

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS
NO ATERRO CONTROLADO DO JÓQUEI CLUBE
DE BRASÍLIA/DF**

MARIA BEATRIZ DE PAULA MACEDO

**ORIENTADOR: PROF. ANDRÉ LUÍS BRASIL CAVALCANTE, D.Sc.
COORIENTADOR: PROF. LUCIANO SOARES DA CUNHA, D.Sc.**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL 2
EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

BRASÍLIA/DF: JULHO/2019

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS NO ATERRO
CONTROLADO DO JÓQUEI CLUBE DE BRASÍLIA/DF**

MARIA BEATRIZ DE PAULA MACEDO

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
BACHAREL EM ENGENHARIA AMBIENTAL.**

APROVADA POR:

**André Luís Brasil Cavalcante, D.Sc. (ENC/FT/UnB)
(Orientador / Examinador)**

**Luciano Soares da Cunha, D.Sc. (ENC/FT, UnB)
(Coorientador)**

**Luis Fernando Martins Ribeiro, D.Sc. (ENC/FT/UnB)
(Examinador Interno)**

**Manuelle Santos Góis, D.Sc. (ENC/FT/UnB)
(Examinadora Externa)**

BRASÍLIA/DF: JULHO/2019

FICHA CATALOGRÁFICA

MACEDO, MARIA BEATRIZ DE PAULA

Avaliação do Potencial de Geração de Biogás no Aterro Controlado do Jóquei Clube de Brasília/DF

ix, 119 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2017)

Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Biogás

3. Queimadores

2. *Landfill Gas Formation* (LGF)

4. Modelos de Geração de Metano

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MACEDO, M. B. P. (2019). Avaliação do Potencial de Geração de Biogás no Aterro Controlado do Jóquei Clube de Brasília/DF. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 119 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DA AUTORA: Maria Beatriz de Paula Macedo

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Avaliação do Potencial de Geração de Biogás no Aterro Controlado do Jóquei Clube de Brasília/DF

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2019

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Maria Beatriz de Paula Macedo

mbdpm9@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me guiado e estado comigo em todos os momentos ao longo da minha vida. Reconheço que possuo inúmeras limitações, mas que tudo o que foi produzido foi sob a luz de sua Inteligência Infinita.

Agradeço à minha mãe, Letícia, ao meu pai, Roberto, e ao meu irmão, Betinho. Também aos meus avós (Laura, Getúlio, Roberto e Flavita), às minhas tias e tios, que muito amo e admiro, aos meus padrinhos queridos, aos meus primos, motivos de imensa alegria, e a todos os familiares que me acompanharam em minha vida e fizeram com que eu pudesse chegar aonde estou agora. Meu objetivo é trabalhar sempre para poder trazer muito orgulho para vocês.

Ao Projeto de Remediação Ambiental, Energética e Sustentável para Aterros (RAEESA), do qual fiz parte nesse período, contratado e financiado pela CEB Lajeado, Geração e ANEEL, que contou com a parceria do corpo técnico da UnB e da Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos (Finatec). Aos professores André Brasil e Luciano Soares, por essa oportunidade e auxílio com os dados de campo. Emendo com um agradecimento a todo o grupo RAEESA, com um destaque especial aos mestres Mariana Diniz e Felipe Nisiyama. À Mari por ser brilhantíssima, por me iluminar com dados, por contribuir enormemente com o meu trabalho, pelas longas conversas e por ter se tornado não só uma inspiração de profissional para mim, mas também uma amiga muito querida. Ao Felipe, pelas ótimas dicas e por também ser um profissional cuja contribuição foi de imensa importância para a equipe como um todo.

Ao meu namorado, André Almeida, obrigada por me trazer alegria diariamente, por me fazer pensar claramente, por todo o tempo dedicado a mim e por todo amor. Com os melhores gestos, você não só me lembra das minhas qualidades, mas também me mostra que sempre há solução.

Faço uma dedicação especial a todos os meus amigos, pelo apoio incondicional e acolhimento nas mais diversas situações. Agradeço também a todos os que me auxiliaram de alguma forma. Aos integrantes do Grupo Geofluxo, pelas dicas recebidas. Ao Mateus Bezerra, pela enorme atenção e debate acerca de algumas equações. Ao Moisés Lemos, pela parceria no capítulo do RAEESA. Aos professores, à banca examinadora, aos meus antigos chefes e a todos os que contribuíram, de alguma forma, para que tudo isso fosse possível.

*“I got stamina.”
(Sia, 2016).*

RESUMO

O biogás é uma fonte de energia renovável que pode substituir o uso de vários combustíveis fósseis que compõem a matriz energética nacional. Entretanto, a literatura demonstra que modelos *Landfill Gas Formation* (LFG) se mostram limitados na descrição dos reais processos que ocorrem nas células de resíduos de um aterro, sendo ainda menos representativos para os locais de disposição que não tiveram sua origem planejada, como é o caso do Aterro Controlado do Jóquei Clube de Brasília/DF (ACJ). Nesse trabalho, foram feitas análises de estimativas teóricas e empíricas de metano e biogás para o ACJ. A fim de estimar o biogás gerado no ACJ no período de 1967 a 2018, foram utilizados os modelos de decaimento de primeira ordem do IPCC e do LandGEM da USEPA, através da variação da constante da taxa de geração (k) e do potencial de geração de metano (Lo), em relação a dois cenários de resíduos aterrados. Utilizou-se ainda a outra metodologia do IPCC que considera que todo o CH₄ seria liberado no ano de deposição dos resíduos. Por meio da aplicação desses modelos, foi possível obter uma faixa de valores prováveis para picos de emissão: 18,6 Gg/ano a 57,1 Gg/ano para metano e 75,4 Gg/ano a 231,2 Gg/ano para biogás total. Todos os queimadores existentes, no local, foram mapeados e, através de dados obtidos em campo, foram feitas interpolações IDW para prever o fluxo de biogás e a concentração de metano em regiões desconhecidas. Com isso, obteve-se um valor aproximado para a geração anual de biogás no ACJ, equivalente a 323.325.846,54 m³/ano. Realizou-se, ainda, um teste de validação para os resultados dos valores de concentração de metano, advindos da interpolação IDW, que indicou que poucos queimadores apresentavam concentrações reais de metano próximas aos intervalos obtidos pela interpolação e apenas um apresentou resultado compatível com o valor real.

Palavras-chave: biogás, ACJ, LandGEM, IPCC, modelo de decaimento de primeira ordem, queimadores, interpolação, *Landfill Gas Formation* (LFG).

ABSTRACT

Biogas is a renewable energy source that can replace the use of several fossil fuels that make up the national energy matrix. However, literature shows that *Landfill Gas Formation* (LFG) models have shown to be limited for the description of the processes that actually take place in the waste cells of a landfill, being even less representative for the unplanned disposal sites such as the old dump site: Aterro Controlado do Jóquei Clube de Brasília/DF (ACJ). In this work, analysis of theoretical and empirical estimations for methane and biogas in the ACJ were made. In order to estimate the biogas generated in ACJ in the interval of 1967 and 2018, IPCC and USEPA LandGEM first order decay models were used, by the variation of the generation rate constant (k) and the methane generation potential (L_0) for two scenarios of buried waste. The IPCC methodology that assumes all CH_4 is released in the disposal year, was also used. Through the application of these models, it was possible to obtain a range of probable values for emission peaks: 18.6 Gg/year to 57.1 Gg/year for methane and 75.4 Gg/year to 231.2 Gg/year for total biogas. All the existing flares, in the site, were mapped and, through the field data, IDW interpolations were done in order to predict biogas flow and methane concentration in the unknown regions. Therefore, it was possible to obtain an approximate value for the ACJ biogas annual generation, equivalent to 323,325,846.54 m³/year. Also a validation test was performed for the methane concentration results for IDW interpolation which indicated that few flares had presented the real methane concentrations similar to the predictions obtained from the interpolation and just one had presented compatible result with the real value.

Keywords: biogas, ACJ, LandGEM, IPCC, first order decay model, flares, interpolation, *Landfill Gas Formation* (LFG).

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. OBJETIVO GERAL	3
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	4
3.1. GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE)	4
3.1.1. Forçamento Radiativo	5
3.1.2. Metano (CH ₄)	6
3.2. BIOGÁS.....	6
3.2.1. Ensaios Cromatográficos	8
3.2.2. Etapas Microbiológicas da Geração do Biogás	10
3.3. FATORES QUE AFETAM A GERAÇÃO DE BIOGÁS.....	12
3.3.1. Idade do Aterro	12
3.3.2. Células de Resíduos	12
3.3.3. Umidade	13
3.3.4. pH	13
3.3.5. Temperatura.....	13
3.3.6. Precipitação	14
3.3.7. Agentes Inibidores.....	14
3.3.8. Perdas	14
3.4. CONTEXTO INTERNACIONAL	15
3.4.1. MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo	15
3.5. POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS (PNRS).....	17
3.5.1. Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)	17
3.5.1.1. Rejeitos.....	18
3.6. LOCAIS DE DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS	19
3.6.1. Lixão.....	19

3.6.2.	Aterro.....	20
3.6.2.1.	Aterro Controlado	21
3.6.2.2.	Aterro Sanitário	21
3.7.	MODELOS DE GERAÇÃO DE METANO	22
3.7.1.	Parâmetros Utilizados nos Modelos	23
3.7.1.1.	Potencial de Geração de Metano (Lo).....	23
3.7.1.2.	Carbono Orgânico Degradável (COD).....	23
	(Fonte: Britto, 2006).....	24
3.7.1.3.	Fração de COD dissociada (CODf).....	24
3.7.1.4.	Fator de Oxidação do Metano (OX).....	24
3.7.1.5.	Fator de Correção do Metano (FCM).....	25
3.7.1.6.	Constante de decaimento (k).....	25
3.7.1.7.	Fração do Metano Presente no Biogás (F)	26
3.7.2.	Metodologia do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC)...	27
3.7.3.	Metodologia LandGEM (USEPA)	30
3.7.4.	Dedução das Variações dos Modelos LFG e Exemplos de Aplicações	31
3.8.	APROVEITAMENTO DO BIOGÁS	34
3.8.1.	Entraves na Recuperação Energética do Biogás.....	34
3.8.2.	Custo e Eficiência Energética do Biogás.....	35
3.8.3.	Instrumentos de Drenagem.....	38
3.8.4.	Queimadores.....	39
3.8.5.	Principais Métodos de Medição de Biogás.....	40
3.9.	SENSORIAMENTO REMOTO.....	43
4.	METODOLOGIA DO TRABALHO.....	44
4.1.	MATERIAIS.....	44
4.1.1.	Objeto de Estudo (ACJ).....	44
4.1.2.	Instrumentos de Medição.....	48

