



QUANTIFICAÇÃO DE GASES EM ATERROS SANITÁRIOS: RELEVÂNCIA AMBIENTAL E POTENCIAL ECONÔMICO ATRAVÉS DE CRÉDITOS DE CARBONO

Rafaella de Deus Panassolo¹, Frederico Silva Moreira¹, Andrea Teresa Riccio Barbosa¹

¹Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, Brasil
(rafa26panassolo@gmail.com)

A quantificação de gases em aterros sanitários é fundamental para o controle ambiental e a viabilização de créditos de carbono. O metano (CH₄), gás com alto potencial de aquecimento global, pode ser capturado e utilizado na geração de energia, contribuindo para a redução das emissões. Métodos diretos, como sensores, e indiretos, como modelagens matemáticas, permitem medições precisas. A mensuração eficiente possibilita a mitigação dos impactos ambientais e a valorização econômica dos aterros.

Palavras-chave: Quantificação de gases; aterros sanitários; créditos de carbono; mitigação ambiental; geração de energia

INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas referem-se a alterações significativas e duradouras nos padrões climáticos globais, geralmente associadas ao aumento da temperatura média do planeta (IPCC, 2021). Essas mudanças decorrem, em grande parte, do efeito estufa, um fenômeno natural no qual certos gases presentes na atmosfera absorvem e reemitem a radiação térmica, impedindo a dissipação total do calor para o espaço (NASA, 2024). Os principais gases de efeito estufa (GEE) incluem dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) e vapor d'água, que contribuem para o equilíbrio térmico do planeta. Sem esse fenômeno natural, a temperatura terrestre seria significativamente mais baixa, tornando inviável a manutenção da vida como a conhecemos (IPCC, 2021).

O Potencial de Aquecimento Global (GWP, na sigla em inglês) é uma métrica utilizada para comparar a capacidade de diferentes gases de efeito estufa (GEE) de reter calor na atmosfera em relação ao dióxido de carbono (CO₂), considerado como referência. Já o dióxido de carbono equivalente (CO₂e) é uma unidade que expressa a quantidade total de GEE emitida, convertendo-a com base em seu respectivo GWP, de modo a padronizar sua contribuição para o aquecimento global em termos equivalentes ao CO₂.

A Tabela 1 permite observar a contribuição relativa de cada gás de efeito estufa para o aquecimento global, expressa em relação ao CO₂.

Tabela 1. Potencial de aquecimento equivalente.

Gás	GWP relativo/CO ₂ (100 anos)
Dióxido de Carbono (CO ₂)	1
Bromometano (CH ₃ Br)	2
Diclorometano (CH ₂ Cl ₂)	9
Clorometano (CH ₃ Cl)	12
Clorofórmio (CHCl ₃)	16
Metano (CH ₄)	28
1,1,1-Tricloroetano (CH ₃ CCl ₃)	160
Óxido nitroso (N ₂ O)	265
Tetracloro de carbono (CCl ₄)	1.730
Perfluorociclopropano (C ₃ F ₈)	9.200
Éter perfluoropolimetilisopropílico (CF ₃ OCF(CF ₃)CF ₂ OCF ₂ OCF ₃)	9.710
Trifluoreto de nitrogênio (NF ₃)	16.100
Pentafluoreto de trifluorometilsulfur (CF ₃ SF ₅)	17.400
Hexafluoreto de enxofre (SF ₆)	23.500
Éteres Fluorados (HFEs) *	1 - 12.400
Hidrofluorcarbonetos (HFCs) *	4 - 12.400
HidroCloroFluoroCarbonetos (HCFCs) *	79 - 1.980
Haletos (CB _n F _n) *	376 - 6.290
CloroFluoroCarbonetos (CFCs) *	4.660 - 13.900
Perfluorcarbonetos (PFCs) *	6.630 - 11.100

* famílias de moléculas que cuja composição altera seu efeito como GEE

O CO₂ é o gás que mais contribui para o aquecimento global, pois corresponde à maior parte das emissões de GEE e possui um tempo de permanência atmosférico de, no mínimo, 100 anos, resultando em impactos climáticos de longo prazo (UNEP, 2020). A redução das emissões de outros gases de efeito estufa também é essencial para mitigar o impacto climático. Para isso, utiliza-se o conceito de carbono equivalente, que permite converter diferentes gases de efeito estufa em créditos de carbono, utilizados em mecanismos de compensação ambiental (Gold Standard, 2023).

