

Análise da estimativa de emissão de gases de efeito estufa por meio dos softwares: LandGEM, GHG Protocol e IPCC

Rony Felipe Marcelino Corrêa¹
Leilane Renovato Albuquerque²
Katia Sakihama Ventura³

Poluição Atmosférica

Resumo

A disposição de resíduos sólidos em aterros sanitários é uma das formas mais empregadas nos municípios brasileiros, e tem grande potencial de geração de Gases de Efeito Estufa (GEE). Há diferentes métodos e instrumentos para estimar a quantidade de biogás gerados nesses aterros. Sendo assim, o objetivo da presente pesquisa é realizar análise da estimativa de emissão de GEE em aterros sanitários utilizando três softwares. Para simular as emissões, utilizou-se o aterro sanitário da cidade de São Carlos, SP, localizado na Fazenda Guaporé. A soma total de GEE gerados no período inventariado pelos três softwares foi de 539,5 ton./GEE, software *LandGEM*; 548,6 ton./GEE, software do *IPCC*; 559,4 ton./GEE software *GHG Protocol*. Os resultados gerados pelos softwares do *IPCC* e *GHG Protocol* foram parecidos devido às suas diretrizes de análise seguirem os mesmos procedimentos e dados de entrada.

Palavras-chave: biogás; resíduos sólidos; poluição atmosférica.

¹Doutorando, UFSCar/PPGEU – Campus São Carlos, Departamento de Engenharia Civil, ronycorrea@hotmail.com

²Enga. Civil, Leilane_renovato@hotmail.com

³Profa. Dra., UFSCar/PPGEU – Campus São Carlos, Departamento de Engenharia Civil, katiav@ufscar.br



INTRODUÇÃO

O conceito de desenvolvimento sustentável foi apresentado mundialmente em 1987 por meio do relatório Nosso Futuro Comum, pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento da Organização das Nações Unidas. De acordo com o relatório, “o desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento que encontra as necessidades atuais sem comprometer a habilidade das futuras gerações de atender suas próprias necessidades” (ONU, 2021).

Nesse sentido, torna-se necessário repensar aspectos relativos à geração e gestão de resíduos sólidos para que sejam mitigados impactos para futuras gerações. Em países em desenvolvimento, a melhoria da gestão de resíduos sólidos está diretamente relacionada à prevenção da poluição ambiental e contribui para redução de emissão de poluentes na água e solo, e também emissão de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera (ISHIGAKI *et al.*, 2011).

As etapas de transporte e disposição final de resíduos sólidos são reponsáveis pela maior parcela de geração de GEE do setor (PROTEGEER, 2018), entretanto as emissões ocorrem em quase todas etapas de gerenciamento de resíduos sólidos, sendo imperativo projetar métodos de tratamento apropriados para redução de seu impacto (KRISTANTO; KOVEN, 2019)

O gás gerado em aterros sanitários é composto por aproximadamente 50 por cento de metano (CH₄) e 50 por cento dióxido de carbono (CO₂) e uma pequena quantidade de compostos orgânicos não metânicos, podendo ser capturado, convertido e utilizado como recurso de energia renovável (EPA, 2021).

Os gases que aquecem a atmosfera são conhecidos como Gases de Efeito Estufa (GEE). Entre eles, destacam-se gás carbônico (81%), metano (9,5%), óxido de nitrogênio (6,5%) e gases fluorados (3%), segundo o total de GEE emitidos em 2018 (EPA, 2018).

Os softwares mais conhecidos para estimativa de emissão de GEE são *Landfill Gas Emissions Model (LandGEM)*, *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* e *Protocol Greenhouse Gas Protocol (GHG)*.

O *LandGEM* estima a emissão de gases provenientes de aterro sanitário com

interface ao Microsoft Excel e pode ser usada para estimar as taxas de emissão do metano, dióxido de carbono, compostos orgânicos não-metânicos e poluentes atmosféricos individuais de aterros municipais de resíduos sólidos. O software foi desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental do Estados Unidos (*United States Environmental Protection Agency* - USEPA).

