engenharia Ambiental, Universidade Federal Rural de Pernambuco, welleviviane@icloud.com

³ Doutora em Engenharia Química, Universidade Federal Rural de Pernambuco, leocadia.beltrame@ufrpe.br

negativos de la eliminación inadecuada de residuos, contrastando este escenario con el potencial sostenible de la digestión anaeróbica para la generación de biogás y el reaprovechamiento de nutrientes. La metodología utilizada consistió en un análisis bibliométrico a partir de la base de datos Scopus, con el uso del software VOSviewer y Microsoft Excel. La búsqueda aplicó filtros específicos e identificó 86 documentos, de los cuales 38 fueron seleccionados para el análisis después de un cribado riguroso. Los datos extraídos se normalizaron y trataron estadísticamente, permitiendo análisis sobre la evolución temporal de las publicaciones, autores más productivos, instituciones activas, países con mayor volumen de producción científica y redes de coocurrencia de palabras clave. Los resultados revelan que el tema es emergente, con un crecimiento notable a partir de 2015, alcanzando un pico en 2017 y recuperando fuerza en 2021. Las principales áreas temáticas abordadas fueron Energía, Ciencias Ambientales e Ingeniería, representando el 60% de las publicaciones. La producción científica está distribuida geográficamente, destacándose Estados Unidos, Brasil, China y Grecia. El análisis de palabras clave indicó un fuerte énfasis en los aspectos técnicos de la digestión anaeróbica, evidenciando la predominancia de estudios de laboratorio sobre viabilidad energética. Se concluye que la digestión anaeróbica de residuos caprinos representa una alternativa técnicamente viable y científicamente relevante, alineada con los principios de sostenibilidad ambiental y economía circular. El campo aún se encuentra en proceso de consolidación, pero presenta un gran potencial para contribuir a soluciones energéticas renovables en zonas rurales, especialmente en regiones semiáridas con alta concentración de caprinocultura.

Palabras Clave: Biogás, Ganadería caprina, Residuos animales, Digestión anaeróbica, Análisis bibliométrico.

ABSTRACT

This article aims to conduct a bibliometric analysis of scientific production on biogas generation from goat waste between 2004 and 2024. The research is justified by the scarcity of studies focused on goat waste, particularly regarding anaerobic digestion and biochemical methane potential. The theoretical foundation is based on the relevance of livestock farming to Brazilian agribusiness and the negative environmental impacts of improper waste disposal, contrasting this scenario with the sustainable potential of anaerobic digestion for biogas generation and nutrient recycling. The methodology consisted of a bibliometric analysis using the Scopus database, with the aid of VOSviewer and Microsoft Excel. Specific search filters were applied, identifying 86 documents, of which 38 were selected for analysis after careful screening. The extracted data were normalized and statistically processed, allowing analyses of publication trends over time, the most productive authors, active institutions, countries with the highest scientific output, and keyword co-occurrence networks. The results reveal that the topic is emerging, with significant growth starting in 2015, peaking in 2017, and regaining momentum in 2021. The main thematic areas were Energy, Environmental Sciences, and Engineering, accounting for 60% of publications. Scientific production is geographically distributed, with the United States, Brazil, China, and Greece standing out. Keyword analysis indicated a strong emphasis on the technical aspects of anaerobic digestion, highlighting the predominance of laboratory studies on energy feasibility. It is concluded that the anaerobic digestion of goat waste represents a technically viable and scientifically relevant alternative, aligned with the principles of environmental sustainability and the circular economy. The field is still in the consolidation phase but holds great potential for contributing to renewable energy solutions in rural areas, especially in semi-arid regions with high goat farming activity.

Keywords: Biogas, Goat farming, Animal waste, Anaerobic digestion, Bibliometric analysis.

INTRODUÇÃO

A pecuária desempenha papel fundamental no agronegócio brasileiro, constituindo-se como vetor de desenvolvimento socioeconômico nas regiões rurais. Contudo, esse ramo produtivo gera volumosos resíduos orgânicos que, quando descartados de forma inadequada, podem acarretar sérios impactos ambientais, tais como poluição de corpos hídricos, emissão de gases de efeito estufa e proliferação de agentes patogênicos (Silva, 2018). Nesse contexto, a caprinocultura ganha

relevância em regiões semiáridas, onde as condições climáticas limitam outras atividades agropecuárias e favorecem a adaptabilidade de caprinos.

Segundo Magalhães et al. (2021), o rebanho caprino brasileiro alcançou aproximadamente 12,1 milhões de cabeças em 2020, representando um aumento de 4,0% em relação ao ano anterior. A Região Nordeste, com cerca de 11,49 milhões de animais, destaca-se como principal polo da caprinocultura nacional, sobretudo nos estados da Bahia, Pernambuco e Piauí. Essa distribuição evidencia não apenas a importância econômica do setor na região, mas também a necessidade de soluções sustentáveis para o manejo dos dejetos gerados em larga escala.

O esterco animal, especialmente de ovinos e caprinos, representa uma fração considerável dos resíduos agropecuários. Cada animal pode produzir cerca de 2 kg de esterco por dia e, em muitas situações, esse resíduo é descartado sem tratamento adequado. Esse manejo ineficiente resulta na liberação de gases como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e amônia (NH₃), contribuindo para o aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e agravando os impactos ambientais (Afotey; Sarpong, 2023).

A crescente demanda global por energia tem estimulado a busca por fontes renováveis e descentralizadas. Em paralelo, cresce a preocupação com a gestão adequada de resíduos agropecuários, cujos componentes orgânicos oferecem potencial energético considerável por meio de processos biotecnológicos, como a digestão anaeróbia (Silva, 2018). A adoção de biodigestores em sistemas de caprinocultura permite não só a redução das emissões de metano e amônia decorrentes da decomposição inadequada do esterco, mas também a geração de biogás, uma mistura rica em metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂) e de digestato, subproduto valorizado como biofertilizante (Almomani et al., 2019).

A digestão anaeróbia surge então como uma alternativa energética sustentável, capaz de mitigar impactos ambientais e promover a geração de energia renovável a partir de resíduos orgânicos (Cheng et al., 2020). Desse modo, a produção de biogás a partir de dejetos de caprinos caracteriza-se como uma solução viável, sobretudo em regiões onde a caprinocultura é amplamente aplicada, levando em consideração que são nessas regiões que há um número considerável desses resíduos disponíveis.

Apesar das referências consolidadas sobre digestão anaeróbia de dejetos de bovinos e suínos, observa-se escassez de estudos específicos envolvendo dejetos caprinos, sobretudo no que tange à sua caracterização físico-química e ao potencial bioquímico de metano (CH₄). Os poucos trabalhos existentes concentram-se em pesquisas de laboratório com amostras piloto, sem uma visão integrada que contemple análises bibliométricas, avaliação do panorama internacional e estimativas teóricas de produção de biogás. Essa lacuna evidencia a necessidade de trabalhos que combinem

revisão sistemática da literatura, análise de tendências científicas e experimentação prática do potencial energético dos dejetos caprinos.

Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo principal conduzir uma análise bibliométrica da produção científica sobre biogás a partir de dejetos de caprinos no período de 2004 a 2024. Espera-se, assim, preencher lacunas quanto à distribuição geográfica, aos principais temas de pesquisa, aos autores e instituições líderes no campo.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Gestão de resíduos agropecuários

A atividade agropecuária no Brasil envolve cerca de 5,07 milhões de estabelecimentos, dos quais 89% são classificados como pequenos ou médios (com menos de 100 hectares) e respondem por 38% do valor bruto da produção, evidenciando a necessidade de estratégias que promovam o fortalecimento econômico, social e ambiental do setor (IBGE, 2018). O desenvolvimento sustentável, por sua vez, depende do aumento na oferta de energia proveniente de fontes seguras, renováveis e ambientalmente responsáveis (Rafindadi; Ozturk, 2017).

A intensificação da produção animal em determinadas regiões resulta na geração expressiva de resíduos. Quando esses resíduos não são manejados de forma adequada, podem comprometer a saúde humana e animal, provocando a contaminação do solo, dos lençóis freáticos e da atmosfera, além de favorecer a disseminação de doenças (Westerman, 2005; Venglovsky, 2006).

Em contrapartida, a adoção de técnicas para o tratamento e a reciclagem desses resíduos configura-se como uma alternativa viável, tanto ambiental quanto economicamente. A valorização dos nutrientes presentes nos dejetos contribui para mitigar os impactos ambientais relacionados ao seu acúmulo. Além disso, proporciona a geração de produtos com valor agregado, como energia renovável e fertilizantes orgânicos, bases essenciais para o desenvolvimento sustentável. Um exemplo desse aproveitamento é a utilização de biodigestores (Lucas Júnior, 1994).

Biodigestão anaeróbia

Segundo Biagioli (2013), o biodigestor é uma ferramenta tecnológica que pode impulsionar o desenvolvimento sustentável, promovendo a melhoria da qualidade de vida. Entre seus diversos benefícios, destacam-se a geração de energia por meio do biogás e o incremento na produção de alimentos para consumo humano e animal por meio da utilização do biofertilizante em hortas, pomares e áreas destinadas à alimentação de animais.

O biogás é produzido a partir da criação de um ambiente propício para a atuação de bactérias metanogênicas sobre a matéria orgânica, resultando na geração desse combustível por meio de um

processo biológico específico. As condições químicas e físicas adequadas ao desenvolvimento dessas bactérias nos digestores biológicos favorecem a produção de biogás, sendo essencial a manutenção de parâmetros ideais como pH, temperatura e a relação carbono/nitrogênio da biomassa (Gomes; Cappi, 2011).

A degradação, transformação ou decomposição da biomassa é um processo de biodigestão anaeróbia realizado por microrganismos. Alguns produtos biodegradáveis, inclusive certos materiais sintéticos, podem ser digeridos nesse processo. A digestão biológica ocorre em quatro etapas principais: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (Oliveira, 2005).

Na primeira fase, a hidrólise, ocorre a quebra do material orgânico particulado em compostos menores e solúveis. Durante essa etapa, proteínas são transformadas em aminoácidos, carboidratos em açúcares simples e lipídios em ácidos graxos de cadeia longa e glicerina. Embora a maioria das bactérias envolvidas seja anaeróbia, também podem estar presentes microrganismos aeróbios e anaeróbios facultativos (Speece, 1983; Marchi et al., 2013).

Na segunda etapa, a acidogênese, os compostos solúveis formados na hidrólise são convertidos por bactérias fermentativas em substâncias orgânicas simples, como ácidos graxos voláteis, álcoois, ácido láctico, além de CO_2 , H_2 , NH_3 e H_2S (Speece, 1983; Marchi et al., 2013).

A terceira etapa, a acetogênese, envolve a conversão dos ácidos graxos voláteis e outros compostos orgânicos gerados anteriormente em ácido acético e hidrogênio gasoso por bactérias acetogênicas (Speece, 1983; Marchi et al., 2013).

Por fim, na metanogênese, arqueas metanogênicas produzem metano a partir dos compostos formados na etapa anterior. Esse processo pode ocorrer por duas vias principais: (1) bactérias metanogênicas autotróficas oxidam hidrogênio na presença de CO_2 (cerca de 30% da produção de metano) e (2) bactérias metanogênicas acetoclásticas convertem compostos como acetato e metanol em metano (cerca de 70%) (Björnsson, 2012; Marchi et al., 2013).

Características do dejetos caprino

No contexto da caprinocultura, Jardim (1977) estimou que uma cabra adulta produz, em média, 600 kg de dejetos por ano. Considerando a qualidade desse material, Agraz (1989) destacou que ele pode conter até 3,0% de nitrogênio e 2,0% de fósforo, o que o torna um excelente substrato para processos como a digestão anaeróbia e compostagem, por suas elevadas concentrações de nutrientes que favorecem a atividade microbiana.

Amorim (2002) observou que cabras da raça Saanen, durante a fase de crescimento, excretam quantidades variáveis de dejetos até atingirem a idade adulta. Cabras com um ano de idade, alimentadas com uma dieta contendo 60% de concentrado, excretam, em média, 2,93% de

nitrogênio e 1,80% de fósforo nas fezes. Essas propriedades físico-químicas reforçam o potencial dos dejetos de caprinos como substratos em processos biológicos de reciclagem, resultando em produtos finais de alta qualidade e contribuindo significativamente para o desenvolvimento sustentável da caprinocultura.

METODOLOGIA

A metodologia deste estudo fundamenta-se em uma análise bibliométrica detalhada, com o objetivo de mapear a produção científica internacional relacionada à geração de biogás a partir de dejetos caprinos. A abordagem adotada segue diretrizes consolidadas na literatura científica, utilizando a base de dados Scopus como principal fonte de informações e o software VOSviewer para a construção e visualização das redes bibliométricas, conforme estabelecido por Van Eck e Waltman (2010).

A coleta de dados foi realizada na base Scopus, reconhecida por sua ampla cobertura multidisciplinar e qualidade dos metadados. A busca foi conduzida em 03 de janeiro de 2025, utilizando a seguinte expressão booleana: TITLE-ABS-KEY (“goat” AND “waste” AND (“biogas” OR “methane” OR “biochemical potential of methane” OR “theoretical calculation of biochemical potential of methane”))