Embora o metano (CH₄) seja emitido em menor quantidade, seu potencial de aquecimento global é aproximadamente 28 vezes superior ao do CO₂ ao



longo de um período de 100 anos (IPCC, 2021). O óxido nitroso (N_2O), por sua vez, tem um potencial de aquecimento cerca de 265 vezes maior que o CO_2 , apesar de estar presente em menores concentrações (EPA, 2025).

Com o intuito de enfrentar essa problemática, foi estabelecido, em 1997, o Protocolo de Quioto, um tratado internacional com o objetivo de definir metas para a redução das emissões de gases de efeito estufa (UNFCCC, 1997). Para auxiliar os países signatários no cumprimento dessas metas e incentivar a participação do setor privado e dos países em desenvolvimento, o protocolo introduziu três mecanismos de mercado: Comércio de Emissões, Implementação Conjunta e o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) (UNFCCC, 1997).

Dentre esses mecanismos, o MDL permite a implementação de projetos de redução de emissões em países em desenvolvimento (ou não pertencentes ao Anexo I do protocolo), que não possuem metas obrigatórias de redução no âmbito do Protocolo de Quioto. Esses projetos podem gerar Reduções Certificadas de Emissões (RCEs), equivalentes a uma tonelada de CO_2 , que podem ser comercializadas com países que possuem metas de redução estabelecidas pelo protocolo (UNFCCC, 2008).

Nesse contexto, o Brasil se destacou como um dos principais países a adotar o MDL, devido ao seu potencial para projetos de energia renovável, reflorestamento e eficiência energética. Até fevereiro de 2025, a América Latina e o Caribe registraram 1.006 projetos no âmbito do MDL, com o Brasil sendo um dos principais contribuintes nesta região (UNFCCC, 2025). Esses projetos geraram Reduções Certificadas de Emissões (RCEs), contribuindo significativamente para a mitigação das mudanças climáticas. Um exemplo relevante é a Usina Hidrelétrica de Jirau, localizada no Rio Madeira, que foi registrada no MDL e é reconhecida como a maior planta de energia renovável a obter tal registro.

Os gases de efeito estufa (GEE) podem ser gerados por diversos processos naturais e antropogênicos, sendo um dos principais a decomposição da matéria orgânica. Esse processo ocorre tanto em ambientes naturais, como pântanos e solos alagados, quanto em sistemas artificiais, como aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto. Durante a decomposição anaeróbica, microrganismos degradam a matéria orgânica na ausência de oxigênio, resultando na liberação de gases como dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4), ambos contribuintes significativos para o efeito estufa (Alonso; Martins, 2018).

Em aterros sanitários, por exemplo, a degradação dos resíduos sólidos urbanos pode gerar grandes volumes

de biogás, cuja gestão inadequada pode intensificar o aquecimento global (Silva; Souza, 2021).

A quantificação precisa da geração de biogás em aterros sanitários é crucial para a implementação de estratégias de mitigação dos gases de efeito estufa e para a obtenção de créditos de carbono. A estimativa e o monitoramento adequados da produção de biogás possibilitam que os aterros sanitários implementem projetos certificados de captura e queima ou aproveitamento energético do metano, convertendo a redução de emissões em créditos de carbono negociáveis (Dubeux; Costa; Rovere, 2014).

Dessa forma, além de contribuir para a mitigação das mudanças climáticas, a valorização econômica do biogás incentiva práticas mais sustentáveis na gestão de resíduos sólidos, promovendo a transição para uma economia de baixo carbono (BNDES, 2010).