No modelo *LandGEM*, os padrões de inventário são baseados em fatores de emissão na compilação da USEPA de fatores de emissão de poluentes do ar (AP-42) e pode ser usado para gerar estimativas de emissão para uso em inventários de emissões e licenças de ar na ausência de dados de teste específicos do local (ALEXANDER; BURKLIN; SINGLETON, 2005).

O software do IPCC estima a emissão de CH₄ dos locais de disposição de resíduos sólidos pela decomposição de primeira ordem. Este modelo pressupõe que o componente orgânico degradável (carbono orgânico degradável) presente nos resíduos deteriora lentamente durante algumas décadas, formando CH₄ e CO₂ (PENMAN *et al.*, 2006).

O software *GHG Protocol* foi desenvolvido pelo *World Resources Institute* (WRI) em associação com o *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD). É a ferramenta mais utilizada por empresas e governos a fim de entender, gerenciar e quantificar suas emissões. A metodologia adotada é compatível com as normas da ISO (*International Organization for Standardization*) e com as metodologias do IPCC (FGV, 2017).

Dessa forma, considerou-se como hipótese que os softwares *LandGEM*, *IPCC* e *GHG* geram estimativa de emissão de GEE distintos devido à diversidade dos parâmetros de entrada. O objetivo da presente pesquisa é realizar análise da estimativa de emissão GEE em aterros sanitários utilizando três softwares, adotando como referência o aterro sanitário de São Carlos, SP.



METODOLOGIA

Para a simulação dos softwares, utilizou-se o aterro existente em São Carlos, localizado na Fazenda Guaporé (Figura 1), distante aproximadamente 15 km do centro da cidade (REGATTIERI, 2009) e com área total de 10,64 hectares (FERREIRA, 2010).



Figura 1. Localização da área de estudo, São Carlos, SP
Fonte: Elaborado pelos autores - Imagem: DigitalGlobe© (Google Earth, 2018).

O aterro sanitário foi projetado para receber os resíduos sólidos domiciliares coletados pelos serviços de coleta regular do município. Resíduos de origem industrial ou comercial que apresentam potencial de periculosidade são destinados para aterros de resíduos perigosos. Durante a operação do aterro foram dispostos, em média, 6000 m³ mensais, cerca de 145 toneladas por dia (FERREIRA, 2010).

Segundo o mesmo autor, o aterro foi inaugurado em junho de 1989 e, a partir de 1995, teve sua administração realizada por empresa privada. Em 2008, deram-se início às obras da terceira ampliação do aterro, com previsão de vida útil de 25 meses. Após o

esgotamento dessa célula, o aterro foi encerrado.

A Tabela 1 apresenta a quantidade de resíduos sólidos depositadas no aterro ao longo da vida útil de sua operação.

Tabela 1. Quantidade de resíduos aterrada durante os anos

Ano	Total annual coletado (kg)	Total annual disposto no aterro (Kg)	Média mensal aterrada (Kg)
1995	-	22423,26	3203,32
1996	41744,53	20962,23	3493,71
1997	45064,04	45064,04	3755,34
1998	45794,13	45794,13	3816,18
1999	46826,23	55578,14	4631,51
2000	48423,79	57478,23	4789,85
2001	49210,39	57954,02	4829,50
2002	50118,10	56291,08	4330,08
2003	46218,69	51987,27	3999,02
2004	47818,10	52965,23	4074,25
2005	49280,12	55782,57	4290,97
2006	52389,18	55782,57	4290,97
2007	34944,73	50508,26	4591,66
2008	18714,51	22270,82	4454,16
2009	46410,96	52539,27	5253,93

Fonte: Ferreira (2010)

A Tabela 2 apresenta a caracterização física dos resíduos domiciliares depositados no aterro de São Carlos, SP.