4.1.2.1.	Landtec GEM5000	48
4.1.2.2.	Anemômetro	49
4.1.3.	Dados	49
4.1.3.1.	Levantamento dos Resíduos Aterrados no ACJ	49
4.1.3.2.	Dados do INMET	51
4.1.3.3.	Dados Relevantes para o Mapeamento dos Queimadores no ACJ	52
4.1.3.4.	Valores de Taxa de Geração (k) para o Uso dos Modelos	52
4.1.3.1.	Dados de Composição Gravimétrica para o Modelo do IPCC	52
4.1.3.2.	Dados das Medições de CH ₄ nos Drenos e das Condições Climáticas	53
4.2.	MÉTODOS	55
4.2.1.	Criação do <i>Shapefile</i> dos Queimadores Georreferenciados e Valorados	56
4.2.2.	Interpolação IDW	57
4.2.2.1.	Etapas da Interpolação, Análise do Fluxo por Área e Validação	58
4.2.3.	Criação de Cenários para os Modelos LandGEM e IPCC	59
4.2.3.1.	Cenários (LandGEM)	59
4.2.3.2.	Cenários para a Equação 2 do IPCC (Baseada no COD)	64
4.2.3.1.	Cenários para a Equação 6 do IPCC (Modelo de Decaimento)	66
5.	RESULTADOS	67
5.1.1.	Mapa do Resultado do Georreferenciados dos Queimadores no ACJ	67
5.1.2.	Resultados dos Cenários do LandGEM	68
5.1.3.	Resultados dos Cenários da Equação 2 do IPCC	76
5.1.4.	Resultados dos Cenários da Equação 6 do IPCC (Modelo de Decaimento)	78
5.1.5.	Resultados das Interpolações IDW para os Dados de Fluxo	79
5.1.6.	Resultados das Interpolações IDW para os Dados de Concentração de CH ₄	81
6.	DISCUSSÕES	83
7.	CONCLUSÃO	88
8.	POSSÍVEIS TRABALHOS FUTUROS	90
	APÊNDICES	104
	ANEXOS	112

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Forçantes radiativas causadas por atividades humanas entre 1750 e 2010 (Adaptado de Dessler, 2015).	5
Figura 2 - Classificação dos microrganismos em função de sua temperatura de crescimento (Fonte: Alcântara, 2007).	7
Figura 3 - Etapas de análise do biogás. A) Instalação da placa de fluxo. B) Coleta por meio de seringa. C) Transferência do biogás da seringa para ampolas. D) Acondicionamento das amostras de biogás nas ampolas. (Fonte: Candiani, Freitas e Silva, 2013).	9
Figura 4 – Mudanças na composição típica do gás no aterro após a disposição de resíduos (Adaptado de EPA, 2017).	10
Figura 5 – Etapas metabólicas do processo de digestão anaeróbia em biodigestores (Fonte: Oliveira e Ramalho, 2006).	11
Figura 6 - Situação do Brasil na dinâmica dos mecanismos de flexibilização internacionais (Fonte: ICLEI, 2009).	16
Figura 7 – Emissões de CH ₄ evitadas por projetos MDL no Brasil (Fonte: MCTI, 2013).	16
Figura 8 - Comparação quantitativa de qualitativa das metodologias A) EPA e B) Modelo Mexicano (Fonte: Urrego-Martínez e Rodrigues-Miranda, 2016).	33
Figura 9 - Análise gráfica dos comportamentos das metodologias IPCC e LandGEM (Fonte: Filho, 2018).	33
Figura 10 - Pirâmide de preferências dentro da Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (Adaptado de EPA, 2012).	36
Figura 11 - Diagrama de alternativas de aproveitamento de biogás. (Fonte: ICLEI, 2009, adaptado do Instituto Agir Sustentável).	37
Figura 12 - a) Poço de Extração Vertical de LFG e b) Poço de Extração Horizontal de LFG. (Adaptado de EPA, 2017).	38
Figura 13 - Captação de Biogás em aterro Sanitário - Aterro da Essencis CAIERAS (Fonte: Assis, 2009, adaptado de CENBIO, 2006).	39
Figura 14 - Exemplo de dreno típico de aterro, que pode ser adaptado e inserido no sistema de captação de biogás (Fonte: ICLEI, 2009, adaptado do acervo CENBIO).	39
Figura 15 - A) Imagem de um flare de biogás com chamas durante a queima e B) outro exemplo de flare. (Fonte: EPA, 2017 ¹).	40
Figura 16 – Queimador em funcionamento no ACJ.	40

Figura 17 - Tubulações transportando biogás, em altas temperaturas, extraído nos drenos do aterro sanitário, são facilmente visíveis na imagem (A) obtida por infravermelho (IR) sobre a região (B) (Fonte: Tanza et al., 2017).	42
Figura 18 - Dados por IRT obtidos para o primeiro local no projeto (Fonte: Tanza et al., 2017).	42
Figura 19 - Disposição das Células de RS no ACJ ao longo do tempo. (Fonte: Cavalcanti, 2013, adaptado de Santos, 1996).	45
Figura 20 - Limites cronológicos da evolução da deposição de resíduos no ACJ (Fonte: Diniz, 2019. In Press).	45
Figura 21 - Evolução da disposição de resíduos juntamente com a evolução da Cidade Estrutural nos arredores do limite do ACJ entre os anos de 1964 e 1997 (Fonte: Diniz, 2019. In Press).	46
Figura 22 - Mapa pedológico do DF com ampliação para o ACJ à direita (Fonte: Diniz, 2019. In Press).	47
Figura 23 - Foto, tirada em campo, dos queimadores existentes na parte alta do ACJ.	48
Figura 24 - Medidor Landtec GEM5000 (Fonte: Meeroff, 2018).	49
Figura 25 - Toneladas de Resíduos Aterradas no ACJ entre os anos de 2014 e 2018.	50
Figura 26 - Condições metereológicas: Precipitação Anual Total (PAT) [mm], Temperatura Média Anual (TMA) [°C], Umidade Relativa Média (URM) [%] do período entre 2004 e 2018 (Adaptado do INMET, 2019).	51
Figura 27 - Distribuição espacial dos pontos amostrados no ACJ.	54
Figura 28 - Esquema explicativo de uma interpolação (Fonte: Kawakubo).	57
Figura 29 - Simulação de mapa de isovalores para sete drenos do ACJ.	57
Figura 30 - Informações de abertura (estimada de acordo com os dados existentes na literatura) e fechamento (dado fixo) do ACJ inseridos no LandGEM.	59
Figura 31 - Layout da ferramenta Automeris para a identificação de valores de resíduos aterrados no gráfico de Carneiro (2012).	61
Figura 32 - Primeira regressão para a quantidade de resíduos aterrados obtida no Excel.	62
Figura 33 - Esquema explicativo do modelo de decaimento LFG.	66
Figura 34 - Mapa final da distribuição dos queimadores de biogás no ACJ gerado no ArcGIS.	67
Figura 35 - A) Resultado gráfico do comportamento das emissões ao longo dos anos e B) Curvas isoladas do metano e do biogás total com os respectivos valores de pico para o Cenário 1A.	68
Figura 36 - A) Resultado gráfico do comportamento das emissões ao longo dos anos e B) Curvas isoladas do metano e do biogás total com os respectivos valores de pico para o Cenário 1B.	69

Figura 37 - A) Resultado gráfico do comportamento das emissões ao longo dos anos e B) Curvas isoladas do metano e do biogás total com os respectivos valores de pico para o Cenário 1C.	70
Figura 38 - A) Resultado gráfico do comportamento das emissões ao longo dos anos e B) Curvas isoladas do metano e do biogás total com os respectivos valores de pico para o Cenário 1D.	71
Figura 39 - A) Resultado gráfico do comportamento das emissões ao longo dos anos e B) Curvas isoladas do metano e do biogás total com os respectivos valores de pico para o Cenário 2A.	72
Figura 40 - A) Resultado gráfico do comportamento das emissões ao longo dos anos e B) Curvas isoladas do metano e do biogás total com os respectivos valores de pico para o Cenário 2B.	73
Figura 41 - A) Resultado gráfico do comportamento das emissões ao longo dos anos e B) Curvas isoladas do metano e do biogás total com os respectivos valores de pico para o Cenário 2C.	74
Figura 42 - A) Resultado gráfico do comportamento das emissões ao longo dos anos e B) Curvas isoladas do metano e do biogás total com os respectivos valores de pico para o Cenário 2D.	75
Figura 43 - A) Gráfico com os dados de emissão anual de metano obtidos pelo primeiro modelo do IPCC e B) Comparação gráfica do resultado do Cenário I-1 do IPCC com os resultados das emissões do Cenário 1C do LandGEM.	76
Figura 44 - A) Gráfico com os dados de emissão anual de metano obtidos pelo primeiro modelo do IPCC e B) Comparação gráfica do resultado do Cenário II-1 do IPCC com os resultados das emissões do Cenário 1C do LandGEM.	77
Figura 45 - Resultado das emissões com o valor de pico de metano para o Cenário I-2 do Modelo de Decaimento do IPCC.	78
Figura 46 - Resultado das emissões com o valor de pico de metano para o Cenário II-2 do Modelo de Decaimento do IPCC.	78
Figura 47 - Resultado da interpolação IDW para os pontos amostrados em relação ao fluxo de biogás.	79
Figura 48 - Interpolação IDW da concentração de metano no biogás com expansão dos resultados para o limite do ACJ.	81
Figura 49 - Teste de validação da interpolação IDW com os pontos amostrados.	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Potencial de aquecimento global de alguns dos gases efeito estufa e suas características.....	4
Tabela 2 - Composição média do biogás segundo diferentes autores.	8
Tabela 3 - Teor de COD para cada componente do lixo.	24
Tabela 4 - FCM recomendado pelo IPCC por tipo de Local de Disposição de Resíduos Sólidos	25
Tabela 5 - Significado dos valores da taxa de geração de metano (k).....	26
Tabela 6 - Comparativo de custos de implantação por tipologia energética (R\$/MW).	35
Tabela 7 - Produção municipal de metano a partir de biogás do aterro utilizando a metodologia IPCC/CETESB.	36
Tabela 8 - Principais métodos de medição de biogás e técnicas qualitativas de reconhecimento para a localização de hotspots. (Adaptado de Maciel, 2003 e Mønster et al., 2019).	41
Tabela 9 - Dados do INMET (2019) para precipitação diária, temperatura média e umidade relativa média para os três dias de medição.	51
Tabela 10 - Dados das medições de fluxo realizadas em campo para o projeto.	53
Tabela 11 - Parte dos dados de fluxo e concentração de metano para alguns queimadores georreferenciados (Retirada da Attribute Table do ArcGIS).....	56
Tabela 12 - Cenários existentes no LandGEM e suas características responsáveis pelos valores dos parâmetros k (taxa de geração) e Lo (potencial de geração).....	60
Tabela 13 - Cenários 1 e 2 dos resíduos aterrados.	62
Tabela 14 - Tabela de valores adotados para a utilização das equações do IPCC.	64
Tabela 15 - Tabela de fluxos por área de contribuição.....	80
Tabela 16 - Estimativa de fluxo de biogás em tonelada por ano para o ACJ [t/ano].	80
Tabela 17 - Comparação dos valores de pico de metano e biogás em Gg, com o ano em que foram atingidos, em relação aos dois modelos e aos diferentes cenários.....	83