Assim, o objetivo principal deste artigo é apresentar os métodos de quantificação do biogás gerado em aterros sanitários, destacando seu potencial tanto econômico quanto ambiental. A abordagem busca evidenciar como a mensuração precisa da produção de biogás pode viabilizar a geração de créditos de carbono, contribuindo para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa e incentivando práticas sustentáveis na gestão de resíduos sólidos.

MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo concentra-se na revisão da literatura sobre os principais métodos utilizados para a medição de gases em aterros sanitários, descrevendo as técnicas empregadas para avaliar parâmetros essenciais, como a composição dos gases, o fluxo de emissão, a concentração de metano e outros compostos relevantes.

Essa abordagem permite compreender as diferentes metodologias disponíveis para monitoramento dos gases, fornecendo uma visão sobre a eficácia e aplicabilidade de cada uma em diferentes cenários operacionais. Ao analisar as características e implicações práticas de cada método, torna-se possível orientar a escolha das estratégias mais adequadas para um monitoramento eficiente, contribuindo para a gestão ambiental e o controle das emissões em aterros sanitários.

Além disso, a quantificação precisa dos gases emitidos é fundamental para a certificação e comercialização de créditos de carbono. A medição adequada do metano, um dos principais gases de efeito estufa gerados em aterros, possibilita a conversão dessas emissões evitadas em créditos negociáveis no mercado de carbono, incentivando

práticas sustentáveis e a mitigação dos impactos ambientais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A medição dos gases emitidos em aterros sanitários pode ser realizada por diferentes métodos, cuja escolha depende dos objetivos da análise, das características do local e das condições ambientais. Entre os principais estão os métodos diretos, baseados em medições *in loco* (sensores, cromatografia e espectroscopia), e os indiretos, que utilizam modelagens matemáticas preditivas.

A amostragem pontual consiste na coleta de amostras gasosas em locais específicos do aterro, geralmente por meio de sondas instaladas em poços de monitoramento.

Essas amostras são analisadas com o uso de técnicas como cromatografia gasosa (GC) ou espectrometria de massas (MS), possibilitando a identificação qualitativa e quantitativa dos compostos presentes no biogás.

Cromatógrafos

Cromatógrafos gasosos (Figura 2) utilizados nesta análise frequentemente possuem detectores de ionização de chama (FID), indicados para a medição de hidrocarbonetos, e detectores de condutividade térmica (TCD), adequados para a quantificação de CO₂ (Hutnan *et al.*, 2003).



Figura 2. Cromatógrafo gasoso.

Um cromatógrafo possui os seguintes componentes principais, conforme ilustra a Figura 3:

1. Fonte de gás: Transporta a amostra pela coluna;
2. Injetor: Introduz a amostra;
3. Coluna cromatográfica: Separa os compostos;
4. Detector: Identifica e quantifica os compostos;
5. Software: Processa os resultados.

Esses componentes trabalham juntos para separar e analisar os compostos em uma amostra.

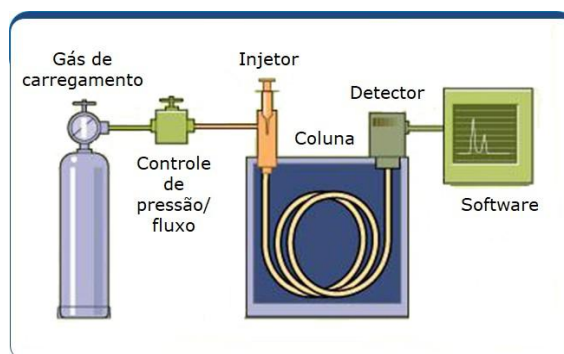


Figura 3. Componentes do cromatógrafo.

A cromatografia a gás acoplada à espectrometria de massas (GC-MS), representada na Figura 4, é uma técnica analítica avançada que separa os compostos da amostra através da cromatografia a gás (GC) e os identifica e quantifica usando a espectrometria de massas (MS). Ela é altamente precisa, sensível e versátil, sendo amplamente utilizada em diversas áreas, como análises ambientais, forenses, farmacêuticas e de alimentos, e também no controle de emissões de GEE. Dessa forma, ela é capaz de identificar gases de efeito estufa como metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x), óxidos de enxofre (SO_x), CFCs, halocarbonos e compostos orgânicos voláteis (COVs).

