

Além da Viabilidade: Uma Análise Bibliométrica da Pesquisa Sobre Exploração Energética de Gás de Aterro

Ana Paula Beber Veiga ^I
Gilberto Martins ^{II}

Resumo: Diminuir as emissões de metano, como o gás de aterro, é importante para combater as mudanças do clima no curto prazo. Apesar de subexplorada, a recuperação energética de gás de aterro é capaz de financiar a melhoria do setor de saneamento. Esta pesquisa identificou as lacunas e tendências na produção científica sobre a recuperação energética de gás de aterro. As ferramentas Bibliometrix e VOSviewer foram utilizadas para conduzir uma análise bibliométrica de estudos recuperados a partir da Web of Science. Os resultados revelaram um aumento das pesquisas em países em desenvolvimento, uma diminuição de estudos sobre viabilidade (econômica, social e técnica) e maior interesse na recuperação energética de resíduos tendo como fundamento a sustentabilidade e economia circular. Há ainda poucos estudos sobre o arcabouço regulatório, o que sugere a necessidade de maior aprofundamento no estudo de políticas públicas que favoreçam sua exploração energética e beneficiem outros setores, como o saneamento.

^I Universidade Federal do ABC,
Santo André, São Paulo, Brasil

^{II} Universidade Federal do ABC,
Santo André, São Paulo, Brasil

Palavras-chave: Aterros sanitários, Bibliometria, Biogás, Biometano, Energia renovável, Resíduos sólidos urbanos.

São Paulo. Vol. 28, 2025

Artigo Original

DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4422asoc01381vu28L4AO>

Introdução

A frequência de eventos climáticos extremos aumentou, ressaltando a necessidade urgente de lidar com os impactos das mudanças climáticas conforme o consenso científico vem exigindo nos últimos 40 anos (Ripple *et al.*, 2021). Embora a eliminação gradual do uso de combustíveis fósseis e a modificação dos sistemas de energia existentes sejam cruciais, a redução das emissões de metano é considerada uma estratégia eficaz para alcançar a redução necessária nas emissões de gases de efeito estufa (GEE) e estabilizar as temperaturas globais no curto prazo, de acordo com as metas estabelecidas pelo Acordo de Paris (Nisbet *et al.*, 2020).

A contribuição do metano (CH_4) para o aquecimento global é trinta vezes maior do que a do dióxido de carbono (CO_2) (Nisbet *et al.*, 2020). Além disso, como o CH_4 persiste por um curto período na atmosfera, mesmo baixos níveis de redução podem ajudar substancialmente na reversão das tendências de aquecimento (Nisbet *et al.*, 2020; Ripple *et al.*, 2021; Scharff *et al.*, 2023). O setor de combustíveis fósseis e a agricultura são os principais contribuintes para as emissões de metano, mas o setor de resíduos também merece atenção. Apesar de as atividades de gestão de resíduos terem sido responsáveis por menos de 4% das emissões globais de GEE, em termos de CO_2 e, em 2019 (Dhakal *et al.*, 2023), a decomposição anaeróbica da fração orgânica dos resíduos foi responsável por aproximadamente 20% das emissões antropogênicas de metano (Wilson; Filho; Ramola, 2023). Consequentemente, estima-se que a melhoria da gestão de resíduos poderia contribuir para mitigar de 15% a 25% das emissões globais de GEE (UNEP; ISWA, 2024) e as tecnologias de redução com custo relativamente baixo estão prontamente disponíveis, incluindo captura de gás de aterro com recuperação energética e desvio da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU) de aterros sanitários (Malley *et al.*, 2023).

A degradação anaeróbica da FORSU em aterros sanitários resulta na formação de gás de aterro com uma concentração significativa de metano. Embora a liberação descontrolada de gás de aterro na atmosfera contribua para a mudança do clima, as propriedades físicas e químicas do gás de aterro são interessantes para seu aproveitamento energético. Nas últimas décadas, houve avanços na melhoria da gestão de resíduos como estratégia para reduzir seus impactos ambientais negativos, mas com disparidades importantes entre o Norte e o Sul Global (Wilson, 2023). Os países desenvolvidos implementaram com sucesso iniciativas como a promoção da recuperação energética dos resíduos (Bogner *et al.*, 2007), principalmente por meio da segregação e do tratamento prévio da matéria orgânica, como verificado na União Europeia (IEA, 2020). Em contraste, as nações em desenvolvimento ainda apresentam índices baixos de coleta de resíduos sólidos urbanos (RSU) e a prevalência de locais de disposição final inadequados, como vazadouros a céu aberto (Wilson, 2023), ou aterros sanitários (Kaza *et al.*, 2018), que apesar de possuírem estruturas para minimização de impactos ambientais adversos e apresentarem custos mais baixos quando comparados a outras técnicas de gestão, manejo e tratamento de resíduos, ainda assim, contribuem para formação e emissão GEE quando não existe o controle de emissões de gás de aterro (IEA, 2020; Sabour; Alam; Hatami, 2020).

A investigação do potencial energético do gás de aterro é um campo de estudo

multidisciplinar, com um conjunto substancial de pesquisas realizadas nos últimos anos, tanto do ponto de vista do saneamento quanto da energia. Segundo Boloy *et al.* (2021), em geral, a produção de eletricidade é a rota mais estudada para a transformação de resíduos em energia e há uma necessidade de avançar o conhecimento para seu aproveitamento no setor de transportes. Além disso, os autores identificaram uma tendência crescente a comparar a recuperação de energia de gás de aterro com tecnologias alternativas de transformação de resíduos em energia que são consideradas mais eficientes, tanto em termos de produção de energia quanto de gestão de resíduos. De maneira semelhante, Sabour *et al.* (2020) concluíram que os aterros sanitários são importantes para países que enfrentam o desafio de aprimorar a gestão de resíduos, dado ao seu custo e relativa facilidade de adoção. No entanto, os autores observaram que a maioria dos estudos avaliados argumenta em favor da necessidade de reduzir o descarte de resíduos sem tratamento.

