



COMPARAÇÃO DE MODELOS DE PREVISÃO DE GERAÇÃO DE METANO EM ATERROS SANITÁRIOS BRASILEIROS PARA O SEU APROVEITAMENTO ENERGÉTICO

Nara Maria de Oliveira Dornela (*), Beatriz Palhares Zschaber Faria², Viviane Jin Hee Kim³, Eduardo Coutinho de Paula □

* Universidade Federal de Minas Gerais, nara.dornela@ufjf.br

RESUMO

O aproveitamento energético a partir de resíduos sólidos urbanos (RSU) é atrativo e está em crescimento por diversos fatores, como o aumento da demanda por energia, cumprimento de uma agenda global em promoção da sustentabilidade e redução dos gases de efeito estufa (GEE), como o gás metano que é gerado na decomposição da fração orgânica no aterramento dos RSU. O aterro sanitário, considerado como forma de destinação final ambientalmente adequada pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), é a opção de disposição mais adotada no Brasil, em virtude do seu caráter econômico e ambiental. No entanto, o uso energético deste gás ainda é pouco explorado no país. Neste sentido, este trabalho tem o objetivo de analisar comparativamente três modelos de previsão de metano – IPCC; LandGEM e CETESB, para estimativa do potencial energético de biogás de aterro sanitários brasileiros. Após verificar as vantagens e limitações entre os modelos apresentados constatou-se que o desenvolvido pelo IPCC é o mais interessante e robusto por buscar uma estimativa mais próxima à realidade. Porém, há dificuldade em se obter grande parte dos dados e parâmetros de entrada solicitados, tendo em vista o contexto do país, caracterizado por restrições de monitoramento e pesquisa, falta de transparência e ausência de recursos para obtenção desses dados. Ademais, apesar da grande similaridade com o modelo proposto pela CETESB, o LandGEM foi considerado como mais adequado, pois este último busca/visa uma maior margem de segurança e a sustentabilidade econômico-financeira da infraestrutura a ser implantada, uma vez que o primeiro, comparado a esse, superestima a geração de metano. Por fim, ressalta-se a urgência de maior sistematização e acessibilidade aos dados operacionais dos aterros no país, além da adoção de parâmetros mais característicos às condições climáticas brasileiras, em detrimento dos indicados pelos modelos analisados, pois inclusive o proposto pela CETESB, sugere coeficientes em seus respectivos equacionamentos segundo características de outras regiões, o que influencia diretamente em seus resultados.

PALAVRAS-CHAVE: Biogás, Aproveitamento Energético, Modelos de Previsão.

ABSTRACT

The energy recovery from municipal solid waste (MSW) is attractive and is expanding due to several factors, such as the increased demand for energy, and the implementation of the global agenda to promote sustainability and to reduce greenhouse gases (GHG), as methane, which is generated from the decomposition of organic matter. The sanitary landfill, considered as an environmentally suitable waste disposal by the Brazilian National Policy on Solid Waste (PNRS), is the most widely adopted method in Brazil, due to its economic and environmental aspects. However, the energy use of this gas is still under-exploited in the country. In this sense, the objective of this study is to comparatively analyze three models to forecast methane - IPCC; LandGEM and CETESB, estimating the energy potential of landfill biogas in Brazil. After analyzing advantages and constraints between these models, it was verified that the IPCC model is the most interesting and robust because it seeks an estimate closer to reality. However, it is difficult to obtain most of the requested data and input parameters, given the country's context, defined by constraints in monitoring and research, and lack of transparency and resources to obtain this data. Furthermore, despite the considerable similarity with the model proposed by CETESB, LandGEM was more suitable, since it aims for a greater margin of safety and economic and financial sustainability of the infrastructure to be implemented, since CETESB model, compared to this, overestimates methane generation. Finally, the urgency of greater systematization and accessibility to the operational data of landfills in the country is emphasized, in addition to the adoption of parameters more characteristic to Brazilian climatic conditions, to the detriment of those indicated by the models analyzed, since even the one proposed by CETESB, suggests coefficients in their respective equations according to features of other regions, which directly influences their results.

KEY WORDS: Biogas, Energy Recovery, Forecasting Model.



INTRODUÇÃO

A produção, destinação e disposição de resíduos sólidos urbanos (RSU) geram diversos impactos socioambientais negativos, como por exemplo a emissão de gases de efeito estufa (GEE), subproduto das etapas de coleta e transporte destes resíduos e decomposição da sua fração orgânica. O metano (CH₄) é um poderoso GEE com seu potencial de contribuição para o aquecimento global de 28 a 34 vezes maior do que o do dióxido de carbono (CO₂) (ALLEN, 2016), e este é o principal dos gases constituintes do biogás gerado em locais de disposição final de resíduos sólidos.