Tabela 2. Caracterização gravimétrica dos resíduos sólidos de São Carlos, SP

Resíduos Sólidos (%)	Matéria Orgânica	Papel e Papelão	Embalagem cartonada	Vidro	Metais e alumínio	Plásticos	Rejeitos
	59,08	6,44	0,94	1,67	1,31	10,47	20,09

Fonte: Frésca *et al.* (2008)

Para estimativa populacional de São Carlos, SP, a fim de realizar as projeções, foram utilizados dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).



RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta a taxa de produção/emissão (t/ano) de metano e dióxido de carbono pelo software *LandGEM*, no período considerado.

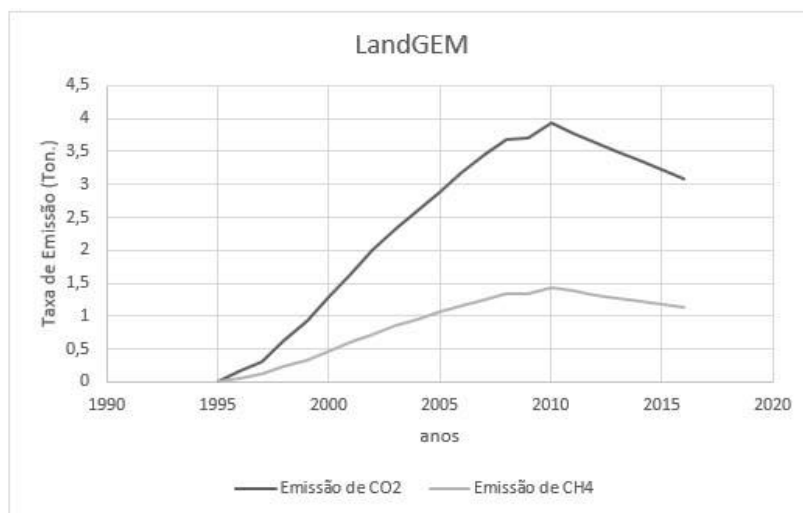


Figura 2. Taxa de emissão de dióxido de carbono e metano estimadas pelo LandGEM
Fonte: autores (2021)

A Figura 2 apresenta que as máximas produções de metano e dióxido de carbono ocorreram no ano de 2010, sendo produzidas 3,9 e 1,4 toneladas anuais, respectivamente. Observa-se que após esse período a taxa de emissão entra em declínio. Isso é justificado pelo encerramento de disposição de resíduos sólidos no aterro sanitário no ano de 2009. A partir do momento em que o aterro parou de receber resíduos (2010) até o ano inventariado (2016) ocorreu uma redução de 21% na emissão de gases.

Os softwares do IPCC e *GHG Protocol* seguem as mesmas diretrizes e dados de entrada, o que torna compreensível a obtenção de resultados similares (Figura 3).

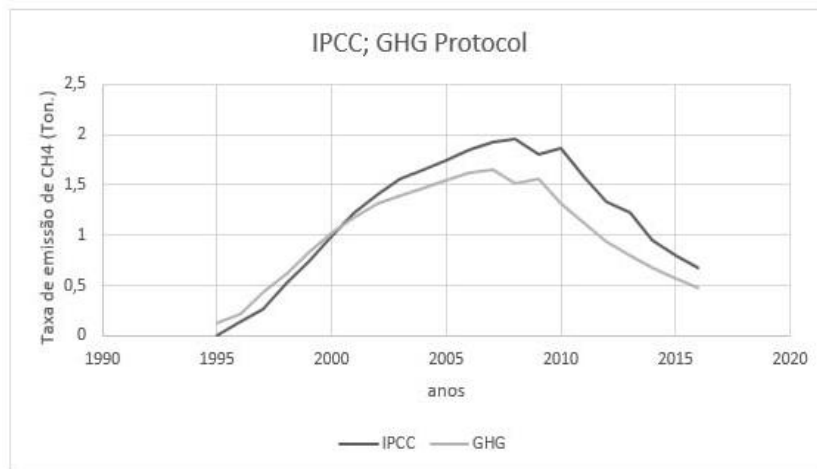


Figura 3. Taxa de emissão de metano estimadas pelo software do IPCC e GHG Protocol.
Fonte: autores (2021)

Ao contrário do *LandGEM*, os dois softwares (*IPCC* e *GHG Protocol*) tiveram seus maiores picos de emissão de metano no ano de 2007, tendo uma taxa de emissão de 1,9 e 1,65 toneladas de metano, respectivamente.