Embora a recuperação energética do gás de aterro seja vista como uma alternativa interessante para mitigar as emissões de GEE (Scharff *et al.*, 2023), apenas uma pequena fração do biogás potencialmente disponível, incluindo o gás de aterro, é explorada para fins energéticos (IEA, 2020) indicando que ainda persistem barreiras para o desenvolvimento completo dos sistemas de biogás. Dado o desalinhamento entre o potencial de exploração energética do gás de aterro e seu uso atual, a questão central que este estudo procurou abordar foi como a produção científica sobre a recuperação energética do gás de aterro evoluiu e quais são as oportunidades que ainda precisam de mais investigação.

Para isso, foi realizada uma análise bibliométrica usando as ferramentas Bibliometrix e VOSviewer. Esse método é uma opção interessante para mapear a produção científica e avançar na produção de conhecimento por permitir a avaliação de uma grande quantidade de informações visando identificar oportunidades de progresso em todo o campo de estudo (Aria; Cuccurullo, 2017; Mukherjee *et al.*, 2022). Primeiro, este estudo fornece uma visão geral qualitativa das pesquisas recuperadas, descrevendo a evolução cronológica da produção científica, juntamente com as principais fontes e países que contribuem para o desenvolvimento do campo de estudo. Em uma segunda etapa, são apresentadas a estrutura conceitual (co-ocorrência de palavras-chave) e a evolução temática. Em seguida, são descritas as estruturas intelectuais (artigos mais citados local e globalmente) e redes colaborativas (coautoria) das publicações capturadas. Por fim, as descobertas foram conectadas para explorar em profundidade suas implicações, sugerindo, se necessário, um redirecionamento do caminho de desenvolvimento da pesquisa sobre o uso de energia de gás de aterro que permita uma exploração mais eficiente do recurso e, eventualmente, melhore as condições de saneamento e acelere a mitigação dos efeitos da mudança do clima.

Material e métodos

A pesquisa foi realizada em três etapas: (i) desenho do estudo, (ii) busca e refinamento, e (iii) processamento e análise das informações. A primeira etapa definiu a base de dados usada para coletar os estudos incluídos na análise e as ferramentas de análise bibliométrica. A base de dados escolhida para coletar os estudos avaliados foi a *Web of*

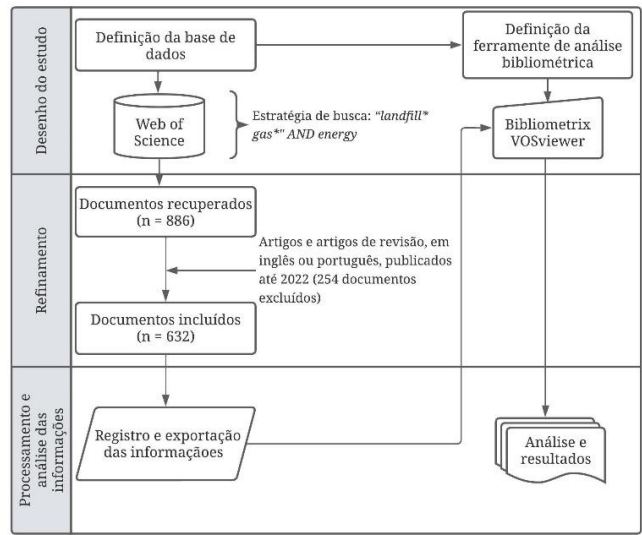
Science. As ferramentas Bibliometrix (Aria; Cuccurullo, 2017) e VOSviewer (van Eck, N. J.; Waltman, 2010) foram escolhidas para realizar a análise bibliométrica.

O Bibliometrix (versão 4.1), por meio de seu aplicativo Biblioshiny, foi selecionado por ser um software livre e oferecer o maior número de análises possíveis em comparação com outras ferramentas bibliométricas (Moreira; Guimarães; Tsunoda, 2020). As análises foram complementadas com o uso do VOSviewer (versão 1.6.19), que se mostrou mais adequado para observações de algumas conexões entre os estudos recuperados, como a evolução temática do campo de estudo e a rede de colaboração entre os autores segundo afiliações.

A etapa inicial também envolveu a elaboração da estratégia de busca para aplicação na base de dados da coleção principal da plataforma Web of Science. A partir do objetivo definido, a estratégia de busca procurou relacionar palavras que se referem ao objeto de estudo (gás de aterro) e sua aplicação (energia). Assim, os termos definidos para a estratégia de busca foram “*landfill* gas**” AND *energy*. Esses termos foram aplicados ao campo de pesquisa de tópicos (que inclui o título, o resumo e as palavras-chave dos registros) e estão em inglês, pois esse é o idioma utilizado para indexar publicações científicas. A pesquisa na plataforma foi realizada em 6 de maio de 2023 e recuperou 886 artigos.

Posteriormente, na etapa de refinamento, foram considerados apenas artigos revisados por pares e artigos de revisão. Capítulos de livros e artigos de conferências foram excluídos para evitar duplicidade, pois normalmente não há restrições à publicação de artigos apresentados em eventos científicos em periódicos. Adicionalmente, apenas artigos em inglês e português foram considerados por serem mais representativos dentre as publicações recuperadas e familiaridade com o idioma, respectivamente. Por fim, foram consideradas desde as primeiras publicações até os estudos disponibilizados até o final de 2022, uma vez que as ferramentas bibliométricas escolhidas apresentam os resultados das análises em uma base anual. Consequentemente, os artigos com acesso antecipado também foram excluídos. Após a etapa de refinamento, 632 artigos foram processados nas ferramentas escolhidas. Por fim, todas as informações foram exportadas usando um formato de arquivo de texto adequado para a análise bibliométrica. A Figura 1 ilustra as etapas executadas pela pesquisa.