Nos países em desenvolvimento, o gerenciamento de resíduos sólidos urbanos é um grande desafio a ser enfrentado e, no caso do Brasil, o aterramento é a opção de disposição mais comum, em virtude da sua abrangência territorial e do seu caráter econômico e ambiental. Dessa forma, o aproveitamento de resíduos como fonte de geração de energia renovável constitui-se como um atrativo e está em crescimento (GHOSH *et al.*, 2019), até mesmo pelos incentivos fiscais aplicados a esse tipo de geração (LIMA *et al.*, 2018) e pela implementação do mercado de carbono pelos Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL) (SILVA *et al.*, 2020).

Lima *et al.* (2018) avaliaram o potencial inexplorado do uso energético no Brasil e constataram que, considerando os 701 aterros sanitários em operação (ano referência 2014), o potencial energético seria 4,2 vezes maior do que a capacidade total instalada no país. Ao passo que considerando consórcios intermunicipais, esse potencial seria ainda maior e representaria 60% da matriz energética total brasileira. Apesar deste grande potencial energético, apresentado pelos autores, o Brasil possui poucas plantas que realizam este aproveitamento energético, e segundo Nascimento *et al.* (2019), o conhecimento sobre o real potencial do biogás ainda é pequeno devido ao uso de metodologias distintas e dados desatualizados ou insuficientes sobre os resíduos.

Entre as metodologias distintas supracitadas, estão os modelos de estimativa de produção de biogás. Estes modelos preveem a emissão de metano contido no biogás gerado por meio da decomposição anaeróbia da fração orgânica dos RSU. Há diversos modelos que estimam a produção de biogás em aterros sendo que os mais usados envolvem modelos de cinética de primeira ordem, que consideram a emissão de metano decrescente e exponencial ao longo do tempo, como: modelo do IPCC de decaimento de primeira ordem (IPCC FOD); o modelo de emissões de gases de aterro Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) desenvolvido pela Environmental Protection Agency (EPA) dos Estados Unidos; o modelo GasSim, desenvolvido pela Agência Ambiental da Inglaterra e do País de Gales; além do modelo Biogás desenvolvido pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB); entre outros.

Cada um desses modelos possui características e limitações específicas, que podem fornecer resultados diferentes nas estimativas de produção de biogás e dificultar a aplicação em todos os aterros, sem considerar fundamentos locais (SILVA *et al.*, 2020). Portanto, a fim de investigar melhor sobre o potencial do aproveitamento dessa fonte bioenergética, o objetivo do presente trabalho é realizar análise comparativa entre os principais modelos existentes na literatura para estimativa do potencial energético de biogás de aterro sanitários brasileiros, com vistas a apontar aquele considerado como mais viável para aplicação no contexto brasileiro/nacional.

OBJETIVOS

OBJETIVO GERAL

Comparação de modelos de previsão de geração de metano em aterros sanitários, visando o aproveitamento energético, e identificação do mais adequado para o contexto brasileiro.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Seleção dos modelos mais disseminados na literatura.
- Levantamento das vantagens e desvantagens de cada.
- Identificação do modelo mais adequado para o Brasil.

METODOLOGIA

A primeira fase deste estudo consistiu na busca por artigos publicados a partir do ano de 2016, no banco de dados do “Google Scholar”, utilizando como palavras de busca “Landfill Biogas Potencial”. Após a leitura dos resumos dos



trabalhos, selecionaram-se aqueles cujo objetivo foi estimar o potencial de geração de biogás de um aterro sanitário e identificar os diferentes modelos existentes para esta finalidade.

Realizou-se a listagem de diferentes modelos observados, dentre os quais, selecionaram-se três para estudo e descrição detalhada, apontando a motivação desta escolha. Posteriormente, fez-se uma análise crítica e comparativa entre eles, a partir da descrição dos seguintes aspectos:

- i. Definição do modelo
- ii. Princípios de equacionamento
- iii. Parâmetros de entrada
- iv. Vantagens/benefícios
- v. Desvantagens/limitações
- vi. Observações/recomendações
- vii. Referências de estudos que aplicaram o modelo

Por fim, apontou-se o método considerado mais adequado para o emprego, no contexto brasileiro, tendo em vista o cenário indesejável e tendencioso, caracterizado pelas limitações e ausência de recursos para obtenção de dados/parâmetros de entrada dos modelos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os três modelos selecionados para este estudo de caso foram IPCC, LandGEM e CETESB. A motivação desta escolha e listagem de estudos que utilizaram tais modelos, são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1. Apresentação e referências de aplicação dos modelos selecionados na atual pesquisa.
Fonte: Autores, 2021.

Modelo	Motivação	Referências de aplicação
IPCC	Modelo desenvolvido pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas, entidade importante para as questões de mudanças climáticas. Ademais, é amplamente empregado.	Nojedehi <i>et al.</i> (2016); Ghosh <i>et al.</i> (2019); Santos, Romanel e Van Elk (2017); Silva <i>et al.</i> (2020)
LandGEM (EPA)	Modelo difundido e aceito no âmbito científico, também, é amplamente empregado.	Coskuner <i>et al.</i> (2020) e Santos <i>et al.</i> (2019)
CETESB	Apesar de adotado em apenas um estudo de caso, dentre os trabalhos identificados, trata-se de um modelo desenvolvido no Brasil, território foco desta pesquisa.	Lima <i>et al.</i> (2018)