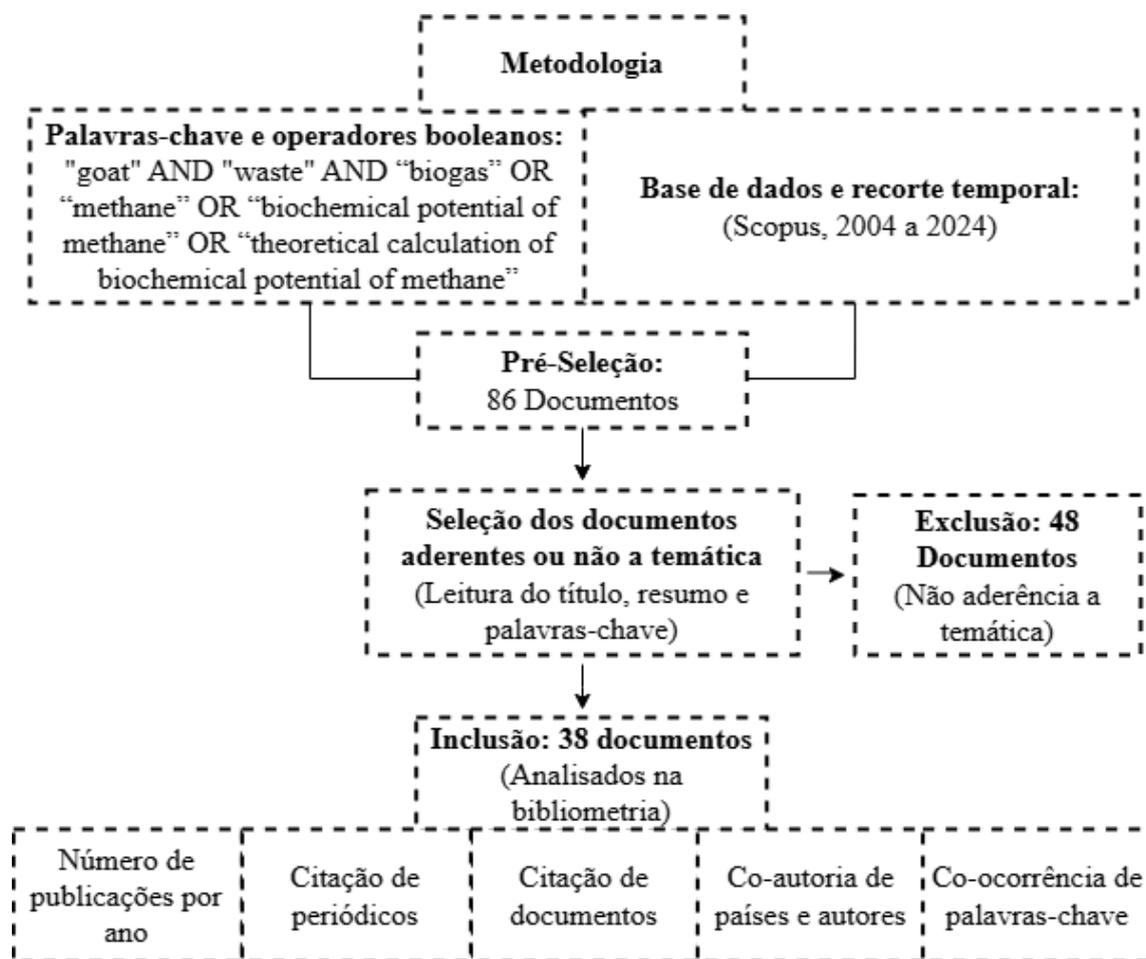
Foram aplicados filtros para incluir apenas documentos do tipo artigo de pesquisa e artigo de revisão, publicados entre 2004 e 2024. Inicialmente, foram identificados 86 documentos. Após uma triagem baseada na leitura dos títulos, resumos e palavras-chave, foram excluídos estudos que não abordavam diretamente a digestão anaeróbia de dejetos caprinos, resultando em uma amostra final de 38 documentos.

Os dados extraídos da base Scopus foram exportados no formato CSV, contendo informações bibliográficas completas como nomes dos autores, afiliações, palavras-chave, resumos e listas de referências. A etapa seguinte consistiu na normalização dos registros, especialmente dos nomes de autores e instituições, com o objetivo de evitar duplicações que comprometessem a precisão das análises. Essa normalização foi realizada com o auxílio de um arquivo de thesaurus no software VOSviewer, seguindo as boas práticas indicadas por Van Eck e Waltman (2010), que enfatizam a importância desse processo para garantir a qualidade dos resultados em estudos de coautoria e cocitação.

A Figura 1 apresenta as etapas adotadas para a coleta, seleção e análise dos dados na base Scopus, contemplando desde a formulação dos critérios de busca até a consolidação final dos documentos utilizados na análise bibliométrica. Para a análise dos dados, utilizaram-se duas ferramentas complementares: o software VOSviewer, versão 1.6.20, e o Microsoft Excel. O

VOSviewer foi empregado para gerar visualizações de redes de coocorrência de palavras-chave e cocitação de autores, com o objetivo de identificar os principais temas, conceitos e tendências emergentes na literatura relacionada à geração de biogás a partir de dejetos de caprinos, além de identificar núcleos de produção científica e principais linhas de pesquisa. Já o Excel foi utilizado para o tratamento estatístico e gráfico dos dados bibliométricos, incluindo a contagem anual de publicações, identificação dos autores mais produtivos, instituições mais atuantes e países com maior volume de produção científica.

Figura 1: Descrição da sequência metodológica para seleção de artigos para a análise bibliométrica



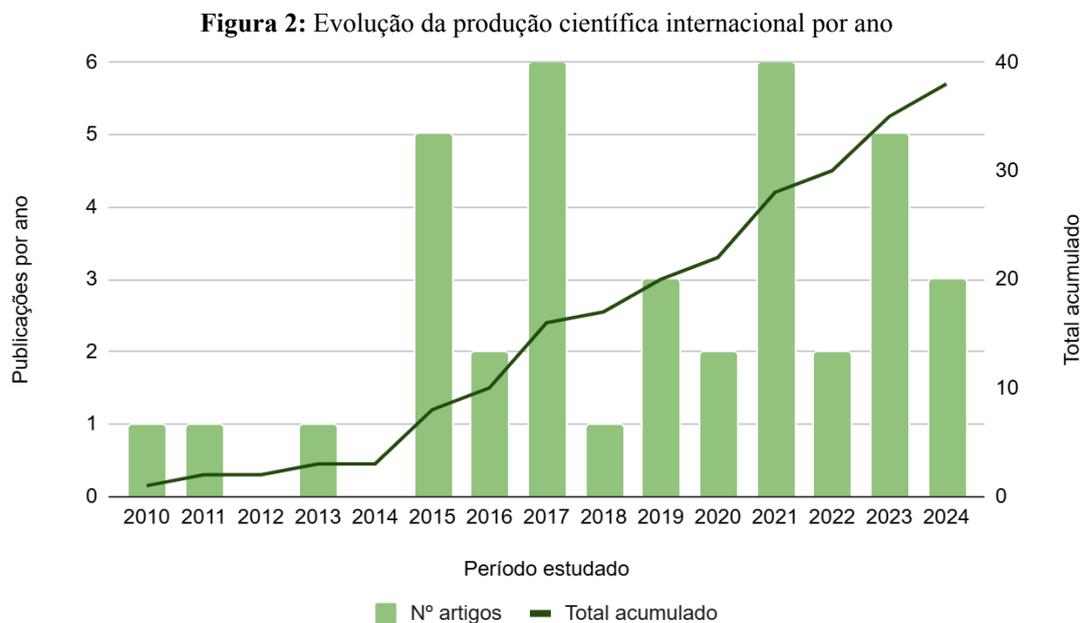
Fonte: Própria (2025)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O levantamento realizado na plataforma Scopus forneceu uma base de dados composta por 86 documentos. Após a aplicação dos critérios de inclusão, especificamente, estudos que abordassem a geração de biogás a partir de dejetos caprinos, foram selecionados 38 documentos (44.19%) para análise. Esse número revela que, embora o tema ainda esteja em desenvolvimento, há um corpo crescente de literatura científica, com potencial significativo para aprofundamento, especialmente no contexto de regiões semiáridas e produção agropecuária sustentável.