Figura 1 – Etapas executadas pela pesquisa.



Fonte: Elaboração própria, 2024.

Resultados e Discussão

Visão geral da pesquisa sobre a recuperação energética do gás de aterro

Entre 1990 e 2022, foram publicados 632 artigos e artigos de revisão, com uma taxa de crescimento anual de 13,65%. Destaca-se o relevante aumento das publicações desde 2013, a partir de quando foram publicados mais de 70% dos estudos recuperados que abordavam o potencial de recuperação energética do gás de aterro. Os primeiros trabalhos analisados que mencionavam o gás de aterro não envolviam diretamente sua recuperação energética. No entanto, desde 1993, um número crescente de pesquisas tem examinado o uso energético do gás de aterro, comparando-o com outras opções de recuperação energética de resíduos (por exemplo, incineração de RSU) e seus efeitos ambientais (Porteous, 1993) enfatizando também a conexão direta entre as emissões de gás de aterro e as mudanças do clima (Gardner; Manley; Pearson, 1993).

A coleção principal do conjunto de artigos, ou *core source*, identificada pelo software Bibliometrix segundo a Lei de Bradford, delimitou o conjunto de publicações que aportam as contribuições e os conceitos mais relevantes para o avanço do campo de estudo e compreendeu 221 artigos publicados em periódicos com escopo em gestão de resíduos (95 artigos) e energia (126 artigos). O periódico com o maior número de publicações é o *Waste Management* (52 artigos), seguido pelo *Journal of Cleaner Production* (32 artigos) e *Renewable & Sustainable Energy Reviews* (32 artigos). Embora o principal periódico desse conjunto tenha como escopo a gestão de resíduos, há mais estudos publicados em revistas do setor de energia em geral. Não obstante, o aprimoramento da gestão de resíduos é

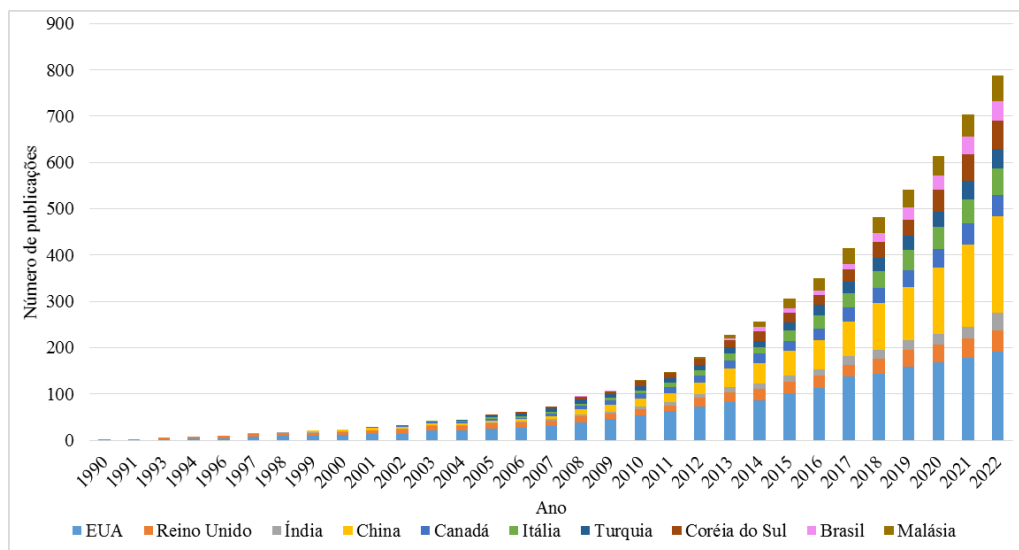
condição para produção e captura do gás de aterro. Desse modo, a partir do escopo dos periódicos relacionados, é possível argumentar que o conjunto de pesquisas avaliadas é caracterizado, em sua maioria, por estudos de natureza menos transversal, já que a maior parte se concentra no uso energético de gás de aterro sem aprofundar aspectos relacionados à gestão de resíduos e suas implicações e impactos sociais e ambientais.

No total, o conjunto de publicações recuperadas também abrange estudos publicados em periódicos que tratam de processos termodinâmicos, química, meio ambiente e sustentabilidade. Apesar da constatação de que a superação de barreiras econômicas e falta de subsídios (Wilson, 2023), bem como a melhoria do arcabouço regulatório tenham um impacto significativo no aumento da utilização do potencial energético do gás de aterro existente (IEA, 2019; Nevzorova; Kutcherov, 2019; Gustafsson; Anderberg, 2021; Kanda *et al.*, 2022), nota-se que apenas uma pequena quantidade de pesquisas foi publicada em periódicos dedicados ao estudo do marco legal institucional relacionado ao objeto de estudo, como, por exemplo, o periódico *Energy Policy* (seis artigos).

A análise da produção científica, levando em conta as dez afiliações mais frequentes, mostra que a pesquisa sobre o uso energético do gás de aterro é realizada por pesquisadores de países em desenvolvimento, como Malásia, Brasil e China, ou de países que estão particularmente engajados no uso do gás de aterro, seja por causa da abundância do recurso, como os Estados Unidos, ou por causa da tradição de usar o biogás para fins energéticos, como em países nórdicos, como a Dinamarca.

Além disso, há uma diminuição na participação de autores de países do Norte Global desde 2000, com um aumento significativo no número de contribuições de autores da China, Índia, Brasil e Malásia (Figura 2). O aumento na pesquisa de acadêmicos de países em desenvolvimento sugere que a utilização de gás de aterro como fonte de energia pode ser uma alternativa adequada para enfrentar os desafios de melhorar a gestão de resíduos nessas regiões.

Figura 2 – Publicações cumulativas por país e afiliação dos autores entre 1990 e 2022.