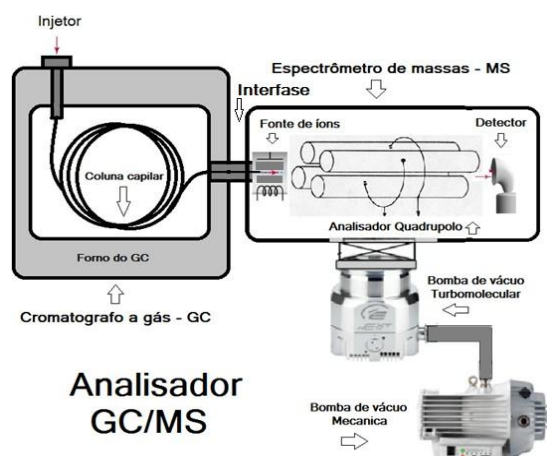


Figura 4. Cromatografia a gás acoplada a espectrometria de massas.

A integração entre a cromatografia a gás e a espectrometria de massas permite que a separação dos compostos seja feita antes que eles sejam identificados de forma mais precisa e detalhada. O GC separa os compostos com base nas suas características físico-químicas, enquanto o MS identifica e quantifica esses compostos com base na análise dos fragmentos iônicos.

Monitoramento nos aterros

O monitoramento contínuo, por sua vez, utiliza sensores de alta precisão instalados no aterro, permitindo a obtenção de dados em tempo real sobre a concentração dos gases. Entre os principais sensores empregados destacam-se os sensores de infravermelho não dispersivo (NDIR), amplamente utilizados para a medição de CO_2 e CH_4 devido à sua alta seletividade e sensibilidade (Banik *et al.*, 2016); sensores eletroquímicos, eficientes na detecção de gases tóxicos como H_2S e CO (Kumar *et al.*, 2018); sensores catalíticos, empregados na medição de gases inflamáveis; além de analisadores portáteis, como o Gasmeter DX4000, que realiza medições por espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), permitindo a identificação simultânea de diversos compostos (ATECORP, 2020).

Sensores NDIR

Os sensores NDIR (Figura 5) são compostos por uma fonte de luz infravermelha, uma câmara de medição e um detector. A fonte de luz infravermelha emite comprimentos de onda específicos de luz que são absorvidos pelas moléculas de CO_2 . O detector mede a quantidade de luz que passa pela câmara, e a diferença na intensidade da luz detectada é usada

para determinar a concentração de CO_2 , conforme ilustrado na Figura 6.



Figura 5. Sensor NDIR.

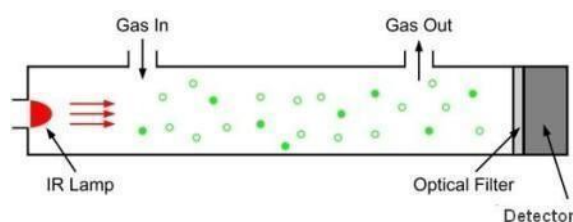


Figura 6. Funcionamento do sensor NDIR.

Sensores eletroquímicos

Os sensores eletroquímicos são muito eficientes para detectar alguns gases de efeito estufa secundários, como dióxido de enxofre, óxidos de nitrogênio e monóxido de carbono, mas não são ideais para gases como CO_2 (Figura 7) e CH_4 (Figura 8).



Figura 7. Sensor eletroquímico para SO_2 .



Figura 8. Sensor eletroquímico para NO.

O funcionamento do sensor eletroquímico baseia-se em reações eletroquímicas que ocorrem na interface entre o gás analisado e os eletrodos do sensor. Ao entrar no sensor, o gás interage com o eletrodo de trabalho, promovendo uma transferência de elétrons que resulta em uma corrente elétrica. A magnitude dessa corrente é proporcional à concentração do gás, permitindo sua quantificação.