A Figura 2 apresenta a evolução da produção científica internacional sobre a geração de biogás a partir de dejetos caprinos, no período de 2010 a 2024. Um dado marcante é a ausência total de publicações entre os anos de 2004 e 2009, indicando que a temática era até então inexplorada ou de relevância científica marginal no cenário internacional. Isso reforça o caráter emergente e recente das pesquisas envolvendo o uso de dejetos caprinos para fins bioenergéticos, contrastando com o histórico de aproveitamento de dejetos bovino e suíno, mais comumente estudados nesse período.

A análise da série histórica evidencia uma tendência geral de crescimento, embora com flutuações significativas ao longo dos anos. Nos primeiros anos do período analisado (2010–2014), observa-se baixa produtividade, com no máximo um artigo por ano. Esse cenário é coerente com o estágio inicial das pesquisas sobre digestão anaeróbia de resíduos caprinos, uma área ainda pouco desenvolvida em comparação aos estudos com resíduos bovinos e suínos (Holm-Nielsen et al., 2009).



Fonte: Própria (2025)

A partir de 2015, há um salto expressivo, com a publicação de cinco artigos, seguido por seis publicações em 2017. Esse crescimento está associado ao aumento do interesse científico na valorização de resíduos agropecuários como fonte de energia renovável, impulsionado pelas metas ambientais após o acordo de Paris (REN21, 2016).

Os anos de 2016 e 2017 consolidam essa tendência, sendo 2017 o ano de maior produtividade no recorte analisado, com seis artigos publicados. Essa alta produção pode estar associada ao avanço das pesquisas em valorização energética de resíduos agropecuários e ao crescimento da agenda internacional voltada à economia circular e energias renováveis, como discutido por Holm-Nielsen, Al Seadi e Oleskowicz-Popiel (2009), que destacam o papel da digestão anaeróbia

como ferramenta estratégica para o desenvolvimento sustentável no meio rural.

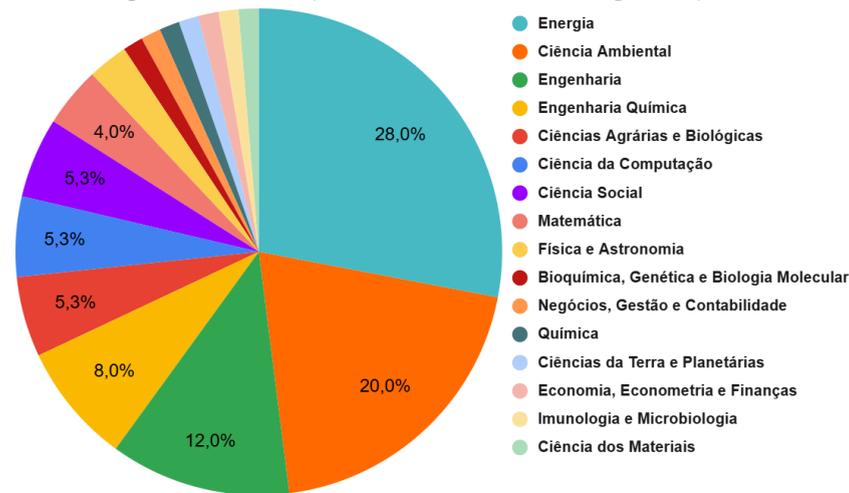
Após esse pico, o ano de 2018 apresentou uma queda brusca na produção, com apenas um artigo publicado. Entretanto, a recuperação é visível nos anos subsequentes, especialmente em 2021, que voltou a registrar seis publicações, igualando o recorde de 2017. Esse novo pico pode ser interpretado como reflexo do contexto da pandemia de COVID-19, que impulsionou pesquisas em bioenergia descentralizada e sustentável, conforme argumentam Rozakis, Juvančič e Kovacs (2022), ao analisarem o papel da bioeconomia na recuperação socioeconômica pós-pandemia.

Nos anos mais recentes, observa-se uma estabilização da produção, com dois artigos em 2022, cinco em 2023 e três em 2024. A curva de crescimento do total acumulado reforça a consolidação do tema, encerrando 2024 com trinta e oito publicações relevantes na área. Esses dados confirmam que o tema vem ganhando destaque internacional, com picos de produtividade em anos-chave e aumento acumulado consistente, o que reflete tanto o avanço técnico-científico quanto a crescente importância da digestão anaeróbia no contexto da transição energética.

Vale destacar que a crescente atenção dada ao aproveitamento energético de resíduos caprinos está em consonância com os princípios da economia circular e com o aumento das políticas públicas voltadas à transição energética em países em desenvolvimento. Segundo Islam et al. (2021), o uso de resíduos de origem animal para geração de biogás representa uma alternativa promissora para países tropicais, sobretudo em comunidades rurais que enfrentam desafios estruturais de acesso à energia e ao saneamento.

A distribuição das publicações por área temática (Figura 3) revela a predominância de campos do conhecimento ligados à sustentabilidade, energia e inovação tecnológica no estudo da digestão anaeróbia de dejetos caprinos para produção de biogás. Foram identificadas dez áreas temáticas, com maior concentração nas categorias Energia (28%), Ciências Ambientais (20%) e Engenharia (12%), que juntas totalizam 60% das publicações analisadas.

Figura 3: Distribuição das Áreas temáticas das publicações



Fonte: Própria (2025).

A liderança da área de Energia evidencia o papel estratégico da digestão anaeróbica como alternativa viável de geração energética renovável, especialmente relevante em regiões de vulnerabilidade energética e hídrica. A Ciência ambiental, como segunda área mais representativa, reforça o foco da literatura na mitigação de impactos ambientais, valorização de resíduos orgânicos e promoção da economia circular. Já a área de Engenharia se destaca pelo desenvolvimento de tecnologias e sistemas aplicados à otimização dos processos de biodigestão, manejo e reaproveitamento de subprodutos.

Áreas complementares como Engenharia Química (8%), Ciências Agrícolas e Biológicas (5,3%) e Ciência da Computação (5,3%) indicam o aprofundamento de análises sobre substratos, caracterização de biomassa, modelagem de processos e integração com a agricultura de precisão. Notavelmente, a presença de Ciências Sociais (5,3%) sugere abordagens voltadas à avaliação de impactos socioeconômicos, percepção pública e viabilidade em comunidades rurais.