MODELO FOD DO IPCC

O modelo do IPCC (em inglês, Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas), FOD (First Order Decay, decaimento de primeira ordem, em inglês) é um modelo para estimar as emissões de CH₄ em aterros que considera que o componente orgânico degradável (carbono orgânico degradável, DOC) na massa de resíduos decai lentamente ao longo do tempo, produzindo o CH₄ e o CO₂. Caso as condições sejam constantes, a taxa de produção de CH₄ depende apenas da quantidade de carbono restante nos resíduos, conseqüentemente, as emissões de CH₄ de resíduos no aterro sanitário são mais altas nos primeiros anos após a deposição e depois diminuem gradualmente à medida que o carbono degradável é consumido pelas bactérias responsáveis pela decomposição (IPCC, 2006).

Apesar da produção CH₄ e CO₂ na massa de resíduos do aterro ser resultado de diversas e complexas reações em cadeia e paralelas, estudos de laboratório e de campo mostraram que, no fim, a decomposição em CH₄ pode ser aproximada a uma reação de primeira ordem (IPCC, 2019), justificando a adoção de um modelo mais simples pelo IPCC.

É importante ressaltar que uma base de dados e uma série histórica mais consistente permite uma estimativa mais real. Sabe-se que as “meias-vidas” variam de acordo com o tipo de resíduo, resultando em anos de diferença. Assim o modelo



FOD exige que os dados sejam coletados ou estimados para descarte histórico de resíduos durante um período de 3 a 5 meias-vidas para um resultado aceitável e preciso. Portanto, é considerada uma boa prática usar dados de disposição de resíduos de pelos menos 50 anos para um resultado mais refinado (IPCC, 2006).

Para a aplicação do modelo, há alguns processos a serem seguidos até mesmo de acordo com a quantidade de informação disponível para a estimativa de produção de biogás. O guia do modelo apresenta três caminhos diferentes a serem seguidos: o primeiro, Tier 1, relativo ao uso de dados de atividade e parâmetros padrões, disponíveis na literatura e presentes no guia; o Tier 2, utiliza alguns parâmetros padrões e requer dados de boa qualidade relativos à atividade e séries históricas locais; e o último, Tier 3, fundamentado no uso de dados de atividade específicos de cada localidade, seja usando parâmetros-chave desenvolvidos no local ou parâmetros derivados de medição direta (IPCC, 2006). Todos apresentam equacionamento descrito no manual do IPCC e, de modo simplificado, são expostos no Quadro 2, posteriormente.

Portanto, o primeiro caminho, o Tier 1, resulta no uso do “método padrão” do IPCC, que incorpora equações para estimativa de emissões de metano de biogás, em que se calcula a produção total de CH₄ dos resíduos depositados até um determinado ano (NOJEDEHI *et al.*, 2016; GHOSH *et al.*, 2019). Esse caminho pode não ser tão realístico por assumir que todo o metano potencial é gerado no mesmo ano que o resíduo é disposto no aterro (GHOSH *et al.*, 2019), enquanto os outros caminhos, o Tier 2 e 3, usando o método de FOD, são mais robustos por serem capazes de produzir um perfil de emissão dependente do tempo, ou seja, que indica a tendência de degradação ao longo do tempo (NOJEDEHI *et al.*, 2016).

O potencial de metano gerado ao longo dos anos pode ser estimado com base nas quantidades e composição dos resíduos dispostos no aterro e nas práticas de gerenciamento de resíduos sólidos (IPCC, 2019). Para isso, quantifica-se a parcela de carbono orgânico que será degradada sob condições anaeróbicas na massa de resíduos do aterro, a partir da variável DDOC_m – massa de DOC decomponível depositado.

Como é a reação de primeira ordem que descreve o modelo, a quantidade de produto é sempre proporcional à quantidade de material reativo, ou seja, o ano no qual o resíduo é depositado no aterro é irrelevante para a quantidade de metano que é gerado cada ano. Assim, somente a massa total de material em decomposição atualmente disposta que importa (IPCC, 2019).

Como citado anteriormente, com base no processo a ser seguido, escolhido conforme as informações específicas disponíveis em relação à área de estudo, as diretrizes do IPCC, oferecem valores para a constante de decaimento e de outros parâmetros para o cálculo da massa de carbono degradável sob condições anaeróbicas, de acordo com diferentes tipos de resíduos, condições ambientais e de gerenciamento do local de disposição (SANTOS; ROMANEL; VAN ELK, 2017).

A fim de facilitar a estimativa de produção de metano, o IPCC desenvolveu e disponibilizou um modelo de planilha simples com base nas equações apresentadas em seu guia. Segundo o IPCC (2019), a planilha, com extensão do Microsoft Excel, mantém um total contínuo da quantidade de massa de carbono orgânico degradável – DOC, no local de disposição, levando em consideração a quantia depositada a cada ano e a quantia restante dos anos anteriores sendo usado, assim, para calcular a quantidade de DOC que se decompõe em CH₄ e CO₂ a cada ano (IPCC, 2019).