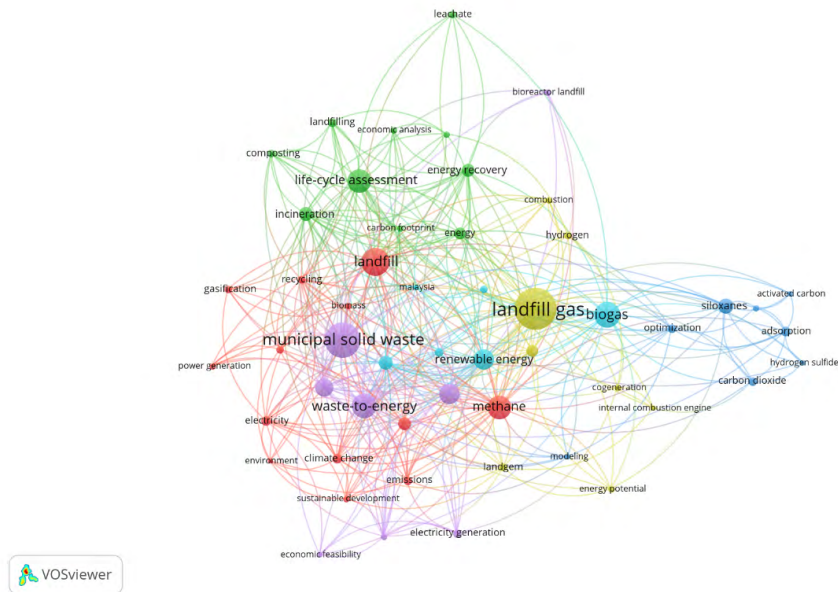


Fonte:Elaboração própria, 2024

Estrutura conceitual e evolução temática

A estrutura conceitual foi avaliada por meio do gráfico de co-ocorrência gerado pela ferramenta VOSviewer usando as palavras-chave definidas pelos autores. Esse gráfico é útil para identificar possíveis agrupamentos temáticos no conjunto de artigos e sua relevância para a área de estudo. Um total de 1.442 palavras-chave foram identificadas nos artigos em avaliação. Desse total, 71 palavras apareceram com uma frequência de ocorrência igual ou superior a cinco e, portanto, foram consideradas na criação do mapa. Além disso, foi preparada uma lista para agrupar palavras semelhantes para facilitar a interpretação dos resultados. Para garantir o agrupamento ideal, o tamanho de cada cluster foi ajustado para incluir pelo menos três palavras. Como resultado, o gráfico de co-ocorrência examinou 53 palavras-chave que foram agrupadas em seis grupos distintos (Figura 3).

Figura 3 – Gráfico de co-ocorrência das palavras-chave dos autores.



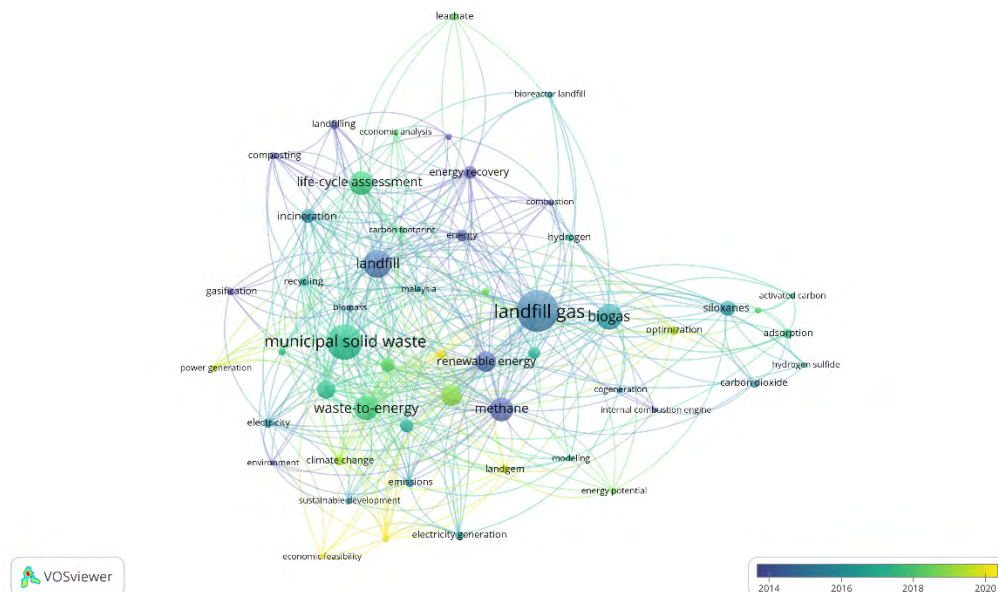
Fonte: Elaboração própria, 2024.

A partir do gráfico de co-ocorrência resultante, o conjunto de trabalhos avaliados revelou as seguintes áreas temáticas: (i) em vermelho, sustentabilidade, mudança do clima e recuperação energética de gás de aterro; (ii) em verde, impactos ambientais de gás de aterro e seu uso de energia; (iii) em azul, tecnologias e métodos para tratamento de gás de aterro; (iv) em amarelo, modelagem e combustão de gás de aterro; (v) em roxo, recuperação de energia de gás de aterro e gestão de resíduos; e (vi) em azul claro, energia renovável e economia circular.

Adicionalmente, foi possível identificar a evolução temática da pesquisa sobre recuperação de energia de gás de aterro por meio da sobreposição do gráfico de co-ocorrência com o ano aproximado de publicação dos artigos abarcados pela análise (Figura 4). Os resultados revelam que os artigos publicados entre 2014 e 2016 se concentraram nas diferentes rotas de recuperação de energia do gás de aterro. Posteriormente, um número crescente de publicações, a partir de 2016, explorou a conexão entre a gestão de RSU e a recuperação de energia do gás de aterro, concentrando-se nas diferentes técnicas de tratamento de gás de aterro e recuperação de energia, usando principalmente a análise do ciclo de vida como método de pesquisa. Por fim, nos últimos anos e, especialmente a partir de 2020, os tópicos de gestão de resíduos e mudança do clima se tornaram cada vez mais significativos nos estudos analisados considerando as palavras-chave definidas pelos autores, e tiveram como marco conceitual a Economia Circular e questões relacionadas

à sustentabilidade.