LISTA DE ABREVIACÕES E NOMENCLATURAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
- ANP – Agência Nacional do Petróleo
- ACJ – Aterro Controlado do Jóquei
- AR – *Assessment Report* / Relatório de Avaliação
- Aw, Cwa, Cwb – Classificações climáticas segundo Köppen-Geiger
- CDM – *Clean Development Mechanism*
- CETESB – Companhia Estadual de Tecnologia e Saneamento Básico de São Paulo
- COP21 – 21ª Conferência das Partes
- ECO92 – Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento
- EPA – *Environmental Protection Agency*
- EIA – *Energy Information Administration*
- FBMC – Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas
- FOD – *First Order Decay*
- GEE – Gases de Efeito Estufa
- GIS – *Geographic Information System*
- IEE USP – Instituto de Energia e Ambiente Universidade de São Paulo
- IPCC – Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
- LDRS – Local de Disposição de Resíduos Sólidos
- LGF – *Landfill Gas Formation*
- MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
- NBR – Norma Brasileira Aprovada pela ABNT
- P&D – Pesquisa e Desenvolvimento
- PNB – Parque Nacional de Brasília
- PNSB – Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
- RA – Região Administrativa
- RF – *Radiative Forcing*
- RS – Resíduos Sólidos
- RSD – Resíduos Sólidos Dispostos
- RSU – Resíduos Sólidos Urbanos
- SIG – Sistema de Informações Geográficas
- SLU – Serviço do Limpeza Urbana do Distrito Federal

SWDS – *Solid Waste Disposal Site*

USEPA – *United States Environmental Protection Agency*

WtE – *Waste to Energy*

Abreviações de Compostos Químicos

C₂H₆ – Etano

C₃H₈ – Propano

CH₄ – Metano

C_nH_{2n} – Fórmula Geral de Alcenos

CO – Monóxido de Carbono

CO₂ – Dióxido de Carbono

H₂ – Hidrogênio

H₂O – Água ou Vapor d'água

H₂S – Sulfeto de Hidrogênio, Gás Sulfídrico (forma gasosa) ou Ácido Sulfídrico (forma aquosa)

HFCs – Hidrofluorcarbonos

N₂ – Nitrogênio ou Azoto

NH₃ – Amônia, Gás Amoníaco ou Amoníaco

PFCs – Perfluorcarbonos

SF₆ – Hexafluoreto de Enxofre

Abreviações de Unidades do SI

BTU – *British Thermal Unit*

Gg – Gigagramas (10³ toneladas)

GJ – Giga Joule (10⁹ Joules)

J – N·m ou (kg·m²)/s²

kVA – Quilo voltampere (10³ voltamperes)

Mg – Equivale à tonelada métrica (t)

MJ/m³ – Megajoule por metro cúbico

MWh – Mega Watt-hora (potência equivalente a 10⁶ de Watts por hora)

tCO_{2e} – Toneladas de CO₂ equivalente

Tg – Teragramas (10¹² gramas).

ppbv – partes por bilhão de volume

W/m² – Watt por Metro Quadrado (Unidade SI para Irradiância)

1. INTRODUÇÃO

As alternativas tecnológicas para a correta gestão de resíduos sólidos (RS) surgem como interesse coletivo advindo do crescimento expressivo da população e conseqüentemente das atividades geradoras de RS. Juntamente com a Lei Nº 12.305 de 2 de agosto de 2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), faz-se necessária a mobilização social, dentro do contexto de responsabilidade compartilhada, para que haja um gerenciamento efetivo dos resíduos gerados e de sua disposição final ambientalmente adequada.

A existência de medidas para a correta disposição final não isenta inúmeras regiões do enfrentamento de problemas gerados por situações anteriores às práticas corretas da gestão de resíduos. Tais situações repercutiram em efeitos adversos que se prolongarão por anos e que, em geral, não podem ser remediados completamente ou da forma como se gostaria. O Aterro Controlado do Jockey Clube de Brasília (ACJ), antigo lixão do *Jockey* da Cidade da Estrutural, é um exemplo de local não planejado de disposição de resíduos.

O ACJ conta com um histórico de recebimento de resíduos desde a década de 60. Suas proximidades incluem os córregos Acampamento e Cabeceira do Valo, além do Parque Nacional de Brasília (PNB). Sua efetiva desativação, divulgada no dia 20 de janeiro de 2018, foi considerada um marco importante, dada a dimensão do antigo lixão, que já havia sido classificado como o segundo maior lixão do mundo (SLU, 2018) e o maior da América Latina.

De situações adversas, como a do ACJ, surge a importância da avaliação do potencial energético advindo dos resíduos e a execução de modelos *Waste to Energy* (WTE), cuja tradução literal é “Lixo para Energia”. Esse modelo visa o aproveitamento de resíduos para a produção de energia. Conseqüentemente, visa também maior sustentabilidade, através do estabelecimento de uma economia circular que, segundo Azevedo (2015), se trata de um sistema restaurativo que pressupõe a ruptura do modelo econômico linear de extração, transformação e descarte. Em outras palavras, se trata de um modelo de geração de benefícios (sejam eles: a reciclagem, o reaproveitamento, o aproveitamento energético do gás metano gerado por resíduos, dentre outros) dentro do sistema exploratório de recursos.

Eclodiu-se então um somatório de esforços de diferentes pesquisadores e parceiros em prol da gestão inteligente do ACJ. Nesse cenário, surgiu o Projeto P&D RAEESA, que se trata de um estudo de caso contratado e financiado pela Companhia Energética de Brasília (CEB) Lajeado,

CEB Geração e ANEEL e que conta com a parceria do corpo docente e técnico da Universidade de Brasília (UnB) e a da Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos (Finatec), cuja proposta é a hibridização de fontes de geração de energia elétrica como alternativa tecnológica para remediação ambiental de áreas degradadas por RSU. Também tem como um de seus objetivos encontrar alternativas para a mitigação de emissões de GEE.

Os locais de disposição final de resíduos têm potencial para a implementação de projetos de mitigação de emissões de gases de efeito estufa (GEE), dado que a decomposição dos resíduos sólidos, em confinamento e na ausência de oxigênio, resulta na produção de lixiviado e de biogás, sendo, este último, um gás rico em metano e poderoso GEE (ABRELPE, 2013). Parte do metano (CH₄), gerado em aterros sanitários, pode ser capturada e utilizada como fonte de energia renovável e substituir o uso de vários combustíveis fósseis que fazem parte da matriz energética nacional. Por outro lado, a partir do momento que se permite que o metano escape para a atmosfera, gera-se contribuição para o aquecimento global (Themelis e Ulloa, 2007). A biomassa como fonte alternativa de energia, seja por resíduos sólidos urbanos, efluentes ou resíduos rurais, constitui um enorme ganho para o sistema energético nacional, devido ao fato de ser obtida através de combustível não fóssil (Coelho *et al.*, 2004).

Para possibilitar a quantificação do gás gerado em locais de disposição final de resíduos, modelos de geração de biogás (*Landfill Gas Formation* – LGF) precisam ser descritos como funções da quantidade de resíduos, idade desses resíduos dispostos e suas composições. Esses modelos podem ser determinados para diferentes locais através de medições das emissões ou interpretações de resultados de projetos de LGF (Oonk e Boom, 1995). Várias literaturas demonstram que nenhum aproveitamento energético de qualquer aterro real atende todos os pressupostos inerentes a um modelo teórico (ABRELPE, 2013). A variedade de processos que ocorre na massa de resíduos, aliada à falta de monitoramento dos aterros, faz com que os métodos de cálculo de geração de biogás gerem grande incerteza e sejam geralmente fórmulas empíricas contendo poucos parâmetros de avaliação (Borba, 2006). A principal dificuldade em avaliar as emissões de metano nos aterros é a variabilidade espacial dessas emissões ao longo de aterros modernos de vasta extensão (Lando *et al.*, 2017).

O intuito desse trabalho é avaliar o potencial de geração de biogás, de forma a contribuir para o estudo das tecnologias *Waste to Energy* (WtE) para a situação do Aterro Controlado do Jóquei, dado que há um desafio inerente ao uso de modelos LFG e limitações de qualidade empírica e teórica concernentes ao próprio local de estudo.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desse trabalho é avaliar criticamente o potencial de geração de biogás no ACJ.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos desse projeto podem ser divididos em alguns tópicos:

- Fazer o levantamento qualitativo e quantitativo dos resíduos aterrados no ACJ, bem como de outros dados necessários para a avaliação das condições do local de disposição final de resíduos no âmbito da geração de biogás.
- Mapear os queimadores do ACJ em plataforma SIG e gerar dados de suas coordenadas;
- Analisar comparativamente os picos de emissão de metano através da variação de parâmetros dentro dos modelos teóricos LFG elucidados no presente trabalho (IPCC e LandGEM);
- Interpoliar, através do método IDW, dados de fluxo de biogás e concentração de metano, obtidos pelas medições *in situ* realizadas nos queimadores existentes no ACJ com auxílio de equipamento adquirido, para a predição das emissões em regiões desconhecidas;
- Realizar teste de validação do resultado da interpolação dos dados de concentração percentual de metano obtidos em campo;
- Estimar aproximadamente a quantidade de biogás produzida no ACJ por meio dos resultados da interpolação dos dados de fluxo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE)

Existem compostos químicos que atuam na intensificação do efeito estufa na Terra. O efeito estufa é um fenômeno natural e importante por possibilitar existência de vida no planeta. Na ausência desse fenômeno, a temperatura média do planeta seria muito baixa (MMA, 2018). Os gases de efeito estufa (GEE) absorvem a radiação solar infravermelha, incidente no planeta, e aprisionam seu calor na atmosfera, intensificando o efeito estufa e resultando no aquecimento global e em mudança climática. Parte desses gases surge de processos naturais e outra parte é gerada por atividades antrópicas (EIA, 2018).

Um desses GEE é o metano (CH₄), objeto de estudo desse trabalho e componente energético de alto poder calorífico presente do biogás. Além do CH₄, segundo EIA (2018), é possível citar outros gases de efeito estufa, como: o dióxido de carbono (CO₂), o óxido nitroso (N₂O), o hexafluoreto de enxofre (SF₆), os hidrofluorcarbonos (HFCs), os perfluorcarbonos (PFCs) e os trifluoretos de nitrogênio (NF₃), descritos na Tabela 1. Entretanto, de acordo com o quinto relatório de avaliação (AR5) do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), o potencial de aquecimento global do CH₄, comparado ao do CO₂, em um horizonte de 100 anos, aumentou de 21 para a faixa de 28 a 36 nos últimos anos (EPA, 2018).