Assim, como as diretrizes expostas no guia, a planilha permite a definição do tempo de atraso entre a disposição do resíduo e o início da produção de CH₄, sendo esse atraso de normalmente seis meses e se considera uma boa prática a escolha de um valor com esse limite de meses, caso contrário, deve-se ter evidência científica se for escolher um atraso superior ao recomendado (SANTOS; ROMANEL; VAN ELK, 2017; IPCC, 2006). Além desse e outros parâmetros, o modelo requer dados de *input* como a estimativa populacional atendida pelo aterro sanitário e a geração de resíduos sólidos urbanos *per capita* por ano (SILVA *et al.*, 2020; IPCC, 2006).

O fluxo empregado no modelo é basicamente o cálculo da quantidade de CH₄ gerado a partir do DDOC_m e subtrair o CH₄ recuperado e o CH₄ oxidado no material de cobertura para fornecer a quantidade de CH₄ emitida (IPCC, 2019). Além disso, a planilha do modelo fornece duas opções para a estimativa das emissões de RSU de acordo com a disponibilidade de dados: a primeira é descrita em um modelo multifásico baseado em dados de composição de resíduos, sendo que as quantidades de cada tipo de material degradável (resíduos de alimentos, jardins e parques, papel e papelão, madeira, têxteis etc.) no RSU são registradas separadamente; já a segunda, é o modelo monofásico baseado na massa de RSU (IPCC, 2019). Se não houver informações locais sobre a massa de resíduos, é recomendado usar a composição disponibilizada pelo IPCC no guia.



Por meio de um estudo realizado no sul do Brasil usando modelos de decaimento de primeira ordem, Silva *et al.* (2020), descrevem as vantagens e desvantagens do modelo. As vantagens do modelo FOD do IPCC são que ele estima valores similares aos encontrados na literatura, inclusive por considerar a composição gravimétrica de resíduos, a aplicação dele é de baixo custo e permite a observação rápida de resultados. Além disso, ele é um modelo eficiente e é utilizado para o desenvolvimento de inventários de emissão, o que reduz as estimativas de geração de biogás de aterro, já que no estudo, modelos como LandGEM, superestimaram essa produção, como será discutido no decorrer do presente trabalho. Em relação às desvantagens, há incompatibilidade com os dados dos aterros sanitários brasileiros e o modelo requer a inserção de dados difíceis de serem encontrados no contexto do Brasil.

LANDGEM (USEPA)

O *Software* LandGEM (*Landfill Gas Emissions Model*) foi desenvolvido em 2005 pela agência de proteção ambiental dos Estados Unidos da América (*United States Environmental Agency Protection – USEPA*). Este programa é uma extensão do Microsoft Excel, isto é, uma ferramenta automatizada, e é o mais utilizado nos Estados Unidos. Inclusive, possui um manual do usuário e um livro guia para o desenvolvimento de projetos de energia de gás de aterro (USEPA, 2020; ALEXANDER, BURKLIN e SINGLETON, 2005).

O programa utiliza equações, descritas em seu manual e com taxa de decaimento de primeira ordem para calcular as estimativas de geração de metano e outros gases nos aterros sanitários, permitindo assim, estimar o volume que será gerado em um determinado tempo. Os parâmetros deste modelo estão expostos no Quadro 2.

Por ser uma equação de primeira ordem, os resultados dependem fortemente dos parâmetros de entrada, ou seja, a escolha destes deve ser feita de forma minuciosa para que o resultado seja confiável (SANTOS *et al.*, 2019). Inclusive, Coskuner *et al.* (2020) recomendam que os dados utilizados sejam do próprio aterro sanitário em análise. Ademais, de acordo com o USEPA (2020), o modelo considera que o pico de geração dos gases ocorre logo após o estabelecimento das condições anaeróbicas no aterro e que após este instante, a taxa de geração decresce exponencialmente.

A grande vantagem de aplicar esse modelo é a disponibilidade do *software* como uma extensão do Microsoft Excel gratuitamente (EPA, 2020), sendo o único requisito para seu uso, a versão do Excel ser no mínimo a 97. Outro ponto positivo é a possibilidade de utilizar como variáveis de entrada dados já disponíveis, dispensando a sua coleta, o que implica em menores custos para a elaboração de um projeto de recuperação energética do biogás de aterro. Por fim, destaca-se a simplificação de seu uso, sendo necessárias poucas informações de entrada.

No entanto, sua grande limitação é a disponibilidade dos dados relacionados à quantidade e composição dos resíduos sólidos depositados no aterro em análise. Qualquer variação na operação do aterro não é considerada, e isso poderá implicar na alteração da taxa de geração do biogás. Por exemplo, os aterros operados sob condições úmidas com recirculação de chorume ou outros líquidos resultará em uma geração de gás com maior volume e quantidade do que o estimado pelo modelo. Além disso, a própria EPA (2005) reconhece como limitações os seguintes fatores:

- Pressupostos imprecisos: podem resultar em erros grosseiros;
- Dados insuficientes ou de baixa qualidade: referente à disposição dos resíduos e eficiência de coleta dos resíduos;
- Composição dos resíduos: normalmente este dado não está disponível;
- Estrutura do LandGEM: na mesma simulação não é possível alterar os valores de k (taxa de geração de metano) e L_0 (capacidade potencial de geração de metano).