No ano de 2008, houve um declínio referente ao fato do aterro ter recebido pouco menos da metade dos resíduos sólidos que vinha recebendo nos anos anteriores. Com esses softwares, foi observada redução nas emissões de gases de aproximadamente 65% (*IPCC*) e 82% (*GHG Protocol*), comparando o ano de maior emissão (2007) até o ano inventariado (2016).

A Figura 4 apresenta um comparativo entre os três softwares com relação à taxa de emissão de GEE. Os softwares do *IPCC* e *GHG Protocol* já contabilizam seus resultados de emissões de GEE (ou dióxido de carbono equivalente – CO₂eq).

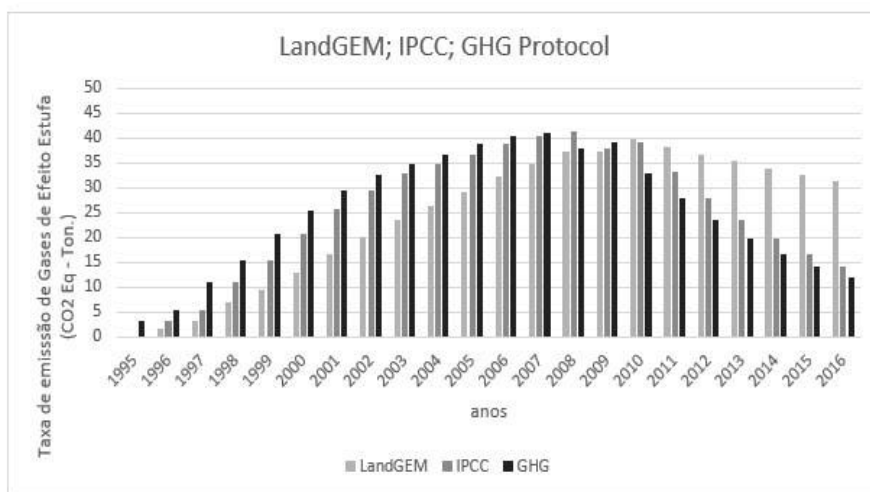


Figura 4. Comparativo da taxa de emissão de gases de efeito estufa (CO₂Eq) pelos três softwares.
Fonte: autores (2021)

As taxas de emissões máximas dos softwares foram semelhantes, porém ocorrendo em anos distintos: i) *LandGEM*: 39,8 ton./GEE, ano de 2010; ii) *IPCC*: 41,3 toneladas, ano de 2008; iii) *GHG Protocol*: 41,1 toneladas, ano de 2007.

Analisando o fim das atividades de disposição de resíduos sólidos, que ocorreu no ano de 2010, até o ano inventariado de 2016, por meio dos três softwares, pode-se observar uma redução na emissão de GEE de 8,5 toneladas (*LandGEM*), 27,2 toneladas (*IPCC*) e 29,3 toneladas (*GHG Protocol*). Observa-se que a emissão de gases ao longo dos anos tem uma evolução diferenciada entre o *LandGEM* e os outros dois softwares. Entretanto o resultado total final é semelhante.

A soma total de GEE gerados no período inventariado (1995-2016) pelos três softwares foi de 539,5 ton./GEE, software *LandGEM*; 548,6 ton./GEE, software do *IPCC*; 559,4 ton./GEE software *GHG Protocol*. Isso significa que a produção total foi muito próxima, mas a variação anual foi distinta.