Figura 4 - Gráfico de co-ocorrência das palavras-chave dos autores por ano de publicação.



Fonte: Elaboração própria, 2024.

Como resultado, as palavras-chave mais frequentemente utilizadas pelos autores dos artigos analisados indicam a predominância de estudos sobre conversão de energia, especialmente como fonte de energia renovável capaz de mitigar as mudanças do clima. Adicionalmente, é possível notar a ausência de palavras-chave específicas relacionadas a pesquisas sobre a utilização do recurso energético obtido, como biocombustíveis, veículos e indústria, confirmando a lacuna identificada anteriormente por Boloy *et al.* (2021) sobre a falta de estudos relacionados ao setor de transportes, ou ainda, demonstrando a escassez de análises setoriais que avaliem o uso energético do gás de aterro.

Publicações e redes de colaboração mais relevantes

Com base no número total de citações de cada publicação, foi executada uma análise dos documentos em dois níveis da relevância, considerando os dez trabalhos mais citados dentro do conjunto de documentos avaliados pela pesquisa (citações locais) e em geral (citações globais). As menções de outras disciplinas ou tópicos são computadas como citações globais, enquanto as citações locais revelam a influência de um trabalho específico dentro da coleção avaliada e seu impacto nos estudos dentro dessa mesma coleção (Tabela 1).

A geração de eletricidade a partir de gás de aterro é a principal rota tecnológica explorada pelos artigos mais citados localmente, incluindo os dois primeiros estudos mais citados. Essas pesquisas avaliam a viabilidade econômica da produção de eletricidade considerando diferentes dimensões, como o tipo de tecnologia adotada (Bove; Lunghi, 2006), o impacto da melhoria da gestão de resíduos (Scarlat *et al.*, 2015) e a influência das receitas obtidas com a comercialização de créditos de carbono (Johari *et al.*, 2012).

O trabalho de Themelis e Ulloa (2007) é o terceiro mais citado localmente e o que mais recebeu citações globais, demonstrando que a pesquisa conduzida pelos autores apresenta uma contribuição importante, não apenas para a pesquisa capturada pela análise, mas para o campo de estudo em geral. O que pode explicar esse alto número de citações globais é o fato de que o estudo fornece subsídios relevantes para o cálculo do potencial de geração de metano em aterros sanitários sem distinção entre os usos finais de energia e compara o resultado com o desempenho da decomposição de RSU em reatores, sendo de interesse de outros campos de estudo, como pesquisas sobre digestão anaeróbica, que não foram capturadas pela presente pesquisa.

Os componentes residuais do gás de aterro são um tópico relevante nos artigos mais citados local e globalmente. Schweigkofler e Niessner (1999) propuseram uma metodologia para quantificar contaminantes especificamente para gás de aterro, enquanto o artigo de revisão de Rasi *et al.* (2011) relatou detalhadamente a presença desses compostos no biogás obtidos de outros substratos que não o gás de aterro, justificando ser este o segundo trabalho mais relevante em termos de número de citações globais, sem ignorar a incidência local..

A análise do ciclo de vida (ACV) é uma metodologia amplamente utilizada para estimar os impactos da gestão de resíduos e da recuperação de energia de gases de aterros sanitários (ver Figura 3). Ayodele *et al.* (2017) e Manfredi e Christensen (2009) estão entre os trabalhos mais citados localmente e aplicaram a ACV para avaliar diferentes rotas tecnológicas para recuperação de energia e a influência de várias práticas de gerenciamento de aterros sanitários, respectivamente. As contribuições desses estudos, tanto local quanto globalmente, são igualmente comparáveis em termos do número de citações recebidas e fornecem elementos importantes para a definição de melhores práticas de gestão de RSU a fim de otimizar a geração e o uso de energia a partir dessa fonte.

Tabela 1 - Os dez principais artigos de acordo com o número de citações locais.