Por fim, identifica-se também como limitação deste modelo o fato de não se considerar possíveis diferenças na composição dos resíduos depositado ao longo do tempo. É muito provável que a gravimetria dessa massa depositada no aterro altere com o passar dos anos, seja pelo desenvolvimento tecnológico e de novos produtos ou pela própria mudança do padrão de consumo da população da região. Isto fica claro ao comparar o padrão de consumo da década de 90 e nos últimos anos.

Analisando os estudos de Coskuner *et al.* (2020) e Santos *et al.* (2019), observa-se que o primeiro se atentou mais aos parâmetros de entrada, pois os autores buscaram obter os parâmetros mais condizentes com a localização do aterro, calculando os valores para a realidade local. Apesar do manual do usuário do Landgem trazer valores tabelados para os parâmetros de entrada (k e L_0), adotar parâmetros condizentes com a área resulta em uma maior estimativa mais confiável. A constante k , neste caso, foi obtida por meio do regime pluviométrico do município e a capacidade de geração máxima de metano (L_0) foi calculada mediante o modelo IPCC. Esta última estimativa baseou-se na composição gravimétrica dos resíduos sólidos do ano de 2017, ou seja, informações atuais e da própria realidade do município. Em contrapartida, o



estudo realizado por Santos *et al.* (2019) estimou os parâmetros k e L_0 baseando nos dados do Manual para projeto de aterros em regiões de clima quente da World Bank (2004). Apesar dos dados pluviométricos e características dos resíduos serem do município em estudo, o último foi extraído do Plano de Gestão Integrada de 2014, não sendo claro como os autores estimaram de k e L_0 , o que dificulta a reprodutibilidade do estudo.

BIOGÁS, GERAÇÃO E USO ENERGÉTICO – ATERROS (CETESB)

Desenvolvido no Brasil, o programa Biogás, geração e uso energético – aterros, versão 1.0 é um dos produtos de um convênio firmado entre a CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, a Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo - SMA-SP e o Ministério da Ciência e Tecnologia - MCT, cujo objetivo foi elaborar manuais para a orientação do uso energético de biogás, publicados no Diário Oficial da União em 2001, e fomento da formação de centros para o desenvolvimento dessa atividade no país. O programa, contempla aspectos das etapas de elaboração destes projetos até a sua implantação, e emprega a linguagem de computação Visual Basic que está disponível para consulta em CD-ROM, onde também se encontra o programa executável (CETESB, 2006), além de apresentar um manual do usuário e *software* disponibilizados virtualmente no site da CETESB.

O *software* brasileiro Biogás (CETESB, 2006), é muito empregado para a estimativa do biogás de resíduos agrícolas, diferentemente do LandGEM (USEPA, 2005). Ambos os modelos apresentam muitas similaridades, pois são respaldados pelo modelo matemático de primeira ordem, cujo equacionamento encontra-se em seu manual. A diferença entre os seus equacionamentos está na sua integração (LIMA *et al.*, 2018), já que no LandGEM, a geração de metano é integrada em mais de dez períodos de 0,1 ano, produzindo uma estimativa de geração de metano um pouco menor que a fornecida pelo modelo Biogás (USEPA, 2005).

No modelo da CETESB, a estimativa de geração de metano é feita para cada porção de resíduo depositada no aterro, onde no primeiro ano ocorre o maior nível de geração, reduzindo-se com o passar dos anos. A sua intensidade de geração varia em função da composição do resíduo e da umidade do local. Dessa forma, para fazer tal estimativa, o usuário do *software* Biogás deve possuir alguns registros da operação do aterro a ser analisado.

Entretanto, os próprios autores do programa desconhecem a existência de pesquisas no Brasil a respeito dos valores k e L_0 e apontam a escassez de dados como da composição dos resíduos, expondo a necessidade de revisão de alguns destes valores para obtenção de um melhor resultado no uso do *software*. Assim, o manual do programa sugere alguns valores para os parâmetros de entrada, caso os dados do aterro em questão sejam desconhecidos. Dentre tais parâmetros, destaca-se a dificuldade em estimar o histórico do fluxo de resíduos depositadas no aterro desde a sua abertura (Rx), devido à escassez de dados dos aterros brasileiros. Lima *et al.* (2018) calcularam esse fluxo a partir de dados populacionais, alternativa menos indicada segundo o manual, mas que é justificável pelos seguintes fatores: insuficiência desses dados para a maior parte dos aterros analisados e abertura dos aterros em diferentes anos.