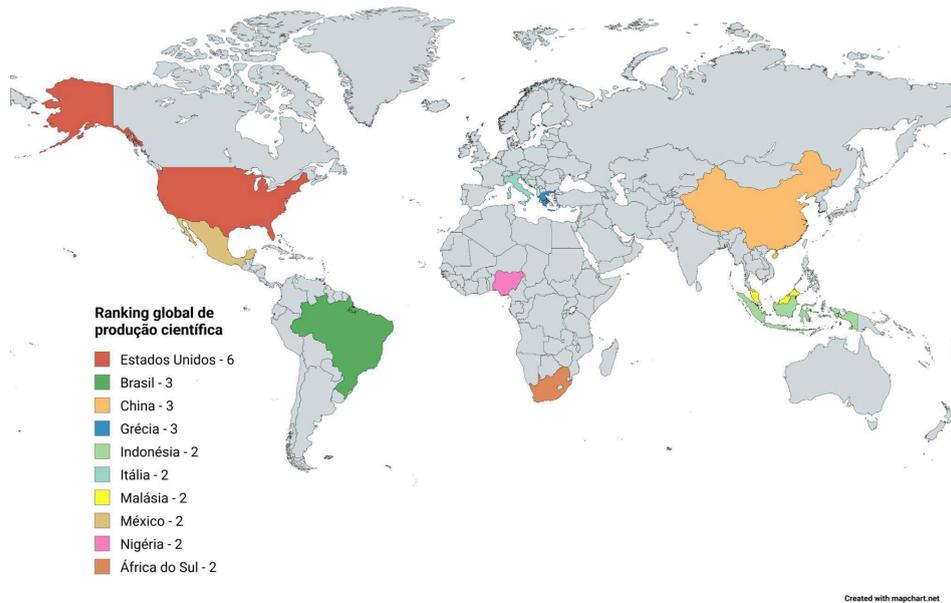
Com menor participação, as áreas de Matemática (4%), Física e Astronomia (2,7%) e Ciência dos Materiais (1,3%) apontam o uso de modelagens quantitativas e avanços na compreensão físico-química dos sistemas de digestão, sugerindo tendências emergentes para investigações mais precisas e integradas.

Assim, o panorama temático evidencia a natureza interdisciplinar da pesquisa sobre o aproveitamento energético de resíduos orgânicos, com contribuições provenientes tanto das ciências aplicadas quanto das ciências sociais e exatas, reforçando seu potencial como solução sustentável de impacto múltiplo.

Análise bibliométrica da distribuição geográfica da produção científica

A análise da distribuição global da produção científica, apresentada na Figura 4, demonstra a abrangência geográfica da pesquisa sobre biogás oriundo de dejetos caprinos, com destaque para países de diferentes continentes. Ao todo, dez países se destacaram no levantamento por terem ao menos duas publicações relacionadas ao tema, no período de 2004 a 2024.

Figura 4: Distribuição Global da Produção Científica



Fonte: Própria (2025).

Os Estados Unidos lideram o ranking com seis publicações, o que evidencia o papel central da pesquisa norte-americana na agenda internacional de energias renováveis e economia circular. Esse protagonismo pode ser associado aos fortes investimentos em inovação tecnológica e à existência de centros especializados em bioenergia, como apontam Holm-Nielsen, Al Seadi e Oleskowicz-Popiel (2009) ao discutirem a relevância da digestão anaeróbia em países desenvolvidos.

Na segunda colocação, há um empate entre Brasil, China e Grécia, com três artigos publicados cada. O Brasil tem se destacado por sua matriz energética diversificada e por políticas públicas voltadas à valorização de resíduos orgânicos no meio rural, especialmente em regiões semiáridas com elevada caprinocultura. Já a presença da China e da Grécia no mesmo patamar revela o interesse crescente desses países na diversificação de fontes energéticas, com ênfase em soluções locais e descentralizadas.

Na terceira faixa, com duas publicações cada, encontram-se Indonésia, Itália, Malásia, México, Nigéria e África do Sul. Esses países representam realidades distintas, mas têm em comum a necessidade de buscar alternativas sustentáveis para o tratamento de resíduos agropecuários e para o suprimento energético em comunidades rurais. Islam et al. (2021) destacam que o aproveitamento

de resíduos animais para geração de energia tem se mostrado particularmente promissor em países do Sul Global, onde os desafios de acesso à energia ainda são significativos.

A diversidade geográfica observada no levantamento reforça que a valorização energética de dejetos caprinos é uma agenda global, com potencial de contribuir simultaneamente para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e para a transição energética justa. Conforme ressaltado por Rozakis, Juvančič e Kovacs (2022), a bioeconomia desempenha papel estratégico na recuperação sustentável e resiliente em cenários pós-crise, como o da pandemia da COVID-19.

Análise bibliométrica de autores

A Tabela 1 apresenta os 10 autores com maior número de publicações sobre a geração de biogás a partir de dejetos caprinos. Os dados evidenciam que Kaur, H. e Kommalapati, R.R. são os autores com maior produtividade no tema, com três publicações cada. Esse resultado indica o protagonismo desses pesquisadores na consolidação científica da temática, especialmente no contexto da digestão anaeróbia de resíduos orgânicos.

Tabela 1: Autores com mais publicações

| Autor | Nº de documentos | País | Instituição |
|--------------------|-------------------------|-------------|--------------------------------------|
| Kaur, H. | 3 | EUA | Universidade Prairie View A&M |
| Kommalapati, R.R. | 3 | EUA | Faculdade de Engenharia Roy G. Perry |
| Abdeshahian, P. | 1 | Irã | Universidade Islâmica Azad |
| Abdul Aziz, N.I.H. | 1 | Malásia | Universidade Kebangsaan Malásia |
| Abed, R.M.M. | 1 | Omã | Universidade Sultão Qaboos |
| Ahmad, M. | 1 | China | Universidade de Shenzhen |
| Al-Harabsheh, A.M. | 1 | Jordânia | Universidade Mutah |
| Amadi, E.S. | 1 | Nigéria | Universidade Estadual de Imo |
| Banadda, N. | 1 | Uganda | Universidade Makerere |
| Calza, L.F. | 1 | Brasil | Universidade E. do Oeste do Paraná |

Fonte: Própria (2025).

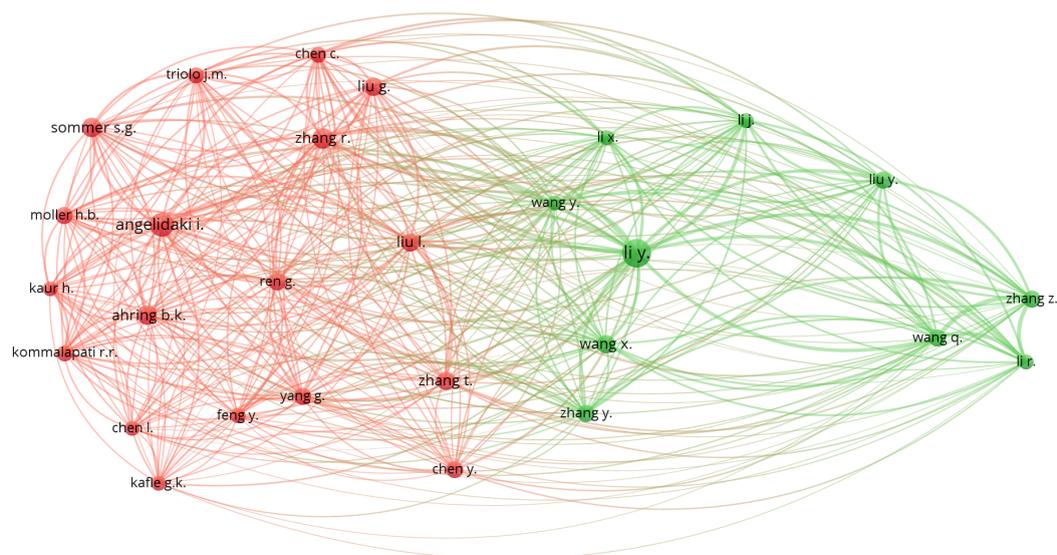
Em um dos estudos, Kaur e Kommalapati (2021) investigaram o potencial bioquímico de metano (BMP) e os parâmetros cinéticos do dejetos caprino em diferentes proporções de inóculo para substrato, utilizando o modelo de Gompertz modificado para análise dos dados. Os resultados indicaram que o aumento da proporção de inóculo elevou os rendimentos de biometano, que variaram de 191,7 a 229,9 mL/gVS, com biodegradabilidade entre 73,3% e 78,7%. Cerca de 90% do biometano foi produzido em até 32 dias.