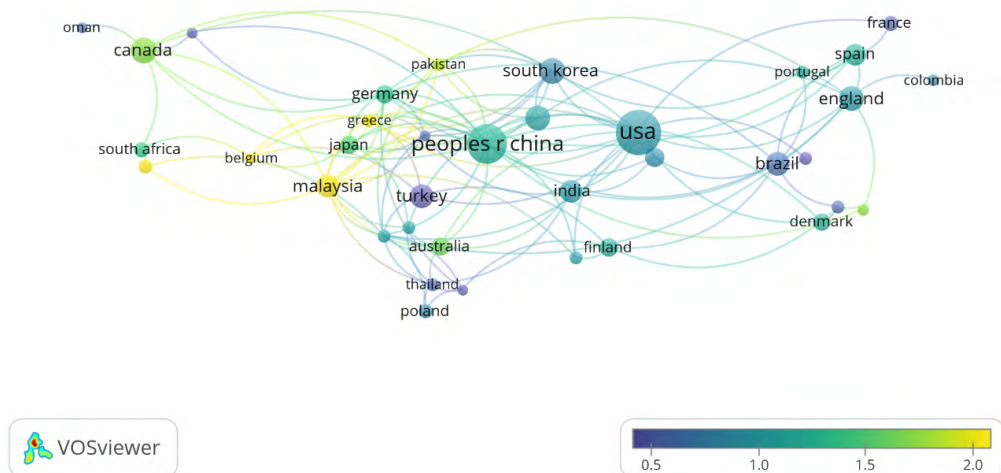
Referência	Título	Objetivo do estudo	Citação local	Citação global
Bove and Lunghi (2006)	Electric power generation from landfill gas using traditional and innovative technologies.	Comparou o desempenho técnico, econômico e ambiental do uso de gás de aterro para gerar eletricidade por meio de diferentes tecnologias (motores de combustão, células de combustível, entre outras).	50	139 (6)
Johari <i>et al.</i> (2012)	Economic and environmental benefits of landfill gas from municipal solid waste in Malaysia.	Os autores estimaram as emissões de metano, as receitas da geração de eletricidade e a comercialização de créditos de carbono de aterros sanitários em operação na Malásia.	50	163 (5)
Themelis and Ulloa (2007)	Methane generation in landfills.	Estimou a quantidade de metano em aterros sanitários nos EUA e no mundo e comparou com a geração potencial de biogás em reatores.	46	337 (1)
Schweigkofler and Niessner (1999)	Determination of siloxanes and VOC in landfill gas and sewage gas by canister sampling and GC-MS/AES analysis.	Propôs um novo método de amostragem, identificação e quantificação de compostos como siloxanos e compostos orgânicos voláteis presentes no gás de aterro.	26	173 (4)
Rasi <i>et al.</i> (2011)	Trace compounds affecting biogas energy utilisation - A review.	Revisão de literatura sobre a presença de componentes químicos em pequenas concentrações no biogás de aterros sanitários, biodigestores e efluentes, que incidem na produção e uso de energia do biogás.	25	216 (2)
Scarlat <i>et al.</i> (2015)	Evaluation of energy potential of Municipal Solid Waste from African urban areas.	Estimaram a quantidade de eletricidade que poderia ser gerada pela incineração de RSU ou no uso de gás de aterro na África, com e sem aprimoramento da gestão de resíduos (aumento da coleta).	25	175 (3)
Ayodele <i>et al.</i> , (2017)	Life cycle assessment of waste-to-energy (WtE) technologies for electricity generation using municipal solid waste in Nigeria.	Compararam o potencial de geração de energia, as emissões de GEE e outros parâmetros de diferentes rotas tecnológicas de transformação de resíduos em energia com o uso daquela gerada pelo gás de aterro, usando ACV.	23	111 (8)
Manfredi and Christensen (2009)	Environmental assessment of solid waste landfilling technologies by means of LCA-modeling.	Compararam o desempenho ambiental de diferentes opções para a disposição final de resíduos para identificar a influência e os impactos dessas técnicas, usando ACV.	22	133 (7)
Jaramillo and Matthews (2005)	Landfill-gas to-energy projects: Analysis of Net Private and Social Benefits.	Avaliaram os custos e receitas da geração de eletricidade de projetos de energia de gás de aterro nos EUA. Também avaliaram a necessidade de subsídios governamentais.	21	52 (10)
Amini <i>et al.</i> (2012)	Determination of first-order landfill gas modeling parameters and uncertainties.	Estimaram os parâmetros usados no modelo de previsão de produção de gás de aterro e determinaram suas incertezas.	21	92 (9)

Nota: Entre parênteses, ranking com a classificação das citações globais (do artigo mais citado para o menos citado).

Fonte: Elaborado pelos autores.

A rede de coautoria foi usada para avaliar as redes de colaboração entre os pesquisadores do conjunto de publicações analisadas (Figura 5). A unidade de análise foi o país de afiliação dos autores. A contribuição de cada país para o desenvolvimento do campo de estudo foi avaliada considerando o número de citações. O índice de citações foi normalizado para corrigir qualquer distorção decorrente da data de publicação, pois os artigos publicados recentemente tiveram menos oportunidades de receber citações. O tamanho da bolha de cada país indica a frequência das contribuições, ou o número de documentos, e a cor representa o número normalizado de citações recebidas.

Figura 5 - Rede de colaboração e contribuição de publicações avaliadas por coautoria e citações.



Fonte: Elaboração própria, 2024.

A rede de coautoria resultante é composta por 37 países com pelo menos cinco publicações cada. O maior número de publicações é dos Estados Unidos (121), seguido pela China (90), Canadá (34), Coreia do Sul (33), Itália (32) e Inglaterra (31). Entretanto, no o grupo de países que se destacam em termos de número de publicações, as instituições chinesas têm mais publicações com autores de outros países (maior número de conexões) do que as estadunidenses. O terceiro e o quarto países com o maior número de conexões são a Malásia (26) e a Alemanha (16), respectivamente. Considerando o índice normalizado de citações para esse grupo de países, as publicações da Bélgica e da Malásia são mais relevantes, sendo superiores a dois.

Embora a Malásia não esteja entre os países com o maior número de publicações,

ela se destaca quando se considera a rede de colaboração e o índice de citação normalizado. Embora esse resultado não permita o estabelecimento direto de uma conexão entre a rede de colaboração e a contagem de citações, ambos os aspectos estão presentes nas publicações desse país. O interesse e influência das publicações recentes da Malásia pode ser explicada por consistirem em estudos sobre economia circular ou envolverem aspectos relacionados ao biometano, que são tópicos recentes e significativos para o progresso científico no campo da recuperação energética de gás de aterro.

Conclusões

Este estudo realizou uma análise bibliométrica com o objetivo de identificar possíveis lacunas e oportunidades de pesquisa, que uma vez superadas, permitam o pleno desenvolvimento da recuperação energética do gás de aterro. A análise indicou um aumento na produção científica atual, com uma maior participação proporcional de publicações de pesquisadores afiliados a universidades de países em desenvolvimento. Essa descoberta é reveladora da importância dos desafios que o Sul Global enfrenta em relação à adequação da gestão de resíduos sólidos urbanos.

Também foi possível observar que outras técnicas de gestão de resíduos são atualmente mais amplamente pesquisadas e confrontadas com todas as consequências sociais, econômicas e ambientais da adoção de aterros sanitários. Como consequência, a evolução temática deixou clara a mudança no cenário da pesquisa sugerindo um afastamento dos estudos de viabilidade bem estabelecidos do passado (econômicos, sociais e técnicos) em direção a um maior interesse em outras tecnologias de transformação de resíduos em energia, em grande parte apoiadas no marco conceitual da sustentabilidade e circularidade.