Ainda no estudo realizado por Lima *et al.* (2018), nota-se que os autores adotaram valores considerando a realidade local brasileira, sempre que possível, garantindo assim, maior confiabilidade aos resultados, em detrimento do uso de valores tabelados internacionais sugeridos pelo manual do Biogás (CETESB, 2006). Para cada aterro de ambos os cenários desse estudo, o parâmetro k foi calculado de acordo com a metodologia proposta pelo IPCC, considerando a localização da cidade de cada aterro para os dados de condições climáticas como temperatura, precipitação e evapotranspiração. O potencial de geração de metano (L_0) também foi calculado pelo modelo IPCC, entretanto, para esta estimativa foram utilizados valores sugeridos pelo próprio IPCC, visto que pesquisas sobre as constantes necessárias para o seu cálculo são escassas para os aterros sanitários no Brasil e nos países tropicais.

Como vantagem do programa, destaca-se que os seus comandos atendem ao público em geral, até mesmo os não familiarizados com os métodos de estimativa de geração de biogás em aterros, mesmo que sua concepção tenha sido inspirada nos programas de computador produzidos por instituições de pesquisa americanas e europeias. Além disso, seu código fonte é de livre acesso e pode ser encontrado de forma gratuita, sob a guarda da CETESB, e qualquer instituição de pesquisa ou mesmo o empreendedor podem alterá-lo, aperfeiçoando-o de diferentes maneiras (CETESB, 2006), o que torna o programa acessível, dinâmico e flexível.

Contudo, este apresenta algumas limitações apontadas no próprio manual, como a ausência de considerações sobre depreciação ou atualização financeira nas estimativas de valores e nas suas somas, considerações tributárias, dentre outras, visto que o programa traz resultados além do potencial de geração do biogás, tais como a viabilidade econômica e outros, desde a concepção até a implantação do projeto de recuperação energética. No tocante, especificamente ao cálculo da



geração de metano, pode-se apontar, como limitação, a sugestão de valores internacionais, como dados de entrada, pela escassez de estudos desses parâmetros no Brasil e até mesmo limitações internacionais sobre a composição dos resíduos. Vale frisar que, nas publicações recentes sobre a temática, pouco foi observado, no âmbito acadêmico, o uso deste modelo nos trabalhos recentes, de acordo com a busca definida na metodologia da presente pesquisa. Nesse sentido, surge o questionamento sobre o motivo de muitos dos trabalhos analisados, citarem o *software* brasileiro, mas a maior parte optar pelo uso de outro, como o LandGEM (USEPA, 2005), em detrimento desse. Uma possível justificativa pode ser devido ao fato de o próprio Biogás (CETESB, 2006), ter sido baseado neste último *software* e ambos serem um modelo de decaimento de primeira ordem, que utilizam praticamente os mesmos parâmetros para o cálculo do fluxo de metano gerado em aterros sanitários.

SÍNTESE DA ANÁLISE COMPARATIVA DOS MODELOS

Conforme exposto na descrição de cada modelo, destaca-se que ambos possuem programas de fácil compreensão, disponibilizados de forma gratuita, dos quais o CETESB emprega um *software* cujo código fonte é de livre acesso e pode ser alterado ou aperfeiçoado por qualquer instituição de pesquisa ou mesmo o empreendedor, além do mesmo contemplar todas as etapas necessárias para elaboração e implantação de um projeto de recuperação energética do biogás de aterro sanitário. Já os modelos do IPCC e USEPA, também constituem ferramentas automatizadas, e são dispostos em planilha, com extensão do Microsoft Excel, o que facilita a sua aplicação. Ademais ambos são baseados pelo decaimento de equação de primeira ordem, como indicado na Quadro 2, e, portanto, os resultados dependem diretamente dos parâmetros de entrada para obtenção de um resultado confiável e específico da área de execução do projeto.

O IPCC estima valores similares aos encontrados na literatura e a observação desses resultados é objetiva. No entanto, há incompatibilidade com os dados dos aterros sanitários brasileiros, o que é justificado devido à dificuldade de acesso aos dados de entrada do modelo para o contexto brasileiro. Já no LandGEM há indicação de valores tabelados caso não seja possível coletar os dados solicitados, apesar deste apresentar pressupostos imprecisos e ter sido desenvolvido para os aterros dos EUA. Por fim, o Biogás é acessível e com idioma português, porém, é muito similar ao LandGEM, baseado nos aterros do mesmo país, e um dos seus parâmetros (indicado pela letra F) não é definido em seu manual. Deste modo a Quadro 2 apresenta de forma compilada algumas características dos modelos analisados relacionadas aos seus princípios de equacionamento, suas aplicações e parâmetros de entrada, bem como observações consideradas pertinentes à aplicabilidade destes.

Quadro 2. Características dos modelos selecionados na pesquisa para estimativa do potencial de geração de biogás de aterros sanitários.

Fonte: Autores, 2021.