Tabela 1 - Potencial de aquecimento global de alguns dos gases efeito estufa e suas características.

Espécies	Fórmula Química	Tempo de vida (anos)	Potencial de aquecimento global (horizonte de tempo)		
			20 anos	100 anos	500 anos
Dióxido de Carbono	CO ₂	Variável	1	1	1
Metano	CH ₄	12+/-3	56	21 (atualizado para 28 a 36)*	6,5
Óxido Nitroso	N ₂ O	120	280	310	170
Ozônio	O ₃	0,1 – 0,3	n.d.	n.d.	n.d.
HFC-23	CHF ₃	264	9100	11700	9800
HFC-32	CH ₂ F ₂	5,6	2100	650	200
HFC-41	CH ₃ F	3,7	490	150	45
Hexafluorito de Enxofre	SF ₆	3200	23900	23900	34900
Perfluorometano	CF ₄	50000	6500	6500	10000
Perfluoroetano	C ₂ F ₆	10000	9200	9200	14000
Perfluoropropano	C ₃ F ₈	2600	4800	7000	10100

*Atualização EPA (2018).

(Fonte: Adaptado de Regattieri, 2009).

3.1.1. Forçamento Radiativo

Para comprovar os efeitos dos GEE, assim como outros tipos de gases poluentes, na variação da temperatura global, é importante introduzir o conceito físico de forçante radiativa. Forçamento radiativo – *Radiative Forcing* (RF), em inglês – é a variação da diferença entre a energia que entra na Terra (E_{in}) e a energia que sai da Terra (E_{out}) em resposta às mudanças no planeta devido, principalmente, às alterações na composição dos gases na atmosfera. A energia que sai é determinada inteiramente pela composição atmosférica (Dessler, 2015).

A RF representa a mudança da radiação, avaliada na tropopausa, conforme definido no Terceiro Relatório de Avaliação (*Third Assessment Report*) do IPCC. RF positiva leva a um aquecimento global da superfície e RF negativa a um resfriamento de superfície média global (Forster *et al.*, 2007).

A Figura 1 apresenta alguns contribuintes para o balanço atmosférico na forma de forçantes radiativas. As barras de erro indicam as incertezas nas estimativas (Dessler, 2015). Os GEE, por exemplo, são forçantes radiativas positivas porque provocam aquecimento da troposfera. Já os aerossóis atuam como forçantes radiativas negativas porque provocam o efeito inverso: o de resfriamento da troposfera.

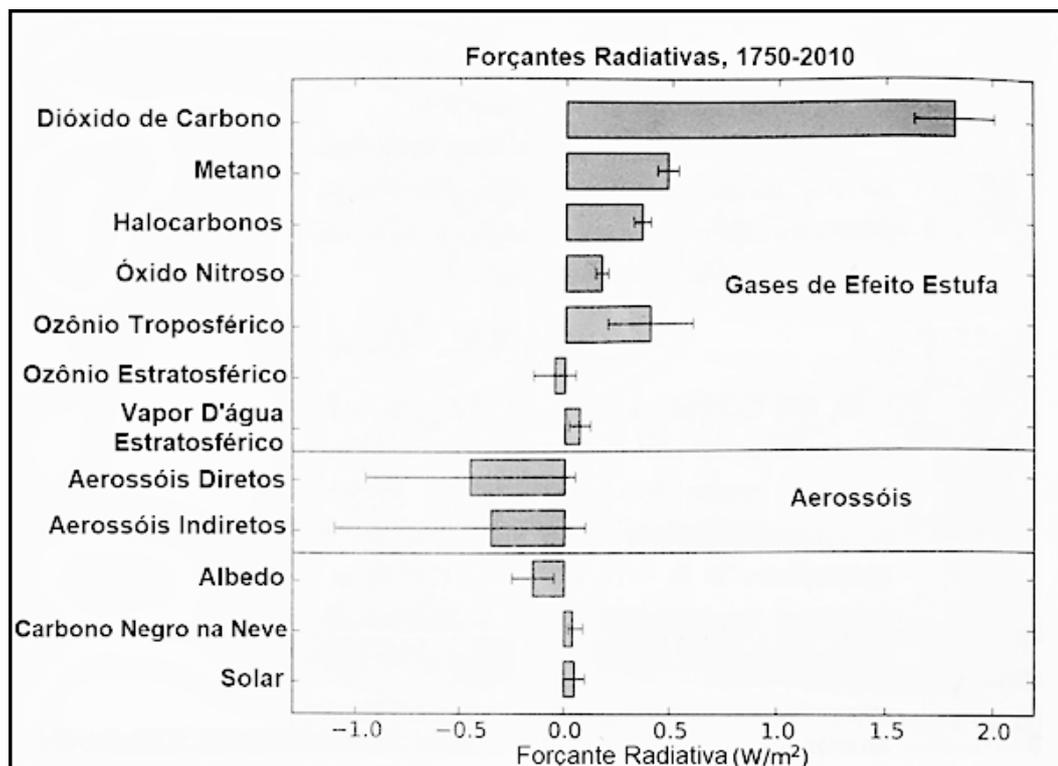


Figura 1 - Forçantes radiativas causadas por atividades humanas entre 1750 e 2010 (Adaptado de Dessler, 2015).

3.1.2. Metano (CH₄)

A molécula de CH₄ possui todas as ligações simples C-H iguais, o mesmo ocorre com os ângulos H – C – H, que apresentam o valor de 109° 28', gerando a configuração de um tetraedro regular para o CH₄ (Barbosa e Coutinho, 2011). A densidade do metano é de 0,656 kg/m³, a 25°C, em pressão atmosférica no nível do mar (Gas Encyclopedia, 2019). Segundo Gandara *et al.* (2015), a densidade do metano é 0,717 kg/m³, que coincide com a densidade colocada por Gas Encyclopedia (2019) para 0°C.

O crescimento da concentração de gás metano, nos últimos dois séculos, fez com que houvesse um aumento na quantidade de vapor d'água na estratosfera, acarretando em uma forçante radiativa positiva equivalente a + 0,07 W/m², responsável por causar aquecimento na troposfera (Dessler, 2015). O CH₄ cresceu significativamente, de 700 para 1720 ppbv, desde o período pré-industrial. Além disso, as projeções das emissões de metano estão na faixa de 540 a 1170 Tg CH₄ por ano (IPCC, 1995). Em muitos artigos, o metano é encontrado como sinônimo de biogás e vice-versa. Sabe-se, entretanto, que o metano representa uma parcela da composição do biogás gerado em aterros.

3.2. BIOGÁS

O biogás pode ser obtido pela decomposição anaeróbia dos resíduos orgânicos presentes em um aterro. Segundo Badurek (2018), o biogás é, normalmente, composto por cerca de 60% de metano (CH₄) e 40% de dióxido de carbono em sua totalidade. É um combustível gasoso composto, em sua maior parte, por hidrocarbonetos de cadeias curtas e lineares. Também possui alto poder calorífico, sendo semelhante ao gás natural (Oliveira e Ramalho, 2006). Seu semelhante, o gás natural, é formado pela decomposição de matéria orgânica presente nas rochas, ao longo de milhares de anos, sendo, portanto, um combustível fóssil finito. O gás natural pode estar ou não associado ao petróleo, sendo composto pelos hidrocarbonetos: metano (CH₄), com teores acima de 70%, etano (C₂H₆) e, em menores proporções, o propano (C₃H₈), usualmente com teores abaixo de 2% (ANP, 2018).

O biogás se trata de um gás inflamável produzido na fermentação da matéria orgânica dentro de limites específicos de temperatura, acidez, teor de umidade e impermeabilidade ao ar (Genovese, Udaeta e Galvão, 2006). A decomposição da matéria orgânica em um aterro gera lixiviado e biogás, também conhecido como gás de aterro, que pode ser coletado por tubulações interconectadas em várias profundidades do aterro. A coleta do gás no aterro é necessária para

evitar explosões causadas pelo acúmulo de metano e também para evitar a liberação de gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera. A quantidade de gás liberada varia de acordo com a porcentagem de resíduos orgânicos e a idade do aterro (Badurek, 2018). O gás coletado pelas tubulações é queimado para se tornar menos poluente e pode ser utilizado para a geração de energia. Seu aproveitamento energético representa a geração de energia através dos rejeitos gerados pela humanidade (Felipetto, 2007).

A digestão anaeróbica, na eliminação dos resíduos sólidos, é um processo eficaz e de alto desempenho na redução do volume e estabilização desses RS (Vindis *et al.* 2009). Dentro do processo de digestão anaeróbica existem geralmente duas faixas de temperatura. No estudo de Vindis *et al.* (2009), fez-se a comparação da fermentação do material orgânico, em escala laboratorial, das condições mesofílicas (bactérias adaptadas a temperaturas moderadas) e termofílicas (bactérias adaptadas a temperaturas mais elevadas), concentrando-se na geração do biogás.

A digestão anaeróbica de lodo, por exemplo, pode ocorrer na faixa mesofílica, por microorganismos mesófilos, a aproximadamente 35°C, que se trata do processo mais usual, ou na faixa termofílica, por termófilos, a aproximadamente 55°C, que é menos comum. Para que haja eficiência na digestão anaeróbica, é importante que a temperatura permaneça idealmente constante durante o processo (Vindis *et al.* 2009). A classificação dessas bactérias conforme sua temperatura de crescimento é mostrada na Figura 2.

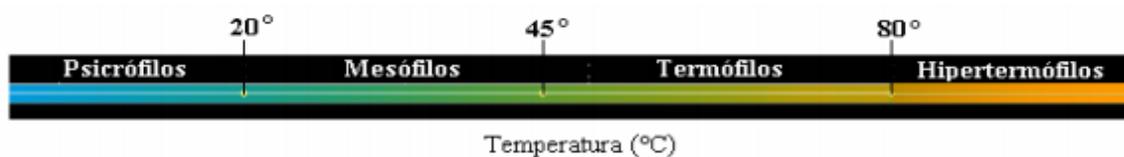


Figura 2 - Classificação dos microrganismos em função de sua temperatura de crescimento (Fonte: Alcântara, 2007).

Os gases gerados pela decomposição em aterros sanitários normalmente são compostos por: CH₄, CO₂, NH₃, H₂, H₂S, N₂ e O₂. O metano (CH₄) e o dióxido de carbono (CO₂) são os principais gases provenientes da decomposição anaeróbica dos compostos biodegradáveis dos resíduos orgânicos. A distribuição do percentual de cada um desses gases depende do tempo de operação e das condições de gerenciamento de cada aterro (De Lima Bezerra, 2013). A composição usual desse biogás foi elucidada na obra de diferentes autores, com variações, como pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição média do biogás segundo diferentes autores.