Em função dessa nova perspectiva, as pesquisas recentes defendem a substituição do aterro sanitário por outras técnicas, apesar do potencial energético inexplorado dos locais existentes, principalmente com base nos conceitos de circularidade e sustentabilidade e na necessidade de aprimorar a gestão de resíduos. No entanto, o estudo sobre a recuperação energética do gás de aterro ainda é uma abordagem necessária, dado o passivo existente, a ampla adoção da destinação final de resíduos em aterros, infraestrutura e capacidade financeira limitadas em países de baixa e média renda que ainda precisam viabilizar a melhoria das suas condições sanitárias.

Adicionalmente, os resultados apresentados confirmam uma deficiência na pesquisa sobre o arcabouço regulatório pertinente ao campo de estudo, o que representa a principal lacuna identificada. Em vista disso, é pertinente reconsiderar os principais obstáculos ao desenvolvimento de sistemas de energia de biogás e, em particular, a importância de melhorar as políticas que promovem seu uso. Além disso, a maioria dos estudos considera o gás de aterro para a geração de eletricidade, com uma tendência limitada e recente de artigos que avaliam os aspectos tecnológicos da produção e do uso do biometano.

O uso do biometano do biogás como biocombustível é um caminho promissor para o desenvolvimento desse campo de pesquisa. Assim, é uma oportunidade interessante para pesquisas futuras que podem se dedicar à avaliação de questões setoriais específicas

para sua produção e uso energético. Nesse sentido, investigações mais aprofundadas em setores como o de transporte poderiam apoiar um uso melhor e mais qualificado do recurso, o desenvolvimento de estruturas de políticas mais eficientes e, consequentemente, contribuir para o enfrentamento das mudanças do clima no curto prazo com melhoria das condições sanitárias.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Referências

AMINI, Hamid R.; REINHART, Debra R.; MACKIE, Kevin R. Determination of first-order landfill gas modeling parameters and uncertainties. **Waste Management**, S. l., v. 32, n. 2, p. 305–316, 2012. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X11004272>.

ARIA, Massimo; CUCCURULLO, Corrado. bibliometrix: an R-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of Informetrics**, S. l., v. 11, n. 4, p. 959–975, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>.

AYODELE, T. R.; OGUNJUYIGBE, A. S. O.; ALAO, M. A. Life cycle assessment of waste-to-energy (WtE) technologies for electricity generation using municipal solid waste in Nigeria. **Applied Energy**, S. l., v. 201, p. 200–218, 2017.

BOGNER, J. et al. Waste management. In: METZ, B. et al. (org.). *Climate change 2007: mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. p. 587–613. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4-wg3-chapter10-1.pdf>.

BOLOY, Ronney Arismel Mancebo et al. Waste-to-energy technologies towards circular economy: a systematic literature review and bibliometric analysis. **Water, Air, and Soil Pollution**, S. l., v. 232, n. 7, 2021.

BOVE, R.; LUNGHI, P. Electric power generation from landfill gas using traditional and innovative technologies. **Energy Conversion and Management**, S. l., v. 47, n. 11–12, p. 1391–1401, 2006.

DHAKAL, S. et al. Emissions trends and drivers. In: SHUKLA, P. R. et al. (org.). *Climate change 2022 - mitigation of climate change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2023. p. 215–294. Disponível em: https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9781009157926%23c2/type/book_part.

GARDNER, N.; MANLEY, B. J. W.; PEARSON, J. M. Gas emissions from landfills and their contributions to global warming. **Applied Energy**, S. l., v. 44, n. 2, p. 165–174, 1993.

GUSTAFSSON, M.; ANDERBERG, S. Dimensions and characteristics of biogas policies – mod-

elling the European policy landscape. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, S. l., v. 135, p. 1–11, 2021.

IEA. *Outlook for biogas and biomethane: prospects for organic growth*. S. l.: IEA, 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth>. Acesso em: 18 abr. 2022.

IEA. *Renewables 2019*. Paris: IEA, 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/renewables-2019>. Acesso em: 21 maio 2021.

JARAMILLO, P; MATTHEWS, H. S. Landfill-gas-to-energy projects: analysis of net private and social benefits. **Environmental Science & Technology**, Washington, DC, v. 39, n. 19, p. 7365–7373, 2005.

JOHARI, Anwar et al. Economic and environmental benefits of landfill gas from municipal solid waste in Malaysia. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, S. l., v. 16, n. 5, p. 2907–2912, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.005>.

KANDA, Wisdom et al. Policy coherence in a fragmented context: the case of biogas systems in Brazil. **Energy Research & Social Science**, Amsterdam, v. 87, p. 102454, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102454>.

KAZA, Silpa et al. *What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050*. Washington, DC: World Bank, 2018.

MALLEY, Christopher S. et al. A roadmap to achieve the global methane pledge. **Environmental Research: Climate**, S. l., v. 2, n. 1, p. 011003, 2023. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2752-5295/acb4b4>.

MANFREDI, Simone; CHRISTENSEN, Thomas H. Environmental assessment of solid waste landfilling technologies by means of LCA-modeling. **Waste Management**, S. l., v. 29, n. 1, p. 32–43, 2009.

MOREIRA, Paulo Sergio da Conceição; GUIMARÃES, André José Ribeiro; TSUNODA, Denise Fukumi. Qual ferramenta bibliométrica escolher? Um estudo comparativo entre softwares. **P2P e Inovação**, S. l., v. 6, p. 140–158, 2020.

MUKHERJEE, Debmalya et al. Guidelines for advancing theory and practice through bibliometric research. **Journal of Business Research**, S. l., v. 148, p. 101–115, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2022.04.042>.