Modelo	Princípios de equacionamento	Aplicações	Parâmetros ¹	Observações/recomendações
FOD (IPCC)	Modelo de decaimento de primeira ordem	Estimar o potencial de geração de biogás de aterros sanitários	W DOC DDOC _{maT} DDOC _m decomp _T F	Coletar dados do aterro, dos resíduos (Ex.: composição gravimétrica) e utilizar dados de série histórica
LandGEM	Modelo de decaimento de primeira ordem	Estimar o potencial de geração de biogás de aterros sanitários e outras tecnologias (ex: Biodigestores)	k Lo Composição do gás (%) Mi I J Tij	Coletar dados recentes do local ou usar os valores tabelados sugeridos
Biogás	Modelo de decaimento de primeira ordem	Estimar o potencial de geração e o uso do biogás de aterros sanitários e outras tecnologias (ex: Biodigestores)	F K Lo Rx T x	Coletar dados recentes do local a ser analisado ou buscar estimá-los com o máximo de variáveis referentes ao local



Nota: 1 - W: massa de resíduos depositados; DOC: carbono orgânico degradável; DDOC_{maT}: DDOC_m acumulada no aterro no final do ano T; DDOC_m decomp_T: DDOC_m decomposta no aterro no ano T (Gg); k: taxa de geração de metano; L_o: capacidade potencial de geração do metano; M_i: massa de resíduos sólidos depositados no i-ésimo ano; T_{ij}: idade da seção j da massa de resíduos disposta no ano i. F: fator de eficiência de recuperação energética; R_x: fluxo de resíduos no ano x; T: ano de deposição do resíduo no aterro.

De acordo com o discorrido ao longo deste trabalho, vale frisar que alguns dos parâmetros, apontados na Quadro 2, requerem anos de estudos e monitoramento do aterro sanitário em questão e, muitas vezes, não são de fácil obtenção, como a taxa de geração de metano (k) e a capacidade potencial de geração de metano (L_o), que são dadas segundo as condições climáticas de cada local, bem como dados da quantidade e composição de resíduos gerados e depositada no aterro sanitário. Neste caso, o LandGEM se limita por não considerar possíveis diferenças na composição dos resíduos depositado ao longo do tempo, assim como ocorre no modelo Biogás, uma vez que este foi completamente baseado no primeiro. Este fato não ocorre ou pode ser minimizado no IPCC já que esse considera uma série de dados mais extensa e contempla o uso de dados de atividade específicos de cada localidade.

Apesar da possibilidade do emprego de ambos os modelos para a estimativa do biogás de resíduos agrícolas, além dos aterros sanitários, observa-se, segundo a literatura, que o CETESB é mais empregado no primeiro caso, diferentemente do LandGEM e do IPCC. Isso pode justificar a menor aplicação desse nos estudos de caso observados, no entanto, de modo geral, a escolha do modelo não é justificada na maior parte das pesquisas e comparações entre modelos são escassas. Portanto, após verificar as diferenças e semelhanças dentre os modelos apresentados, constatou-se que o desenvolvido pelo IPCC é o mais interessante e robusto por buscar uma estimativa mais próxima à realidade. Porém, há dificuldade em se obter grande parte dos dados operacionais dos aterros no Brasil e parâmetros de entrada solicitados no modelo, tendo em vista o contexto do país, caracterizado por restrições de monitoramento e pesquisa, falta de transparência e ausência de recursos para obtenção desses, principalmente se considerada a recomendação de utilização de uma série histórica de 50 anos visando um resultado mais refinado.

Dentre os *softwares* LandGEM e Biogás, observou-se que ambos são muito semelhantes, sendo a única diferença a integração da equação, pois no primeiro a geração de metano é integrada em mais de dez períodos de 0,1 ano. Essa pequena diferença representa uma estimativa de geração de metano um pouco inferior do que a fornecida pelo modelo Biogás. Nesse sentido, o modelo desenvolvido pela USEPA (2005) se apresenta como o mais atrativo visando a uma projeção com margem de segurança, ademais, tendo em vista a realidade brasileira, amplamente conhecida, em que há deficiências no controle rigoroso da qualidade de operação de grande parte dos aterros sanitários. Portanto, considera-se mais adequado, nestes casos, a adoção do modelo que não superestime a geração do biogás, como o LandGEM comparado ao modelo da CETESB.

CONCLUSÕES

Dado o contexto brasileiro de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos defasado e matriz energética centralizada, identifica-se como um grande potencial o desenvolvimento de estudos e projetos para o aproveitamento energético a partir do biogás de aterros sanitários. Assim, este estudo teve o objetivo de comparar três modelos de estimação da geração de biogás de aterro e identificar aquele mais adequado para o Brasil.

A análise dos modelos selecionados para este estudo permitiu identificar que o proposto pelo IPCC é o mais robusto, por se atentar à biodegradabilidade do resíduo depositado no aterro e buscar ao máximo aproximar os parâmetros para a realidade local. Entretanto, no caso do Brasil, as informações necessárias para a aplicação do modelo não são de simples obtenção, principalmente se considerada a recomendação de utilização de uma série histórica de 50 anos para obter um resultado mais refinado.

Assim, concluiu-se que o modelo desenvolvido pela USEPA, LandGEM, é o mais recomendado para estimar o potencial de geração de biogás de aterro dentro do contexto brasileiro. Isso porque ele já está bem consolidado no mundo acadêmico, seu uso é simples e os dados necessários são mais acessíveis. Ademais, apesar da grande similaridade com o modelo proposto pela CETESB, o LandGEM foi considerado como mais adequado, visando a uma maior margem de segurança e a sustentabilidade econômico-financeira da infraestrutura a ser implantada, uma vez que o primeiro, comparado a esse, superestima a geração de metano.