Os sensores eletroquímicos são eficazes na detecção de diversos gases de efeito estufa (GEE), como dióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrogênio (NO_x), monóxido de carbono (CO) e, em alguns casos, metano (CH_4). Embora tenham vantagens como custo baixo e portabilidade, sua durabilidade limitada e a possibilidade de interferências de outros compostos são algumas das limitações dessa tecnologia.

Sensores catalíticos

Os sensores catalíticos (Figura 9) são utilizados para a detecção de gases inflamáveis, como metano (CH_4) e hidrogênio (H_2), e seu princípio de funcionamento baseia-se na oxidação catalítica do gás sobre um elemento sensor aquecido, conhecido como *pellistor* (SGX SENSORTECH, 2014).



Figura 9. Sensor catalítico Dräger X-am® 8000.

O sensor é composto por dois elementos resistivos: um ativo, recoberto por um catalisador (geralmente platina ou paládio), e um de referência, sem catalisador (N.E.T., 2022).

Quando o gás inflamável entra em contato com o elemento ativo, ocorre sua oxidação, liberando calor e aumentando a resistência elétrica do material. A diferença de resistência entre os dois elementos é convertida em um sinal elétrico proporcional à concentração do gás no ambiente (IGD, 2024).

Outra técnica amplamente empregada é a utilização de câmaras de fluxo, dispositivos fechados instalados diretamente sobre a superfície do aterro para quantificar a taxa de emissão de gases.

O gás acumulado no interior da câmara pode ser analisado por espectroscopia de absorção ou cromatografia gasosa, possibilitando a determinação precisa dos fluxos de CH_4 e CO_2 resultantes da decomposição dos resíduos sólidos urbanos (Park *et al.*, 2009). Esse método é amplamente utilizado em estudos científicos para avaliar as taxas de emissão em diferentes condições ambientais e operacionais.

O FTIR (Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier) é uma técnica sensível e pode ser aplicada para a análise de gases. O espectrômetro portátil FTIR Agilent 4300 (Figura 10) é capaz de identificar e qualificar gases em câmaras, desde que seja configurado adequadamente para esse tipo de análise.



Figura 10. Analisaador portátil Agilent FTIR 4300.

Radiação eletromagnética

O sensoriamento remoto, por sua vez, emprega tecnologias como espectrometria de infravermelho, termografia e imagens hiperespectrais captadas por drones ou satélites, permitindo o monitoramento da emissão de gases sem a necessidade de contato direto com a superfície do aterro. Sensores de varredura infravermelha detectam variações térmicas na superfície do aterro, associadas à liberação de biogás.

Entre os dispositivos utilizados destacam-se sensores de imagem térmica (FLIR Systems, Figura 11), que identificam pontos de emissão de gases por meio da variação da temperatura superficial (Schmid *et al.*, 2018); espectrômetros de infravermelho de alta resolução, empregados na avaliação da dispersão dos gases na atmosfera; e drones equipados com sensores multiespectrais e hiperespectrais, permitindo a obtenção de mapas detalhados da concentração de biogás na superfície do aterro (Van der Voort *et al.*, 2020).



Figura 11. Câmera termográfica não refrigerada GF77.

Modelos preditivos

Além das medições diretas, a modelagem matemática é amplamente utilizada para estimar a geração e a emissão de gases em aterros sanitários, considerando fatores como a composição dos resíduos, temperatura, umidade e tempo de degradação da matéria orgânica.

Modelos preditivos como o LandGEM (Landfill Gas Emissions Model) e o GasSim aplicam equações cinéticas para estimar a emissão de metano ao longo do tempo, contribuindo para a formulação de estratégias voltadas à mitigação de emissões e ao aproveitamento energético do biogás (US EPA, 2005; McDougall, 2007). Ambos os modelos são usados para prever as emissões de metano durante a vida útil de um aterro e por anos após o seu fechamento. Essas previsões são essenciais para implementar estratégias de mitigação de emissões, como a captura e aproveitamento de metano para produção de energia ou sua queima controlada.