CONCLUSÕES

A partir da análise das estimativas de GEE através dos softwares foi possível confirmar a hipótese inicial de que os softwares geram resultados finais distintos. Entretanto tais diferenças não são significativas.

Verificou-se que os três softwares apresentaram taxas máximas e produções totais de emissões de GEE semelhantes.

Os softwares do *IPCC* e *GHG Protocol* utilizam basicamente a mesma base metodológica.

No entanto, cabe observar que o software *LandGEM* considera que o aterro sanitário desativado ainda tem potencial de geração de GEE por mais um período de tempo, enquanto que os outros dois softwares reduziram drasticamente o potencial de emissão GEE após encerramento das atividades.

REFERÊNCIAS

ALEXANDER A.; BURKLIN C.; SINGLETON A. Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide. U.S. Environmental Protection Agency. Office of Research and Development Washington, DC. 2005

EPA United States Environmental Protection Agency. Basic Information about Landfill Gas EPA, 2018. Overview of Greenhouse Gases. Disponível em: <<https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>> Acesso em: 16 de fevereiro de 2021.

FERREIRA, A. G. Estudo dos lixiviados das frações do aterro sanitário de São Carlos-SP por meio da caracterização físico-química. 2010. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

FGV, 2017, Contabilização, Quantificação e Publicação de Inventários Corporativos de Emissões de Gases de Efeito Estufa. Fundação Getúlio Vargas. Disponível em: <<http://www.ghgprotocolbrasil.com.br>> Acesso em: 16 de fevereiro de 2021.

FRÉSCA, F. R. C.; PUGLIESI É.; MASSUKADO, L. M.; SCHALCH, V. Determinação da composição gravimétrica dos resíduos. Artigos técnicos. Revista DAE. p.48-57. 2008

GHG Protocol, 2017, Programa Brasileiro GHG Protocol. Ferramenta de Cálculo. Disponível em: <<http://www.ghgprotocolbrasil.com.br>> Acesso em: 16 de fevereiro de 2021.



IPCC Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática, 2006, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories – Chapter 3 Solid Waste Disposal. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp>> Acesso em: 16 de fevereiro de 2021.

ISHIGAKI T.; HIRATA O.; ODA T., WANGYAO K.; CHIEMCHAISRI C.; TOWPRAYOON S.; LEE D.; YAMADA M. Greenhouse Gas Emission from Solid Waste Disposal Sites in Asia. [Integrated Waste Management - Volume II](#). 2011. Disponível em: <<https://www.intechopen.com/books/integrated-waste-management-volume-ii/greenhouse-gas-emission-from-solid-waste-disposal-sites-in-asia>> Acesso em: 16 de fevereiro de 2021.

KRISTANTO, G. A.; KOVEN, W. Estimating greenhouse gas emissions from municipal solid waste management in Depok, Indonesia, City and Environment Interactions, V. 4, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590252020300088>> Acesso em: 16 de fevereiro de 2021.

ONU Organização das Nações Unidas. A ONU e o Meio Ambiente. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/91223-onu-e-o-meio-ambiente>>. Acesso em: 16 de fevereiro de 2021.

PENMAN J.; GYTARSKY M.; HIRAISHI T.; IRVING W.; KRUG T. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.

PROTEGEER Cooperação para a proteção do clima na gestão de resíduos sólidos urbanos. Como os resíduos sólidos urbanos (RSU) influenciam as mudanças climáticas? Disponível em: Acesso em: <<http://www.protegeer.gov.br/rsu/rsu-e-clima>> Acesso em: 16 de fevereiro de 2021.

REGATTIERI, C. R. Quantificação da emissão de biogás em aterro sanitário: estudo de caso do aterro sanitário de São Carlos. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA), Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide, 2005. Disponível em: <<https://www.epa.gov/catc/clean-air-technology-center-products>> Acesso em: 16 de fevereiro de 2021.