Metano (CH ₄) ----- 50 a 70 % Dióxido de Carbono (CO ₂) ----- 35 a 40 % Hidrogênio (H ₂) ----- 1 a 3 % Azoto (N ₂) ----- 0,5 a 3 % Oxigênio (O ₂) ----- 0,1 a 1 % Vapor d'água (H ₂ O) ----- Variável Outros (H ₂ S, NH ₃ , CnH _{2n}) ----- 1 a 5 %	Fonte: Thomas e Delval (1987)
Metano (CH ₄) ----- 50 a 75 % Dióxido de Carbono (CO ₂) ----- 25 a 40 % Hidrogênio (H ₂) ----- 1 a 3 % Azoto (N ₂) ----- 0,5 a 2,5 % Oxigênio (O ₂) ----- 0,1 a 1 % Sulfeto de Hidrogênio (H ₂ S) ----- 0,1 a 0,5 % Amoníaco (NH ₃) ----- 0,1 a 0,5 % Monóxido de Carbono (CO) ----- 0 a 0,1 % Água (H ₂ O) ----- Variável	Fonte: Tchobanoglous (1994)
Metano (CH ₄) ----- 50% Dióxido de Carbono (CO ₂) ----- 45% Nitrogênio (N ₂) ----- 5% Sulfeto de Hidrogênio (H ₂ S) ----- < 1% Orgânicos Não Metânicos ----- 2700 ppmv	Fonte: Themelis e Ulloa (2007)
Metano (CH ₄) ----- 45 a 60 % Dióxido de Carbono (CO ₂) ----- 40 a 60 % Hidrogênio (H ₂) ----- 0 a 0,2 % Nitrogênio (N ₂) ----- 2 a 5 % Oxigênio (O ₂) ----- 0,1 a 1 % Enxofre, Mercaptanos, etc. ----- 0 a 1 % Sulfeto de Hidrogênio (H ₂ S) ----- 0,1 a 0,5 % Amoníaco (NH ₃) ----- 0,1 a 1,0 % Monóxido de Carbono (CO) ----- 0 a 0,2 % Outros Gases ----- 0,01 a 0,6 %	Fonte: Genovese, Udaeta e Galvão (2018)

3.2.1. Ensaios Cromatográficos

A Tabela 2 apresenta as distribuições percentuais dos gases que compõem o biogás segundo diferentes autores. O ensaio cromatográfico é uma abordagem comum para a determinação das frações dos gases existentes no biogás do aterro. A cromatografia consiste na interação dos compostos presentes em determinada amostra com um solvente líquido ou gasoso. Após uma fase móvel, há fixação desses compostos. Dessa forma, é possível identificar através de diferentes cores ou detectores de sinais, o número de compostos presentes na amostra analisada.

Lima *et al.* (2018), discorre que a preparação para o ensaio de cromatografia, em amostras de biogás, consiste no recolhimento de ampolas de gases retiradas do aterro, que podem ser obtidas por meio de um tubo de diâmetro pequeno acoplado a uma placa de fluxo.

No trabalho de Candiani, de Freitas e Silva (2013), o tubo acoplado à placa consistiu em um dispositivo de silicone no qual foi inserida uma agulha para a retirada de alíquotas do biogás e posterior transporte dessas alíquotas para um cromatógrafo. A Figura 3 retrata de maneira bastante elucidativa o processo de retirada das alíquotas de biogás para a análise laboratorial realizado no trabalho de Candiani, de Freitas e Silva (2013).



Figura 3 - Etapas de análise do biogás. A) Instalação da placa de fluxo. B) Coleta por meio de seringa. C) Transferência do biogás da seringa para ampolas. D) Acondicionamento das amostras de biogás nas ampolas. (Fonte: Candiani, Freitas e Silva, 2013).

No trabalho de Borba (2006), coletou-se amostras de gases por meio de seringas de 60 mL, que foram conectadas a uma sonda de borracha acoplada ao dreno vertical de gás. Essas seringas foram acondicionadas em caixas de isopor com gelo para a preservação do gás dentro das seringas e destinadas à análise cromatográfica.

Segundo Hilaire *et al.* (2017), a cromatografia gasosa (GC) acoplada à espectrometria de massa (MS) – GC-MS – é a principal técnica utilizada para a análise do biogás. Essa análise gera um gráfico de resposta do detector por distância ou tempo. Entretanto, expõem a importância da implementação da cromatografia gasosa bidimensional (GC x GC) no levantamento matricial (polaridade por volatilidade) para amostras com grandes números de compostos.

3.2.2. Etapas Microbiológicas da Geração do Biogás

No local de disposição final dos resíduos, os compostos orgânicos são submetidos a reações químicas ao longo do tempo. De acordo com o trabalho de Fei, Zekkos e Raskin (2016), as análises de biodegradação de RSU, conduzidas em laboratório, são melhor controladas e têm o emprego de procedimentos operacionais responsáveis por aumentar a atividade microbiana. Por essas razões, esses experimentos em laboratório produzem resultados mais previsíveis e de maior confiabilidade em relação aos estudos de monitoramento dos resíduos do aterro em campo. A Figura 4 apresenta as diferentes fases que ocasionam na mudança da composição de gás no aterro ao longo do tempo.

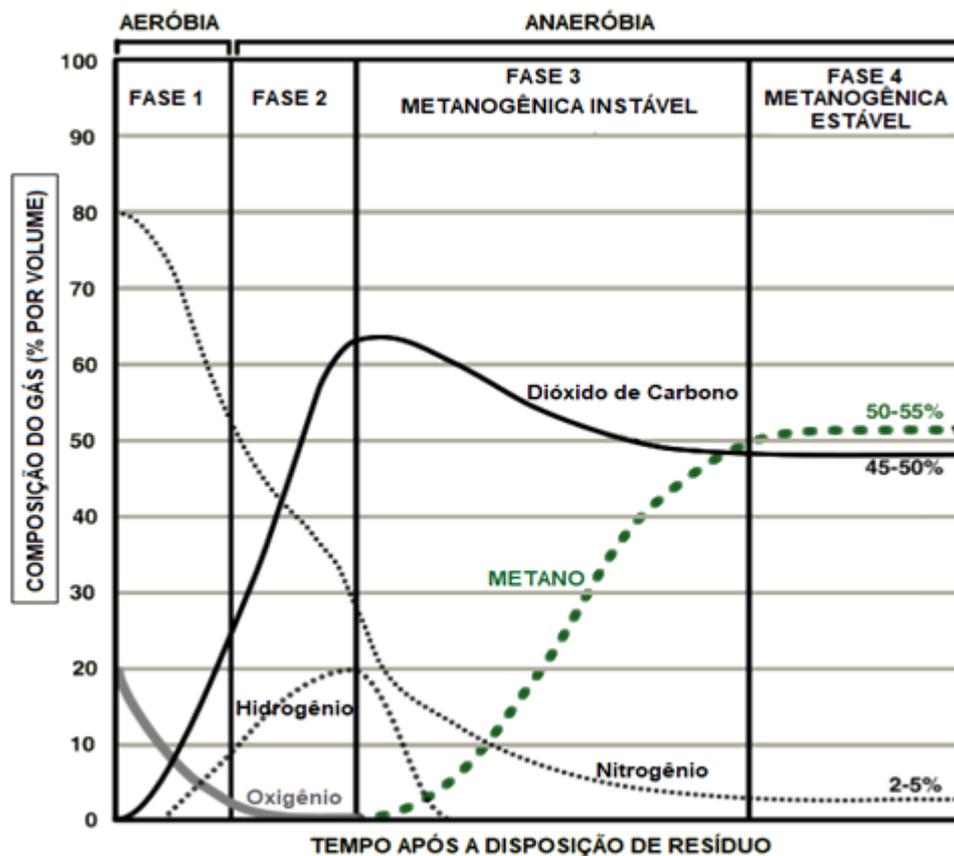


Figura 4 – Mudanças na composição típica do gás no aterro após a disposição de resíduos (Adaptado de EPA, 2017).

Na fase 1, bactérias aeróbicas consomem o oxigênio durante a degradação das cadeias de carboidratos complexos, proteínas e lipídios que compõem o lixo orgânico. O primeiro subproduto dessa etapa é o dióxido de carbono (EPA, 2017). Nessa fase, ocorre a oxidação dos compostos orgânicos pelo contato com o ar atmosférico, obtendo-se, além do CO₂, outros produtos como o vapor de água (Themelis e Ulloa, 2007). Essa fase continua ocorrendo até que ocorra carência e esgotamento total do oxigênio disponível (EPA, 2017).

Todavia, a digestão anaeróbia é a principal etapa da geração de biogás. A etapa anaeróbia consiste nas fases 2, 3 e 4 da figura 3. Primeiramente, ocorre a hidrólise da matéria orgânica complexa em moléculas solúveis. Na fase 2, ocorre a conversão dessas moléculas em CO₂, hidrogênio e ácidos orgânicos, sendo os principais: ácido acético, ácido propiônico, ácido butírico e etanol (Themelis e Ulloa, 2007). Segundo a EPA (2017), as bactérias anaeróbias convertem os compostos criados pelas bactérias aeróbias em ácidos acéticos, lácticos, fórmicos e álcoois (como metanol e etanol). Ainda na fase 2, através da mistura dos ácidos formatos com a umidade no aterro, juntamente com o consumo de N₂, são produzidos CO₂ e hidrogênio.

Na fase 3, denominada metanogênica instável, as bactérias anaeróbias consomem os ácidos orgânicos produzidos na fase 2, formando o acetato. Esse processo torna o ambiente do aterro mais neutro, possibilitando que bactérias geradoras de metano, através do dióxido de carbono e acetato, se estabeleçam no local (EPA, 2017). Por fim, há a geração do metano por bactérias metanogênicas (Themelis e Ulloa, 2007). O metano é produzido pelas bactérias acetotróficas por meio do ácido acético ou pelas bactérias hidrogenotróficas, a partir da redução de CO₂ (Regattieri, 2009). Na fase 4, denominada metanogênica estável, as taxas de produção de biogás permanecem constantes e em uma taxa estável por aproximadamente 20 anos (EPA, 2017). É possível verificar a ocorrência dessa estabilização de CH₄ e CO₂ na Figura 3. O esquema da Figura 5 apresenta as etapas metabólicas do processo de digestão anaeróbia que ocorre em biodigestores.