Na prática, a escolha do método mais viável depende da finalidade do estudo. Para projetos que buscam certificação e comercialização de créditos de carbono, os métodos diretos são mais recomendados devido à sua precisão e aceitação em auditorias. Já os modelos matemáticos, como o LandGEM e o GasSim, são úteis em fases iniciais, para estimativas de potencial de emissão e planejamento.

Considerando a diversidade de métodos disponíveis para a quantificação de gases em aterros sanitários, torna-se essencial avaliar suas principais características com base em critérios técnicos, operacionais e econômicos. As Tabelas 2 e 3 apresentam as características dos métodos diretos e indiretos, permitindo a realização de comparações e análises críticas sobre a viabilidade e aplicabilidade de cada abordagem.

Tabela 2. Características dos métodos diretos de medição.

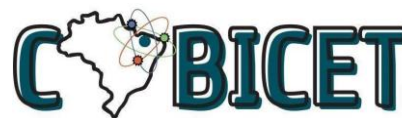
Critério	Métodos Diretos
Precisão da Medida	Alta, com possibilidade de medição em tempo real.
Custo	Alto (equipamentos e manutenção).
Complexidade Operacional	Alta, exige pessoal treinado e infraestrutura.
Aplicabilidade	Ideal para projetos com necessidade de certificação.
Tempo de resposta	Imediato (em sensores); lento (em cromatografia laboratorial).
Abrangência espacial	Localizada.

Tabela 3. Características dos métodos indiretos de medição.

Critério	Métodos Indiretos
Precisão da Medida	Moderada, depende da qualidade dos dados de entrada.
Custo	Relativamente baixo.
Complexidade Operacional	Baixa a moderada, requer conhecimento em modelagem.
Aplicabilidade	Boa para estudos preliminares e simulações.
Tempo de resposta	Rápido após parametrização do modelo.
Abrangência espacial	Ampla, cobre todo o aterro com base nos dados.

CONCLUSÃO

A utilização de técnicas eficazes para a medição de gases em aterros sanitários é crucial tanto para a gestão ambiental quanto para o aproveitamento econômico do biogás. A comparação entre os métodos mostra que, embora os sensores e a cromatografia apresentem maior custo, oferecem



medições altamente precisas e são essenciais para a certificação de créditos de carbono.

Em contrapartida, modelos matemáticos têm seu valor em diagnósticos iniciais e no planejamento de projetos.

A quantificação precisa de compostos como metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2) permite não apenas avaliar os impactos ambientais da decomposição dos resíduos, mas também possibilita a implementação de estratégias de mitigação e aproveitamento energético do biogás.

Além disso, a medição adequada desses gases possibilita que os aterros sanitários se tornem elegíveis para mecanismos de crédito de carbono, já que a captura e a redução das emissões de metano podem ser convertidas em certificados comercializáveis.

Dessa forma, a adoção de tecnologias avançadas para a medição de gases contribui tanto para a redução dos impactos ambientais quanto para a inserção dos aterros em mercados de sustentabilidade, transformando-os em potenciais fontes de energia renovável e oportunidades de investimento no setor de compensação de emissões de gases de efeito estufa.

Por fim, é imprescindível que gestores públicos e privados priorizem a aplicação desses métodos de quantificação como parte da estratégia de transição para uma gestão mais sustentável dos resíduos sólidos urbanos e para a inserção efetiva no mercado de créditos de carbono.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS/MEC – Brasil e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (Capes) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

ALONSO, C.; MARTINS, R. Emissões de metano e dióxido de carbono em processos anaeróbios. *Revista Científica de Meio Ambiente*, v. 12, n. 3, p. 45-58, 2018.

ATECORP. *Gasmet DX4000 Portable FTIR Gas Analyzer: Technical Specifications*. Advanced Test Equipment Corp., Gasmet Technologies, Finland, 2020. Disponível em: <https://www.atecorp.com/products/gasmet-technologies/dx4000>. Acesso em: 20 mar. 2025.