NEVZOROVA, Tatiana; KUTCHEROV, Vladimir. Barriers to the wider implementation of biogas as a source of energy: a state-of-the-art review. **Energy Strategy Reviews**, S. l., v. 26, p. 100414, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2211467X19301075>.

NISBET, E. G. et al. Methane mitigation: methods to reduce emissions, on the path to the Paris Agreement. **Reviews of Geophysics**, S. l., v. 58, n. 1, 2020. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2019RG000675>.

PORTEOUS, A. Developments in, and environmental impacts of, electricity generation from municipal solid waste and landfill gas combustion. **IEE Proceedings A: Science, Measurement**

and Technology, Hertford, v. 140, n. 1, p. 86, 1993. Disponível em: <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/ip-a-3.1993.0015>.

RASI, S.; LÄNTELÄ, J.; RINTALA, J. Trace compounds affecting biogas energy utilisation – a review. **Energy Conversion and Management**, S. l., v. 52, n. 12, p. 3369–3375, 2011. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890411001968>.

RIPPLE, William J. et al. World scientists' warning of a climate emergency 2021. **BioScience**, S. l., v. 71, n. 9, p. 894–898, 2021. Disponível em: <https://academic.oup.com/bioscience/article/71/9/894/6325731>.

SABOUR, Mohammad Reza; ALAM, Ehsan; HATAMI, Amir Mostafa. Global trends and status in landfilling research: a systematic analysis. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, S. l., v. 22, n. 3, p. 711–723, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00968-5>.

SCARLAT, N. et al. Evaluation of energy potential of municipal solid waste from African urban areas. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, S. l., v. 50, p. 1269–1286, 2015.

SCHARFF, Heijo et al. The impact of landfill management approaches on methane emissions. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, S. l., 2023. Disponível em: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0734242X231200742>.

SCHWEIGKOFER, M.; NIESSNER, R. Determination of siloxanes and VOC in landfill gas and sewage gas by canister sampling and GC-MS/AES analysis. **Environmental Science & Technology**, Washington, DC, v. 33, n. 20, p. 3680–3685, 1999.

THEMELIS, Nickolas J.; ULLOA, Priscilla A. Methane generation in landfills. **Renewable Energy**, S. l., v. 32, n. 7, p. 1243–1257, 2007.

UNEP; ISWA. *Global waste management outlook 2024: beyond an age of waste: turning rubbish into a resource*. S. l.: United Nations Environment Programme, 2024. Disponível em: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/44939>.

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. VOSViewer: visualizing scientific landscapes. S. l.: s. n., 2010.

WILSON, David C. Learning from the past to plan for the future: an historical review of the evolution of waste and resource management 1970–2020 and reflections on priorities 2020–2030 – the perspective of an involved witness. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, S. l., v. 41, n. 12, p. 1754–1813, 2023. Disponível em: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0734242X231178025>.

WILSON, David C.; FILHO, Carlos Silva; RAMOLA, Aditi. The significant potential of better waste and resource management for climate mitigation. S. l., 2023. Disponível em: <https://waste-management-world.com/recycling/the-significant-potential-of-better-waste-and-resource-management-for-climate-mitigation/>. Acesso em: 23 maio 2024.

Ana Paula Beber Veiga

✉ ana.veiga@ufabc.edu.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7610-5114>

Editor Responsável

Pedro Roberto Jacobi

Editor Associado

Flávia Collaço

Gilberto Martins

✉ gilberto.martins@ufabc.edu.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0565-2289>

Submetido em: 25/06/2023

Aceito em: 06/02/2025

2025;28:e00067

Declaração de disponibilidade de dados:

Os dados de pesquisa só estão disponíveis mediante solicitação.

Además de la viabilidad: análisis bibliométrico de la investigación sobre el aprovechamiento energético del gas de vertedero

Ana Paula Beber Veiga
Gilberto Martins

Resumen: La reducción de las emisiones de metano, como el gas de vertedero, es crucial para abordar el cambio climático a corto plazo. La recuperación energética de este gas puede financiar mejoras en el saneamiento, aunque es poco explorada. Esta investigación identificó las lagunas y tendencias en la producción científica sobre la valorización energética del gas de vertedero. Se utilizó el análisis bibliométrico con las herramientas Bibliometrix y VOSviewer en estudios de la Web of Science. Los resultados mostraron un aumento de la investigación en países en desarrollo, una disminución en los estudios de viabilidad (económica, social y técnica) y un interés creciente en la valorización energética basada en la sostenibilidad y la economía circular. Aún hay pocos estudios sobre el marco normativo, lo que sugiere la necesidad de profundizar en políticas públicas que promuevan la valorización energética y beneficien sectores como el saneamiento.

Palabras-clave: Bibliometría, Biogás, Biometano, Energías renovables, Residuos sólidos urbanos, Vertederos.

São Paulo. Vol. 28, 2025

Artículo original

Beyond Feasibility: a bibliometric analysis of research into the energy exploitation of landfill gas

Ana Paula Beber Veiga
Gilberto Martins

Abstract: Reducing methane emissions, such as landfill gas, is important for tackling climate change in the short term. Although underexplored, the energy recovery of landfill gas can finance improvements in the sanitation sector. This research identified the gaps and trends in the scientific production on landfill gas energy recovery. The tools Bibliometrix and VOSviewer were used to perform a bibliometric analysis of studies retrieved from the Web of Science. The results indicated an increase in research in developing countries, a decrease in feasibility studies (economic, social and technical) and an emerging interest in energy recovery from waste based on sustainability and circular economy. There are still few studies on the regulatory framework, suggesting the need for more in-depth study of public policies that promote energy recovery and benefit other sectors, such as sanitation.

Keywords: Bibliometrics, Biogas, Biomethane, Landfills, Municipal solid waste, Renewable energy.

São Paulo. Vol. 28, 2025

Original Article