Além disso, em outro trabalho, os autores otimizaram o processo de digestão anaeróbia de resíduos agroindustriais, destacando a recuperação de biometano e a eficiência do processo (Kaur; Kommalapati, 2023). Essas pesquisas evidenciam o compromisso dos autores com o desenvolvimento de soluções sustentáveis para o tratamento de resíduos orgânicos.

Outros autores, como Abdesshahian, P., Abdul Aziz, N.I.H., Abed, R.M.M., Ahmad, M., Al-Harabsheh, A.M., e Amadi, E.S., apresentam uma publicação cada um sobre o tema, contribuindo de forma pontual para o avanço do conhecimento na área. A dispersão na autoria sugere que o campo de estudo ainda está em fase de consolidação, oferecendo oportunidades para o estabelecimento de redes colaborativas e pesquisas interinstitucionais.

A análise de cocitação de autores (Figura 5) revelou a existência de dois clusters principais de autores que se destacam na produção científica relacionada à digestão anaeróbia de resíduos orgânicos, com ênfase na geração de biogás a partir de dejetos agropecuários, temática na qual se insere o aproveitamento de dejetos caprinos.

Figura 5: Rede de cocitação de autores



Fonte: Própria (2025).

O primeiro grupo (representado em vermelho) reúne autores majoritariamente vinculados a instituições europeias e à produção científica internacional consolidada. Nesse cluster, destacam-se nomes como Angelidaki, I., Ahring, B.K., Sommer, S.G. e Møller, H.B., os quais apresentam forte interconexão entre si e com outros pesquisadores. A pesquisadora Angelidaki é referência na área de digestão anaeróbia, com contribuições significativas no desenvolvimento de modelos de codigestão e avaliação do desempenho de reatores biológicos para o tratamento de resíduos orgânicos (Angelidaki et al., 2003). A presença de Sommer e Møller, que também atuam com foco na valorização energética de resíduos pecuários, reforça a ênfase deste cluster em pesquisas

aplicadas à engenharia de processos, sustentabilidade e eficiência de sistemas de produção de biogás.

O segundo grupo (em verde) concentra autores ligados predominantemente a instituições asiáticas, com destaque para pesquisadores chineses, refletindo o crescimento expressivo da produção científica em bioenergia na China nos últimos anos. Os autores Li, Y., Wang, Y., Liu, Y. e Zhang, Z. são centrais nesse agrupamento, apresentando não apenas alta produtividade, mas também intensa colaboração entre si e com outros membros da rede. Li, Y., em especial, representa o nó com maior centralidade, indicando papel fundamental na articulação das pesquisas sobre digestão anaeróbia de resíduos agroindustriais, incluindo substratos lignocelulósicos e resíduos animais, como dejetos caprinos (Li et al., 2011).

Outro exemplo notável é o estudo de Zhang et al. (2013), que investigou a codigestão anaeróbia de dejetos caprinos com resíduos agrícolas, como palha de trigo, talos de milho e palha de arroz. Os resultados demonstraram que a combinação de esterco de cabra com talos de milho ou palha de arroz aumentou significativamente a produção de biogás, especialmente em proporções de mistura específicas que otimizaram a relação carbono/nitrogênio. Este estudo é frequentemente citado em pesquisas que exploram a eficiência da codigestão de resíduos orgânicos para a produção de energia renovável.

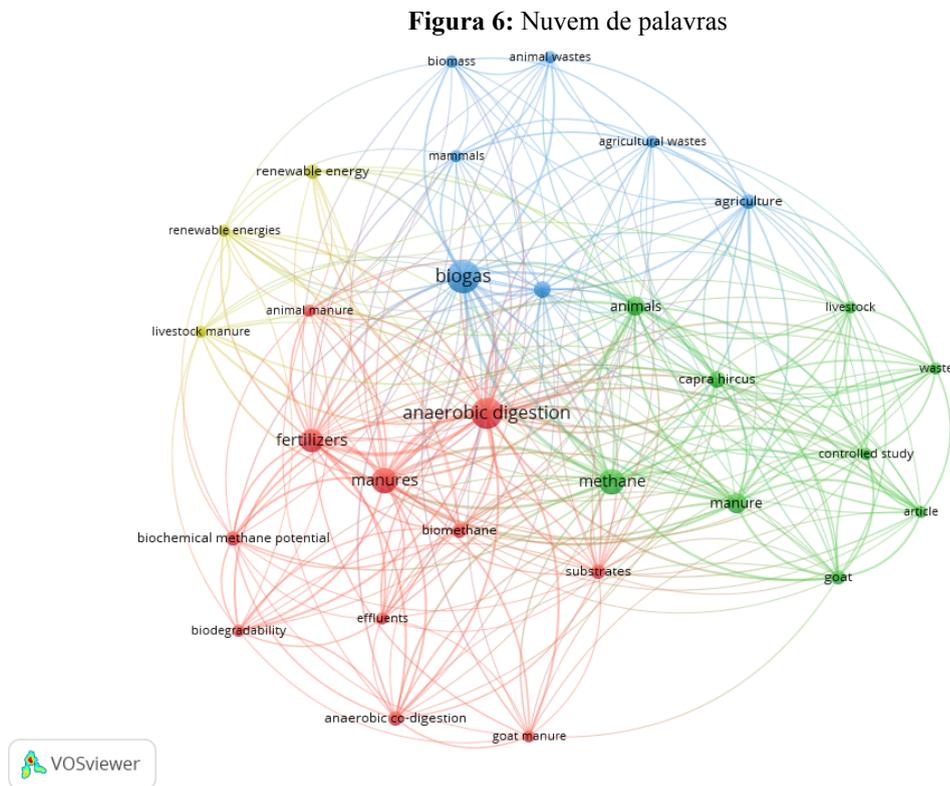
Apesar da divisão clara entre os clusters, a rede apresenta pontos de interconexão por meio de autores com atuação internacional ou nomes recorrentes, como Liu, Zhang e Chen. Esses autores funcionam como pontes entre os dois blocos principais da rede, sugerindo colaborações intercontinentais ou homônimos com atuação em contextos distintos. Tal estrutura reforça a relevância global do tema e, ao mesmo tempo, evidencia a possibilidade de ampliação da inserção de grupos brasileiros nesse cenário científico, por meio do estabelecimento de parcerias estratégicas com centros de pesquisa desses dois polos consolidados.