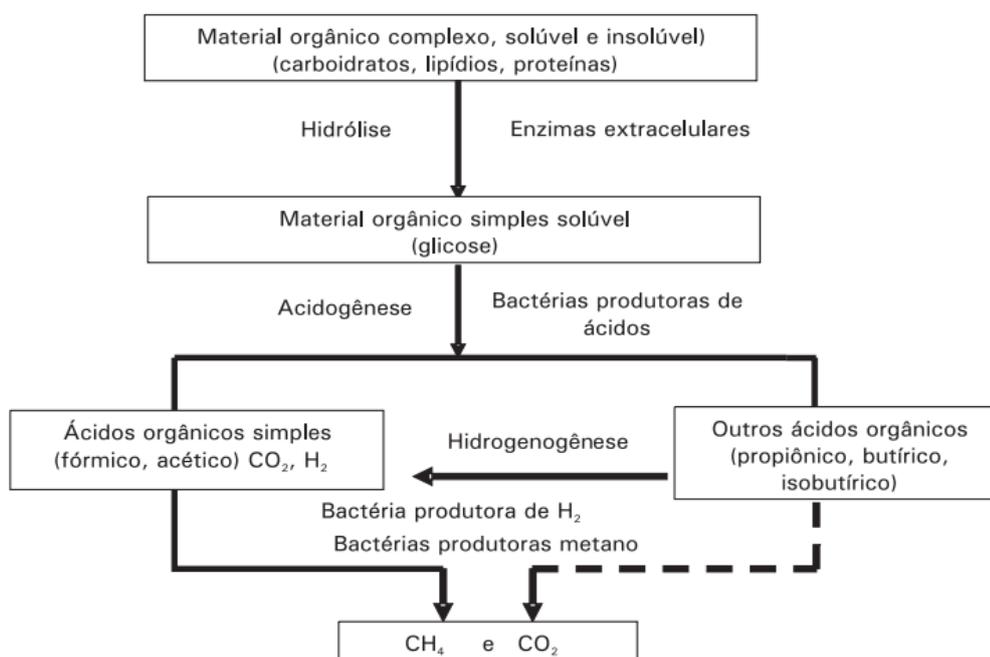


Figura 5 – Etapas metabólicas do processo de digestão anaeróbia em biodigestores (Fonte: Oliveira e Ramalho, 2006).

3.3. FATORES QUE AFETAM A GERAÇÃO DE BIOGÁS

Autores como Maciel (2003) e Lima *et al.* (2018) citam fatores capazes de influenciar a geração do biogás em aterros, tais como: características como umidade e peso específico dos resíduos, assim como sua composição gravimétrica, a geometria do aterro (dada pela configuração das células de resíduos, dimensão em área, profundidade, sua disposição espacial, grau de impermeabilização e de compactação), o ambiente interno (caracterizado por fatores como a umidade da massa durante a degradação, o pH nas células de resíduos, a temperatura, a disponibilidade de nutrientes para os microrganismos metanogênicos, dentre outros fatores) e ambiente externo (fatores como a precipitação ou infiltração, variação da pressão atmosférica e da temperatura). No trabalho de Jucá, Maciel e Neto (2011), por exemplo, foi feita a caracterização físico-química dos resíduos, de sua composição gravimétrica e volumétrica, compressibilidade, teor de umidade e de sólidos voláteis, calorimetria, celulose, lignina (responsável por grande quantidade do carbono orgânico degradável), dentre outros fatores necessários para a execução da metodologia de pesquisa. Muitos fatores podem ser listados como influenciadores da geração de biogás. Alguns deles são detalhados nessa seção.

3.3.1. Idade do Aterro

Romanel, Santos e van Elk (2017) discorrem sobre a idade do aterro, em sua obra, como sendo um fator que influencia enormemente na quantidade e na qualidade do biogás gerado. A geração de biogás é significativamente reduzida após um período de disposição de resíduos de 10 a 15 anos. (Maciel, 2003). Além disso, antigas contribuições de resíduos podem gerar subprodutos que estejam contidos na zona saturada do aterro. Dessa forma, o potencial biogás de células mais antigas, pode se encontrar diluído em faixas de lixiviado líquido.

3.3.2. Células de Resíduos

Descrito na obra de Di Trapani *et al.* (2018), o modelo de Manna *et al.* (1999) leva em conta a influência da variação das camadas de resíduos, ao longo do tempo, na dinâmica dos processos desde o início da operação do aterro até o final dos processos de produção de biogás. A utilização de pequenas áreas para rápido fechamento das células, a redução do volume do lixo, e conseqüente aumento da densidade, por compactação, encurtam o processo aeróbio e aceleram o anaeróbio pela redução do número de vazios no maciço. O aumento da densidade acentua a produção de gás por unidade de volume. A impermeabilização do aterro, anteriormente à colocação das camadas de resíduo, também proporciona melhor drenagem dos

gases (Maciel, 2003). Segundo Mariano e Jucá (2010), a espessura do solo pode ser considerada um fator secundário da emissão de gases pela cobertura.

3.3.3. Umidade

Segundo Palmisano e Barlaz (1996), os principais fatores limitantes da produção de metano na massa de resíduos são a umidade e o pH. O tempo de decomposição dos resíduos facilmente biodegradáveis se atrasa de 3 para 15 anos ao se reduzir a condição de umidade de bastante úmido para seco (Maciel, 2003). Há um aumento da geração de biogás em umidades variando de 50 - 60% e de 20 - 40% (Maciel, 2003). Segundo Kalantarifard e Yang (2012), a degradação aeróbia de RSU, em países tropicais, acontece em maior frequência devido às maiores umidades e temperaturas. Esses fatores têm efeito positivo sobre a produção de metano. A potencial capacidade de geração de metano (Lo) não é alcançada em locais em climas muito seco.

3.3.4. pH

As bactérias metanogênicas têm maior produtividade em pHs entre 6,8 e 7,2 (Alves, 2000). Uma vez que as condições anaeróbicas são estabelecidas e se inicia a fase da fermentação dos açúcares e produção de ácidos carboxílicos, no aterro, o pH da massa de resíduos cai de 7,5 para 5,7. (Palmisano e Barlaz, 1996). Há maximização na produção de metano em pH neutro dentro de uma faixa de 6,8 a 7,4 (Maciel, 2003). Segundo Zhender *et al.* (1982, *apud* Regattieri 2009), as bactérias metanogênicas funcionam eficazmente dentro da faixa de pH de 6 a 8.

3.3.5. Temperatura

A temperatura é um dos parâmetros de entrada fundamental no modelo, responsável por influenciar a intensidade dos processos. Na decomposição anaeróbia dos resíduos para a produção de biogás, temperaturas mais altas, dentro de uma faixa microbiana tolerável, intensificam o processo. Segundo Maciel (2003), citando o *Waste Management Paper* nº 27 de 1989, a temperatura ótima para a produção de biogás é de 35 a 45°C. Segundo Vindis *et al.* (2019), a faixa, mais comum, de degradação e de conseqüente produção de biogás, é a mesofílica, a aproximadamente 35°C. No livro de Palmisano e Barlaz (1996), tem-se a indicação da temperatura ótima de 37°C, além de faixas equivalentes a 34 e 40°C, como temperaturas ótimas para o crescimento de determinadas cepas de bactérias anaeróbias. Alves (2000), por sua vez, cita temperaturas entre 50 e 60°C como a faixa de maior produtividade para bactérias metanogênicas.

3.3.6. Precipitação

A taxa de precipitação também é identificada como outro fator interveniente, dada a quantidade significativa de carbono orgânico que é lavada durante uma chuva; podendo conseqüentemente ser eliminada, causando assim a redução da produção de metano (Kalantarifard e Yang, 2012).

3.3.7. Agentes Inibidores

A inibição da produção de biogás pode se dar pela concentração de metais pesados como cobre (Cu), zinco (Zn), níquel (Ni) e cromo (Cr). Também pode se dar pela presença de ácidos em excesso, concentração de sódio (Na) maior que 5500 mg/L, concentrações de potássio (K) e cálcio (Ca) maiores que 4500 mg/L e concentração de magnésio maior que 1500 mg/L. (Calado, 1998 e Melo *et al.*, 2002, *apud* Maciel, 2003). A disponibilidade de nutrientes como nitrogênio (N), ferro (F) e outros, favorecem a presença de bactérias metanogênicas (principal) e acetogênicas, aumentando assim a geração de metano. Segundo Palmisano e Barlaz (1996), a técnica de recirculação de lixiviado em aterros sanitários pode ser um fator responsável por aumentar a produção de metano. Segundo Regattieri (2009), o ecossistema anaeróbio deve ter acesso a todos os nutrientes necessários, especialmente o fósforo (P). A má homogeneização dos resíduos pode ter como consequência ambientes com limitação de nutrientes necessários na biodegradação como nitrogênio e fósforo.

3.3.8. Perdas

Romanel, Santos e van Elk (2017) inferem que deve haver contabilização nas perdas por emissões fugitivas, por difusão e/ou advecção ou processos de oxidação para a quantificação e aproveitamento do biogás do aterro. Araujo e Ritter (2016) mostram, em seu trabalho, que grande parte das emissões fugitivas podem ocorrer pela camada de cobertura do aterro devido à presença de fissuras. A quantidade de metano emitida pelos aterros sanitários é controlada, de certa forma, pelo tipo de camada de cobertura sobre o aterro (Candiani e Viana, 2017). Devido às condições climáticas, as camadas de solo acabam tendo sua condutividade hidráulica alterada pelo umedecimento e secagem, o que contribui com o escape fugitivo de biogás pela superfície. Além disso, a existência de O₂ entre o solo e a camada de resíduos pressupõe a existência de fissuras que atravessam a camada de cobertura e de fluxo preferencial dos gases. (Mariano e Jucá, 2010). Segundo o trabalho de Candiani e Viana (2017), as emissões fugitivas de metano representam 31,4% da produção total de metano no aterro sanitário que foi analisado pelos autores.

3.4. CONTEXTO INTERNACIONAL

A Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (ECO92), também chamada de Cúpula da Terra, que aconteceu no Rio de Janeiro no ano de 1992 (Rio 92), foi importante para o cenário brasileiro em inúmeros aspectos. Ao final dessa conferência, o Governo Brasileiro assumiu o compromisso de gerar inventários de emissão de GEE. Nesses inventários, também se incluíam as emissões de metano geradas pela degradação anaeróbia dos resíduos (Alves, 2000). A linha do tempo, que contém os principais fatos apresentados nesta seção, pode ser vista no Apêndice A.

3.4.1. MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) – *Clean Development Mechanism* (CDM), em inglês – foi um instrumento possibilitador do início da venda de créditos de carbono pelos países em desenvolvimento, criado como alternativa de redução das emissões de carbono no âmbito do Protocolo de Quioto (*Kyoto Protocol*) em 1997 (De Lima Bezerra, 2013).

O Protocolo de Quioto teve como objetivo principal o de reduzir e estabilizar as concentrações dos gases de efeito estufa na atmosfera evitando a interferência antrópica negativa no sistema climático terrestre (ICLEI, 2009). Foi suplantado pelo Acordo de Paris, que foi um compromisso dos países em reduzir as emissões de GEE, aprovado por 195 países na COP21 da UNFCCC no ano de 2015. No acordo, em vigor desde 2016, o Brasil se comprometeu a cortar suas emissões em 37% até 2050 e em 43% até 2030 (Romanel, Santos e van Elk, 2018).