Por fim, considera-se como necessário o desenvolvimento de um modelo compatível às condições físicas do Brasil, devendo considerar também as diferenças regionais, uma vez que o território nacional é bastante extenso e as condições climáticas variam bastante, como a temperatura média anual e o regime pluviométrico.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALLEN, Grant. **Rebalancing the global methane budget**. Nature, v. 538, n. 7623, p. 46-48, out. 2016. Springer Science and Business Media LLC.
2. ALEXANDER, A., BURKLIN, C., SINGLETON, A. **Landfill Gas Emission Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide**. Washington, DC, 2005.
3. COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). 2006. **Biogás: geração e uso energético – versão 1.0/Cetesb**. São Paulo: CETESB. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/biogas/softwares/>>. Acesso em: 7 de janeiro de 2021.
4. COSKUNER, Gulnur; JASSIM, Majeed s; NAZEER, Nauman; DAMINDRA, Galbokka H. **Quantification of landfill gas generation and renewable energy potential in arid countries: case study of bahrain**. Waste Management & Research, p. 337, 20 jun. 2020. SAGE Publications.
5. GHOSH, Pooja; SHAH, Goldy; CHANDRA, Ram; SAHOTA, Shivali; KUMAR, Himanshu; VIJAY, Virendra Kumar; THANKUR, Indu hekhar. **Assessment of methane emissions and energy recovery potential from the municipal solid waste landfills of Delhi, India**. Bioresource technology, v. 272, p. 611-615, 2019.
6. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006 **IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories**. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). 2006. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Hayama, Japan. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>>.
7. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2019 **Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**, Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. and FEDERICI, S. (eds). 2019. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Switzerland. Disponível em: <<https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019r/f/vol5.html>>.
8. LIMA, Rodolfo M.; SANTOS, Afonso H.M.; PEREIRA, Camilo R.s.; FLAUZINO, Bárbara K.; PEREIRA, Ana Cristina O.s.; NOGUEIRA, Fábio J.H.; VALVERDE, José Alfredo R. **Spatially distributed potential of landfill biogas production and electric power generation in Brazil**. Waste Management, v. 74, p. 323-334, abr. 2018. Elsevier BV.
9. NASCIMENTO, Maria Cândida Barbosa; FREIRE, Elciros Pimenta; DANTAS, Francisco de Assis Souza; GIANSANTE, Miguel Bortoletto. **Estado da arte dos aterros de resíduos sólidos urbanos que aproveitam o biogás para geração de energia elétrica e biometano no Brasil**. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 24, n. 1, p. 143-155, fev. 2019. FapUNIFESP (SciELO).
10. NOJEDEHI, Pedram; HEIDARI, Mohammad; ATAIEI, Abtin; NEDAEI, Mojtaba; KURDESTANI, Elnaz. **Environmental assessment of energy production from landfill gas plants by using Long-range Energy Alternative Planning (LEAP) and IPCC methane estimation methods: a case study of tehran**. Sustainable Energy Technologies And Assessments, v. 16, p. 33-42, ago. 2016. Elsevier BV.
11. SANTOS, Mauro Meirelles; ROMANEL, Celso; VAN ELK, Ana Ghislane Henriques Pereira. **Análise da eficiência de modelos de decaimento de primeira ordem na previsão da emissão de gás de efeito estufa em aterros sanitários brasileiros**. Engenharia Sanitaria e Ambiental, v. 22, n. 6, p. 1151-1162, dez. 2017.
12. SANTOS, Rafaela Ediene dos; SANTOS, Ivan Felipe Silva dos; BARROS, Regina Mambeli; BERNAL, Andressa Picionieri; TIAGO FILHO, Geraldo Lúcio; SILVA, Fernando das Graças Braga da. **Generating electrical energy through urban solid waste in Brazil: an economic and energy comparative analysis**. Journal Of Environmental Management, [S.L.], v. 231, p. 198-206, fev. 2019. Elsevier BV.
13. SILVA, Nicole Fernandes da; SCHOELER, Guilherme Pereira; LOURENÇO, Vitor Alves; SOUZA, Pierre Luz de; CABALLERO, Cassia Brocca; SALAMONI, Rafael Hollweg; ROMANI, Rubia Flores. **First order models to estimate methane generation in landfill: a case study in south brazil**. Journal Of Environmental Chemical Engineering, v. 8, n. 4, p. 104053, ago. 2020. Elsevier BV.
14. USEPA - United States Environmental Protection Agency. 2005. **Landgem – v304**. Disponível em: <www3.epa.gov/ttn/catc/dir1/landgem-v302.xls>. Acesso em: 15 de dezembro de 2020.
15. USEPA - United States Environmental Protection Agency. **Landfill Gas Energy Project Development Handbook**. Disponível em: <<https://www.epa.gov/lmop/landfill-gas-energy-project-development-handbook>>. Acesso em: 15 de dezembro de 2020.