A interpretação dos dados revela ainda que o tamanho dos nós e a espessura das conexões são proporcionais à influência e integração dos pesquisadores nas respectivas redes. A posição central de autores como Li, Y. e Angelidaki, I. aponta para sua liderança temática, enquanto a separação entre os clusters reflete diferentes abordagens teórico-metodológicas, como foco em microbiologia aplicada, engenharia de reatores ou avaliação de desempenho de sistemas em larga escala.

Análise bibliométrica de co-ocorrência das palavras-chave

A análise de coocorrência de palavras-chave constitui uma ferramenta valiosa para a identificação de padrões temáticos, estrutura cognitiva e lacunas em campos emergentes da ciência. No presente estudo, utilizou-se o critério de ocorrência mínima de quatro aparições por termo.

A rede resultante contém 30 palavras-chave, distribuídas em 4 clusters temáticos interconectados por 293 links de coocorrência, que expressam a frequência com que os termos ocorrem conjuntamente nos documentos analisados. A Figura 6 ilustra a rede de coocorrência, na qual o tamanho dos nós reflete a frequência dos termos, e a espessura das arestas representa a força das coocorrências.



Fonte: Própria (2025).

O cluster vermelho é centrado no termo “digestão anaeróbia”, indicando a forte prevalência do enfoque nos aspectos técnicos da conversão de matéria orgânica em biogás. Termos como “adubos”, “substratos”, “fertilizantes”, “biodegradabilidade”, “efluentes”, “potencial bioquímico de metano”, “codigestão anaeróbia”, “biometano” e “esterco de cabra” integram esse grupo. A coocorrência frequente entre digestão anaeróbia, biodegradabilidade e potencial bioquímico de metano revela que a maior parte dos estudos dedica-se à quantificação do potencial energético e eficiência de processos biotecnológicos, com destaque para testes laboratoriais padronizados (ensaios BMP). A presença de efluentes e fertilizantes indica também a valorização do digestato como insumo agrônômico, apontando uma perspectiva de economia circular aplicada ao setor agropecuário. Além disso, a inclusão de “codigestão anaeróbia” sugere um número significativo de estudos voltados para estratégias de otimização da digestão, seja pela combinação de diferentes resíduos animais ou pela inclusão de substratos complementares que melhorem a cinética de produção de metano.

O cluster verde, fortemente interligado, reúne termos como “esterco”, “metano”, “cabra”,

“*capra hircus*”, “gado”, “resíduos”, “estudo controlado”, “artigo”, e “animais”. Este grupo pode ser interpretado como a dimensão zootécnica e experimental do uso de resíduos animais para fins bioenergéticos. A dupla presença dos termos cabra e *capra hircus* confirma o foco específico de parte da literatura nos resíduos caprinos, que são analisados tanto sob a perspectiva do tipo de animal como do tipo de substrato. O alto grau de conexão com estudo controlado e artigo sugere que muitos dos trabalhos revisados têm caráter experimental, com ensaios controlados para mensurar produção de metano, estabilidade do processo e qualidade do digestato. A densidade das conexões com metano e resíduo reforça a preocupação em avaliar criticamente a capacidade metanogênica dos resíduos caprinos, o que evidencia a relevância desse tipo de biomassa dentro do portfólio de fontes renováveis viáveis em contextos rurais.

Já o cluster azul, composto pelos termos “biogás”, “biomassa”, “resíduos animais”, “mamíferos”, “resíduos agrícolas” e “agricultura”, representa o núcleo agroenergético da discussão, no qual a produção de biogás é situada em uma perspectiva mais ampla de aproveitamento energético de resíduos agropecuários. A presença central de “biogás” indica que este conceito funciona como ponto de convergência para diferentes tipos de biomassa (resíduos animais, resíduos agrícolas), sugerindo que os dejetos caprinos são frequentemente considerados dentro de um portfólio mais amplo de resíduos agroindustriais e rurais. A associação com “agricultura” e “mamíferos” demonstra um diálogo entre a bioenergia rural e os sistemas de produção animal, alinhado com os princípios da agroecologia e da agricultura sustentável.

Por fim, o cluster amarelo articula os termos “energia renovável”, “energias renováveis”, “esterco de gado” e se liga com “esterco animal”, expressando uma dimensão estratégica e sistêmica da produção de biogás. Embora menos numeroso, este grupo é fundamental por situar a digestão anaeróbica como parte integrante das agendas de descarbonização e de diversificação da matriz energética. A duplicidade entre os termos “energia renovável” e “energias renováveis” pode ser atribuída à variação lexical na base de dados, mas sua presença simultânea e suas conexões com os demais clusters indicam que a produção científica reconhece o papel do biogás como vetor da transição energética em contextos rurais, particularmente quando derivado de resíduos pecuários abundantes e subutilizados, como os dejetos caprinos.

A configuração da rede de coocorrência evidencia a natureza multidimensional dos estudos sobre biogás a partir de dejetos caprinos, com forte interseção entre engenharia de processos, zootecnia, agronomia e sustentabilidade energética. Os 293 links de coocorrência revelam um sistema temático altamente integrado, no qual as palavras-chave formam um conjunto contínuo entre fundamentos técnicos e perspectivas estratégicas.

Entretanto, chama a atenção a ausência de termos relacionados à análise econômica, políticas

públicas ou impactos sociais, um sinal de que a literatura científica nesta área permanece fortemente concentrada em aspectos laboratoriais e técnicos, em detrimento de avaliações de viabilidade em larga escala, especialmente em contextos de agricultura familiar ou regiões semiáridas.

CONCLUSÕES

A análise bibliométrica realizada permitiu identificar as principais tendências, atores institucionais e áreas temáticas que compõem o panorama científico da digestão anaeróbia aplicada aos dejetos caprinos para produção de biogás. Os resultados evidenciam um campo de pesquisa em expansão, com forte caráter interdisciplinar, abarcando as áreas de energia, ciências ambientais e engenharia, entre outras.

A dispersão das publicações entre diferentes instituições de ensino e pesquisa ao redor do mundo, somada à diversidade temática das palavras-chave, aponta para um interesse crescente e globalizado por soluções sustentáveis na gestão de resíduos agropecuários. Nesse contexto, o biogás surge como uma alternativa promissora tanto para a geração de energia renovável quanto para o reaproveitamento de resíduos orgânicos, especialmente em regiões rurais e semiáridas.

Diante dessas evidências, conclui-se que a digestão anaeróbia de dejetos caprinos representa uma estratégia tecnicamente viável e cientificamente relevante no avanço da bioenergia e da sustentabilidade ambiental, oferecendo caminhos concretos para inovação no setor agroenergético.