Segundo Assis (2009), o MDL surgiu, por uma iniciativa brasileira, na reunião do Protocolo de Quioto em 1997. A proposta inicial seria a de um fundo, custeado pelos países mais ricos, para estabelecer projetos de energia limpa nos países mais pobres. O Decreto Nº 3.515, de 20 de junho de 2000, revogado e substituído pelo Decreto Nº 9.082, de 26 de junho de 2017, dispunha sobre o Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas e sua possível contribuição com o MDL definido no Protocolo de Quioto (Decreto Nº 9.082, 2017). Além do MDL, o Protocolo de Quioto deu origem a outros dois mecanismos de flexibilização como é mostrado na Figura 6. De acordo com o Atlas Brasileiro de Emissões de GEE e Potencial Energético na Destinação de Resíduos Sólidos:

“O Protocolo de Quioto abrange três mecanismos de flexibilização regulados: o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), a Implementação Conjunta (IC) e o Comércio de Emissões. Destes, o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) é a maior fonte de projetos de compensação de emissão de gases de efeito estufa.” [ABRELPE, 2013].

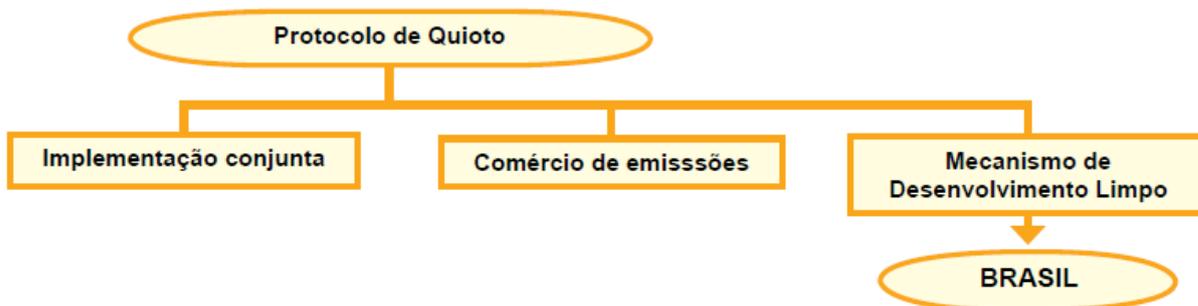


Figura 6 - Situação do Brasil na dinâmica dos mecanismos de flexibilização internacionais (Fonte: ICLEI, 2009).

Existem duas categorias de metodologias de projetos, segundo as regras do MDL, são elas: metodologias de grande escala e metodologias de pequena escala. Especificamente para projetos em aterros sanitários, a diferença entre as categorias de metodologias é definida pela quantidade de redução de emissões de GEE. Metodologias de pequena escala são aplicadas em projetos que gerem menos de 60.000 tCO₂e/ano (ABRELPE, 2013).

Os principais fatores que limitam a realização de projetos de MDL são a falta de ampla divulgação do assunto e a falta de conhecimento especializado adicionada aos custos elevados associados às transformações nos diferentes processos, de forma a se adequarem às premissas do MDL. No primeiro ano de funcionamento do MDL, o total de reduções de GEEs emitidos por projetos brasileiros validados foi equivalente a, aproximadamente, 180 milhões de toneladas de CO₂, em apenas dez anos (Gellert Paris e Seo, 2007). A Figura 7 apresenta as emissões de CH₄ em Giga gramas (Gg) evitadas no país por projetos MDL.

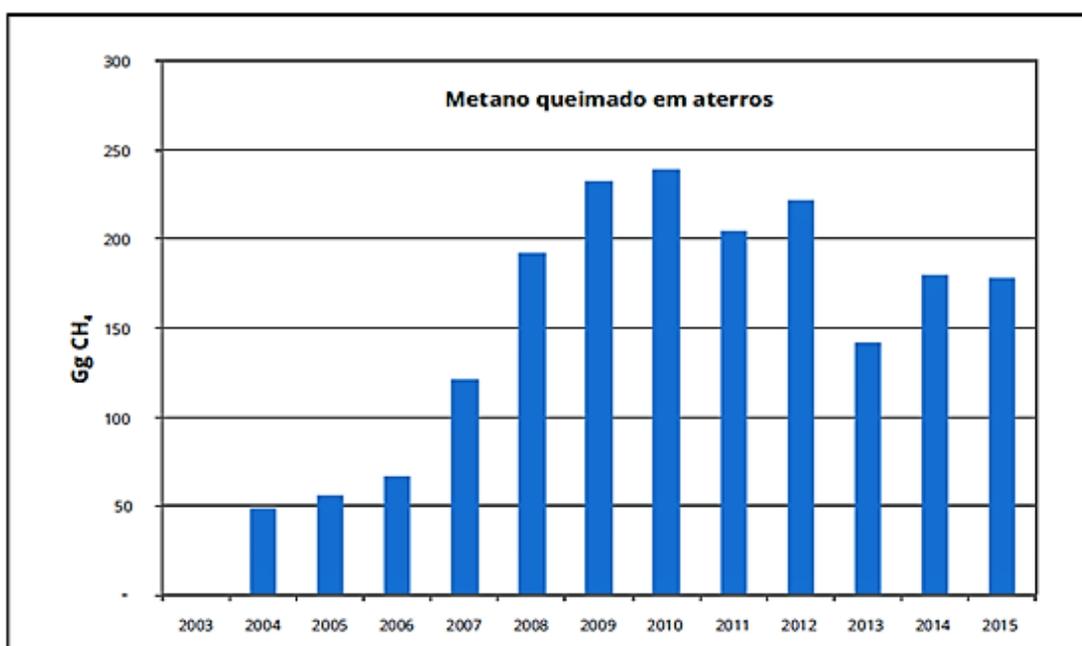


Figura 7 – Emissões de CH₄ evitadas por projetos MDL no Brasil (Fonte: MCTI, 2013).

3.5. POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS (PNRS)

A Política Nacional de Resíduos Sólidos regulamenta a destinação final dos resíduos sólidos produzidos, com destaque aos RSU, agindo como um marco regulatório que integra princípios, instrumentos, objetivos e diretrizes que os agentes públicos envolvidos, principalmente os municípios, deverão seguir de forma compartilhada (Arcadis Tetraplan, 2010). A Lei Nº 12.305 de 2 de agosto de 2010 é a responsável por instituir a PNRS. Segundo o Art 1º da lei:

Art. 1º – Esta Lei institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, dispondo sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluídos os perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis. [Lei Nº 12.305].

3.5.1. Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)

A Lei Nº 12.305 de 2 de agosto de 2010, que instituiu a PNRS, em seu Capítulo II, Art 3º e inciso XVI, define resíduos sólidos gerais como sendo:

Resíduos sólidos: Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível [Lei Nº 12.305].

O Art. 13 da lei, define resíduos sólidos urbanos (RSU) como aqueles que englobam resíduos sólidos domiciliares (originários de atividades domésticas em residências urbanas) e resíduos de limpeza urbana (originários de varrição, limpeza de logradouros, vias públicas e outros serviços de limpeza urbana).

Pipatti *et al.*, 2006 no relatório do IPCC (*Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*) definem resíduos sólidos urbanos como aquele coletado por órgãos e autoridades locais de coleta nos municípios. Entretanto, essa definição varia por país. De forma geral, o RSU inclui:

- Resíduos domiciliares
- Resíduos de parques e jardins
- Resíduos comerciais e institucionais

Segundo o SLU (2013), o tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no Distrito Federal é inadequado. Em análises feitas no ano de 2008, 81,9% do material coletado era destinado ao

ACJ sem qualquer cuidado e apenas 5,6% do total coletado era aproveitado como composto orgânico. Além disso, só 2% de material reciclável era separado.

3.5.1.1. Rejeitos

Os rejeitos são aqueles resíduos que, tanto na teoria quanto na prática, deveriam ser os únicos a seguir para locais de disposição final de resíduos sólidos. Segundo a Instrução Normativa Nº 89, de 26 de setembro de 2016, em seu Art. 21, dispõe um pouco sobre a definição dos rejeitos e resíduos indiferenciados, através de exemplos. Segundo a IN 89, os resíduos gerados devem ser classificados da seguinte forma:

I – Orgânicos: vegetais, frutas, suas cascas, restos de comida em geral, borra de café, palitos de madeira, papéis sujos e/ou engordurados e folhas.

II – Recicláveis secos: papéis e papelões limpos, plásticos em geral, metais em geral, embalagens longa vida e isopor.

III – Rejeitos ou indiferenciados: vidros, espelhos, porcelanas, papéis higiênicos, fraldas descartáveis e absorventes [Instrução Normativa Nº 89, 2016].

Na IN 89, rejeitos e resíduos indiferenciados são dispostos juntos no terceiro item. Entretanto, os exemplos: vidros, espelhos e porcelanas não são resíduos sem possibilidades de reaproveitamento. Dessa forma, estes resíduos, citados acima, não se enquadram na classificação de rejeitos, mas de resíduos indiferenciados. O vidro é um exemplo de resíduo que foi, por muito tempo, coletado junto com os resíduos que seguem para a triagem, devido à ausência de empresas responsáveis por realizar a sua reciclagem no Distrito Federal. O Decreto Nº 37568 de 24/08/2016 classifica resíduos sólidos indiferenciados como aqueles: “[...] não disponibilizados para triagem com vistas à reciclagem ou para compostagem;” (Decreto Nº 37568, 2016).

O Ministério do Meio Ambiente define rejeito como o resíduo que não pode ser reutilizado ou reciclado. Em outras palavras, se trata do resíduo que não tem mais possibilidade de aproveitamento (MMA, 2018). Esses resíduos não têm outra possibilidade se não o direcionamento para locais de disposição final: lixões (não adequados), aterros controlados (pouco adequados) ou aterros sanitários (mais adequados), quando não há alternativas de incineração dos resíduos ou outros meios que exigem tecnologias mais caras.

Por não ser separado corretamente, o resíduo orgânico acaba sendo encaminhado, juntamente com os rejeitos, para o local de disposição final. Isso gera despesas, para os municípios, que poderiam ser evitadas caso a parcela orgânica fosse separada logo na fonte (MMA, 2011).

3.6. LOCAIS DE DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS

O Local de Disposição de Resíduos Sólidos (LDRS) – denominado *Solid Waste Disposal Site* (SWDS), em inglês – se trata do destino final dos RS após o encerramento do seu ciclo de vida. Esse ciclo de vida vai da extração dos recursos naturais necessários para a confecção de um produto até a sua disposição final segundo a metodologia de ACV (Coltro *et al.*, 2007).

Segundo as PNSB de 2000 e 2008, observa-se, mais de 90% dos resíduos estavam sendo destinados para locais de disposição final como: aterros sanitários, aterros controlados e lixões. Os 10% restantes eram distribuídos entre unidades de compostagem, triagem e reciclagem, além de unidades de incineração, outros tipos de vazadouros, que não lixões, e demais destinos (MMA, 2011).