BANIK, S. et al. *Non-dispersive infrared (NDIR) sensors for methane detection: A review*. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 221, 1170-1185, 2016.

DUBEUX, C.; COSTA, D.; ROVERE, E. Mecanismos de desenvolvimento limpo e a geração de créditos de carbono em aterros sanitários. CETESB, 2014.

EPA. *Understanding Global Warming Potentials*. United States Environmental Protection Agency, 2025. Disponível em: <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>. Acesso em: 17 mar. 2025.

GOLD STANDARD. Informações sobre créditos de carbono e mecanismos de compensação ambiental. 2023. Disponível em: <https://www.goldstandard.org/>

HUTNAN, M. et al. *Application of gas chromatography for biogas composition analysis*. *Waste Management*, 23(3), 245-251, 2003.

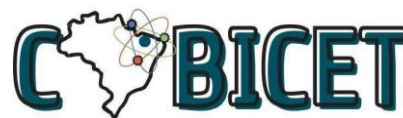
IGD. *Dealing with Flammable Gases: Pellistors vs. Infrared*. International Gas Detectors (IGD), 2024. Disponível em: <https://www.internationalgasdetectors.com/dealing-with-flammable-gases-pellistors-vs-infrared-flammable-gas-detectors/>. Acesso em: 2 abr. 2025.

IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>. Acesso em: 15 abr. 2025.

KUMAR, S. et al. *Electrochemical sensors for environmental monitoring: A review*. *Electrochimica Acta*, 281, 75-94, 2018.

LANDIM, A. L. P. F.; AZEVEDO, L. P. de. O aproveitamento energético do biogás em aterros sanitários: unindo o útil ao sustentável. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 27, p. 59-100, mar. 2008. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2433/1/BS%2027%20O%20aproveitamento%20energ%C3%A9tico%20do%20biog%C3%A1s_P.pdf. Acesso em: 15 mar. 2025.

MC DOUGALL, J. *GasSim: A model for landfill gas generation and dispersion*. *Waste Management*, 27(5), 817-827, 2007.



NASA. *The Causes of Climate Change*. National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2024. Disponível em: <https://climate.nasa.gov/causes/>. Acesso em: 10 abr. 2025.

N.E.T. *Matched pair Pellistor (Catalytic bead sensor) for combustible gas*. N.E.T. (Nenvitech), innovative gas sensing, 2022. Disponível em: <https://www.nenvitech.com/products/catalytic-bead-sensors/smm/>. Acesso em: 2 abr. 2025.

PARK, S. *et al. Evaluation of flux chamber techniques for measuring landfill gas emissions*. Atmospheric Environment, 43(16), 2449-2455, 2009.

SCHIMID, J. *et al. Thermal infrared remote sensing for landfill monitoring*. Journal of Environmental Management, 214, 197-205, 2018.

SGX SENSORTECH. Introduction to Pellistor Gas Sensors.

SILVA, J.; SOUZA, M. Impacto do biogás de aterros sanitários no aquecimento global. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 26, n. 2, p. 193-202, 2021.

UNEP. Relatório do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente sobre as emissões globais de gases de efeito estufa. 2020.

UNFCCC. Texto completo do Protocolo de Quioto da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima. 1997.

UNFCCC. Informações sobre o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) no âmbito do Protocolo de Quioto. 2008. Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-kyoto-protocol/mechanisms-under-the-kyoto-protocol/the-clean-development-mechanism>. Acesso em: 13 abr. 2025.

UNFCCC. *Registered projects by region. Total 7844*. UNFCCC, Clean Development Mechanism (CDM), 2025. Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/Statistics/Registration/RegisteredProjByRegionPieChart.html>. Acesso em: 18 abr. 2025.

US EPA. *Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide*. United States Environmental Protection Agency, 2005.

VAN DER VOORT, T. *et al. Use of drones for hyperspectral remote sensing of landfill gas emissions*. Remote Sensing of Environment, 238, 111-146, 2020.