REFERÊNCIAS

AFOTEY, B.; SARPONG, G. T. Estimation of biogas production potential and greenhouse gas emissions reduction for sustainable energy management using intelligent computing technique. **Measurement: Sensors**. v. 25, n. 100650, p. 100650, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measen.2022.100650>

ALMOMANI, F; BHOSALE, R.; KHRAISHEH, M.; SHAWAQFAH, M. Aumento da produção de biogás a partir de resíduos agrícolas por meio de pré-tratamento com processos avançados de oxidação. **Fuel**. Vol. 253, 1 de outubro de 2019, p.964-974. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.05.057>

AMORIM, A. C. Caracterização dos dejetos de caprinos: reciclagem energética e de nutrientes. 2002. 108f. **Dissertação (Mestrado em Produção Animal)** – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2002.

ANGELIDAKI, I.; ELLEGAARD, L.; AHRING, B. K. Applications of the anaerobic digestion process. **Advances in biochemical engineering/biotechnology**, v. 82, p. 1–33, 2003.

BIAGIOLI, B. Características fermentativas e econômicas da produção de biogás utilizando dejetos de cabras leiteiras. 2013. **Dissertação de doutorado**. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal.

BJÖRNSSON, Lovisa, Environmental Biotechnology. Lund, Lunds Tekniska Högskola, 2012. Apostila para a disciplina do Departamento de Biotecnologia (Biotek) – KBT080 – **Environmental Biotechnology**.

CHENG, J. J.; SHEN, Y.; MASTROPIETRO, A. et al. Aumento da produção de biogás por meio da codigestão anaeróbica de resíduos sólidos agrícolas e esterco bovino. **Chemosphere**, v. 248, p. 126–135, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004565352030998X>.

GOMES, F. O. C.; CAPPI, N. Redução de Sólidos de Dejetos de Poedeiras em Biodigestores Operados com Diferentes Tempos de Retenção Hidráulica. In: Periódicos UEM. **Anais... Encontro de Iniciação Científica**, v.1, n.1. 2011

HOLM-NIELSEN, J. B.; AL SEADI, T.; OLESKOWICZ-POPIEL, P. The future of anaerobic digestion and biogas utilization. **Bioresource Technology**, v. 100, n. 22, p. 5478–5484, 2009. DOI: 10.1016/j.biortech.2008.12.046

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Agropecuário: 2017(2018) , pág. 108 Resultados Preliminares. rio de janeiro. Disponível em: <https://censos.ibge.gov.br/agro/2017/resultados-censo-agro-2017.html>

ISLAM, K. M. N. et al. Renewable energy generation from livestock waste for a sustainable circular economy in Bangladesh. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 139, p. 110695, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110695>.

JARDIM, W.R. Criação de caprinos. 3. ed. **São Paulo**: Livraria Nobel, 1977. 239p.

KAUR, H.; KOMMALAPATI, R.R. Biochemical Methane Potential and Kinetic Parameters of Goat Manure at Various Inoculum to Substrate Ratios. **Sustainability**, v. 13, n. 22, p. 12806, 2021. DOI: 10.3390/su132212806.

KAUR, H.; KOMMALAPATI, R.R. Process Optimization and Biomethane Recovery from Anaerobic Digestion of Agro-Industry Wastes. **Energies**, v. 16, n. 18, p. 6484, 2023. DOI: 10.3390/en16186484.

LI, Y.; ZHANG, R.; LIU, G.; CHEN, C.; HE, Y.; LI, X. Anaerobic co-digestion of chicken manure and corn stover in batch and continuously stirred tank reactor (CSTR). **Bioresource technology**, v. 156, p. 342–347, 2014.

LUCAS JÚNIOR, J. Algumas considerações sobre o uso do estrume de suínos como substrato para três sistemas de biodigestores anaeróbios. 1994. 137 f. **Tese (Livre-Docência em Construções Rurais)** - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 1994.

MAGALHÃES, K. A.; HOLANDA FILHO, Z. F.; MARTINS, E. C. Pesquisa Pecuária Municipal 2020: rebanhos de caprinos e ovinos. Sobral: Embrapa Caprinos e Ovinos, 2021. (**Boletim do Centro de Inteligência e Mercado de Caprinos e Ovinos, n. 16**). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1135667/1/CNPC-2021-Art-boletim CIM-16.pdf>.

MARCHI, M. E. V.; BRESSIANI, P. A.; BARBOSA, P. M. Digestão anaeróbia de resíduos

orgânicos para produção de biogás. 2013. **Trabalho de Conclusão de Curso** (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

NARDI, R.; CORTELLA, B. S. C. Formação de professores de Física: das intenções legais ao discurso dos formadores. In: XVI Simpósio Nacional de Ensino de Física, 2005, Rio de Janeiro. **Caderno de Resumos**. São Paulo - SP: Sociedade Brasileira de Física, 2005. v. 1. p. 175-175, 2005.

OLIVEIRA, L. R. P. Biodigestor. In: **VII Simpósio Goiano de Avicultura e II Simpósio Goiano de Suinocultura**. 2005, p. 4-8.

REN21. Renewables 2016 Global Status Report. Paris: REN21 Secretariat, 2016. Disponível em: <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>

RAFINDADI A. A. e OZTURK.I. Impacts of renewable energy consumption on the German economic growth: Evidence from combined cointegration test. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 75 (2017) , pp. 1130 - 1141. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.093>

ROZAKIS, S.; JUVANČIČ, L.; KOVACS, B. Bioeconomy for Resilient Post-COVID Economies. **Energies**, v. 15, n. 8, p. 2958, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15082958>.

SALES, E. S.; MONTEIRO, I. G. S.; LIMA, K. S. Formação de professor, diretrizes da Educação brasileira para o ensino de Química e Avaliação: saberes docentes essenciais à formação docente. In: VII Colóquio Internacional Educação e Contemporaneidade, 2013, São Cristóvão - SE. **Anais do Colóquio Internacional Educação e Contemporaneidade**, 2013.

SILVA, H. W. (2018). Produção de biogás utilizando dejetos de vacas leiteiras—uma alternativa viável para redução de impactos ambientais. **Revista Técnico Científica**, 13.

SPEECE, R. E. 1983. Biotecnologia Anaeróbica para Águas Residuais Industriais. **Nashville, TN:Archae Press**.

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. **Scientometrics**, v. 84, n. 2, p. 523–538, 2010.

VENGLOVSKY, J.; MARTINEZ, J.; PLACHA, I. Hygienic and ecological risks connected with utilization of animal manures and biosolids in agriculture. *Livestock Science*, Volume 102, Issue 3, July 2006, Pages 197-203.

WESTERMAN, P. W.; BICUDO, J. R. Management considerations for organic waste use in agriculture. *Bioresource Technology*, Volume 96, Issue 2, January 2005, Pages 215–221

ZHANG, R.; EL-MASHAD, H. M.; HARTMAN, K.; WANG, F.; LIU, G.; CHOATE, C.; GAMBLE, P. Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion. **Bioresource technology**, v. 98, n. 4, p. 929–935, 2007.

ZHANG, T. et al. Biogas Production by Co-Digestion of Goat Manure with Three Crop Residues. **PLoS ONE**, v. 8, n. 6, e66845, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0066845>.