A disposição final segura dos RSU é um desafio encontrado pelos órgãos governamentais, uma vez que as áreas disponíveis para disposição final tem se tornado cada vez mais escassas, mais distantes dos centros de geração de lixo e com custos elevados. Existem exemplos de locais em que, não tendo havido nenhum estudo prévio para a escolha da área de disposição final ou uma infraestrutura capaz de evitar problemas ligados ao saneamento, acabam acarretando em inúmeros problemas ambientais e sanitários, que afetam a população (Moreira e Sisino, 1996).

3.6.1. Lixão

Segundo Gimenes e Hising (2017), o lixão se trata de um vazadouro a céu aberto, sem nenhum controle ambiental ou tratamento dos resíduos ali dispostos. É uma área final de disposição de resíduos em que não há preparação do solo para o recebimento dos resíduos e não possui tratamento do lixiviado e dos gases gerados pela decomposição desses resíduos. Nesse local, as pessoas têm livre acesso para mexer nos resíduos e até estabelecer moradias em cima deles. Não é um LDRS permitido por lei. Entretanto, faz parte do cenário de várias regiões brasileiras.

Os lixões se constituem na forma mais inadequada de disposição final de RSU, dado que não possuem cuidados necessário para que danos ambientais e danos à saúde sejam evitados. Os resíduos, depositados em um lixão, causam contaminações e poluição no solo, no ar e na água. Também atraem vetores de doenças, não restringindo os resíduos de serem levados por agentes físicos (como o vento) ou biológicos (animais). Da mesma forma, não há o controle do que é levado por catadores. Apresentam risco de deslizamentos, fogos e explosões (Arcadis Tetraplan, 2010). No resumo executivo da Arcadis Tetraplan (2010), é informado que, de

acordo com a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico do IBGE de 2008, metade dos mais de cinco mil municípios brasileiros destinavam seus resíduos para lixões.

É importante que os lixões recebam a tecnologia para a extração de gás em concordância com a implementação de projetos do MDL. Também é necessário que os impactos ambientais sejam minimizados através do tratamento do lixiviado, além do monitoramento ambiental (Felipetto, 2007).

➤ **Desativação de Lixões**

O encerramento de lixões é uma das ações que podem ser beneficiadas pelo MDL. Sua desativação é passível de recursos para a recuperação ambiental da área degradada além da implantação de aterros sanitários. De Lima Bezerra (2013) descreve a proposta que foi sustentada pelo inventário do potencial econômico dos gases do antigo Lixão do Jóquei de Brasília (Lixão da Estrutural) e pela análise de viabilidade econômica no sentido de adesão à venda de créditos de carbono que adotou o MDL para apoiar o fechamento do lixão do Jóquei Club em Brasília e a abertura do novo aterro sanitário no Distrito Federal.

No Brasil, a PNRS incentiva o fim dos lixões. Isso tem acarretado em um crescimento do número de aterros sanitários no país, fazendo com que surja a oportunidade de aproveitamento energético do biogás (Pereira *et al.*, 2018).

O Aterro Controlado do Jóquei (ACJ), objeto de estudo desse trabalho, cujo antigo nome, já em desuso é: Lixão da Estrutural, foi desativado no dia 20 de janeiro de 2018. No dia 29 de janeiro, foi inaugurada a Unidade de Recebimento de Entulhos (URE) para o depósito de resíduos da construção civil no ACJ. Só no primeiro trimestre de 2018, a URE recebeu 261.796 toneladas de resíduos (SLU, 2018).

3.6.2. Aterro

O aterro é uma alternativa de minimização dos impactos ambientais causados pela alternativa de disposição dos resíduos de forma exposta e sem controle ambiental: o lixão. Como o nome já sugere, nessa forma de disposição final de resíduos o lixo é aterrado. Existem dois tipos de aterros: o aterro sanitário e o aterro controlado. Segundo Cavalcanti (2013), dentre os métodos de aterramento, é possível citar os seguintes métodos: da trincheira (em que o lixo é disposto em valas escavadas no solo, compactado e coberto), da rampa (em que o lixo é compactado de

encontro a um talude natural ou construído) e da área (método em que as camadas de resíduos se superpõem, se elevando de forma de tronco de pirâmide acima do nível original do terreno).

3.6.2.1. Aterro Controlado

É o local onde os resíduos são dispostos, geralmente, com o mínimo de gestão ambiental, como: acesso restrito, isolamento, cobertura dos resíduos com camada de terra e controle de entrada de resíduos, mas não atendem às recomendações da PNRS (Gimenes e Hising, 2017).

O aterro controlado, em muitos casos, a exemplo do ACJ, se inicia após a desativação de um lixão, como forma de minimizar os danos da disposição incorreta de resíduos. Dessa forma, não possui as alternativas sofisticadas de tratamento dos derivados da degradação dos resíduos. Segundo o PROGEA (2005), as condições operacionais do ACJ, a exemplo do lançamento de resíduos sem compactação prévia e com cobertura parcial, faziam com que o local se assemelhasse muito mais a um lixão do que efetivamente a um aterro controlado.

3.6.2.2. Aterro Sanitário

Um aterro sanitário municipal é uma área de terra ou uma escavação que recebe lixo doméstico, resíduos sólidos comerciais, resíduos sólidos industriais e lodos não-perigosos e outros rejeitos na teoria (US EPA, 1995). Geralmente, o aterro sanitário já é projetado com esse fim. Em outras palavras, se trata de uma área escolhida e projetada para o recebimento de resíduos em solo impermeabilizado, com devida cobertura e sistemas de drenagem de lixiviado e de biogás, com a queima e possível tratamento deste último. A NBR 8419 – Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos – da ABNT de 1992, estabelece o seguinte conceito para aterro sanitário:

Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário. [NBR 8419, 1992].

É necessário que os aterros sejam projetados, licenciados, construídos, operados e monitorados com tecnologia diferenciada (Felipetto, 2007). Dessa forma, do ponto de vista ambiental, o aterro sanitário é indicado como forma adequada de disposição final de RSU com base em critérios de engenharia com a finalidade de preservação ambiental (Santos *et al.*, 2012). Sabe-se que a maioria dos trabalhos de quantificação de biogás são voltados aos aterros sanitários

por possuírem maiores possibilidades de aproveitamento desse gás. Assis (2009), acrescenta em sua obra alguns pré-requisitos para a implantação de aterros sanitários como a existência de solos com o menor coeficiente de permeabilidade possível, a exemplo dos solos argilosos, para auxiliar na impermeabilização junto à camada base de geotêxtil.

3.7. MODELOS DE GERAÇÃO DE METANO

Modelos são representações de processos que ocorrem na realidade. Coops *et al.* (1995), em sua obra, afirmou que diversos modelos de geração de biogás em aterros (LGF) foram descritos na literatura. Esses modelos acabam se dividindo em quatro categorias: de ordem zero, de primeira ordem, de segunda ordem e multifásicos. Segundo Romanel, Santos e van Elk (2017) grande parte dos projetos aplica modelos de primeira ordem. Esses modelos assumem que a emissão de metano seja exponencialmente decrescente com o tempo. De acordo com Di Trapani *et al.* (2011), existem duas abordagens principais para avaliar a emissão de CH₄. A primeira delas se configura em uma abordagem indireta, em que o cálculo é baseado em uma equação de balanço de massa. A segunda, por sua vez, é direta, baseada em Landfill Gas Formation (LFG) de aterros. (Di Trapani *et al.*, 2011).

Di Trapani *et al.* (2018) alegam que, apesar da degradação da matéria orgânica para a produção de gás ser um processo complexo, caracterizado por diferentes taxas de degradação cinética, tem os modelos de cinética de primeira ordem (*first order decay* - FOD) como os mais populares para representar esse processo. Se tratam de modelos simples de serem usados e que fornecem resultados com bons ajustes dos dados reais de campo.

Segundo Pedott e Aguiar (2014), as principais metodologias utilizadas para efetuar os cálculos para estimar o potencial de geração de biogás em locais de disposição de resíduos, entre as diversas existentes, são: a metodologia EPA (US EPA LandGEM), a do IPCC, a do Banco Mundial (Modelo Scholl Canyon) e, por fim, a utilizada pela a UNFCCC, a ACM0001, que é um exemplo de metodologia dentro do MDL, cujo objetivo é o cálculo de emissões fugitivas a partir de RS, aplicada às atividades que objetivam mitigação das emissões de metano através da captura do gás gerado e/ou *flaring* (queima), uso na produção de energia (ex.: elétrica e térmica), ou fornecimento nas redes de distribuição (UNFCCC, 2018). Na seção 3.8, há um melhor detalhamento das alternativas de aproveitamento do biogás. Segundo Piñas *et al.* (2016), existe ainda o modelo de geração de biogás proposto pela CETESB. Esse último é muito semelhante ao modelo do IPCC. Neste trabalho, as metodologias do Banco Mundial (Modelo

Scholl Canyon) e da UNFCCC (ACM0001) não serão utilizadas para quantificação do biogás. Dentre as quatro citadas por Pedott e Aguiar (2014), aquelas que serão melhor detalhadas serão as metodologias: LandGEM (da USEPA) e a do IPCC. Segundo Alves (2000), é possível empregar a metodologia de 1996 do IPCC para estimar as emissões de determinada localidade e a da USEPA para a geração de gás em um LDRS específico.

3.7.1. Parâmetros Utilizados nos Modelos

3.7.1.1. Potencial de Geração de Metano (Lo)

A geração de metano é estimada através do uso do potencial de geração de metano (Lo) que se configura como o potencial de geração de CH₄ do aterro dado em tCH₄/t resíduo. (Alexander, Burklin e Singleton, 2005). Em outras palavras, é a quantidade total de gás metano potencialmente produzida por uma tonelada métrica (Mg) de resíduos à medida que esta decai. (EPA, 2012). Segundo Santos *et al.* (2012), o Lo pode ser obtido em laboratório por meio do ensaio de determinação do Potencial Bioquímico de Metano (BMP). O Lo pode ser obtido em função do fator de correção de metano (FCM), do carbono orgânico degradável (COD), da fração de COD dissociada (COD_f) e fração do metano presente no biogás em volume (F).

➤ Ensaios do Potencial Bioquímico de Metano (BMP)

Os ensaios de Potencial Bioquímico de Metano (BMP) são testes de biodegradabilidade da matéria orgânica, sendo, dessa forma, capazes de quantificar o CH₄ gerado durante a decomposição de RSU. Os estudos que utilizam ensaios BMP apresentam diferentes métodos, tendo como abordagem básica a incubação anaeróbia de porções de resíduos juntamente com um inóculo. Isso possibilita a aferição do biogás gerado e sua composição ao final do experimento. (Santos *et al.*, 2012). Rodrigues *et al.* (2018) apresentam, em seu trabalho, o conceito de potencial bioquímico de metano (BMP) que corresponderia à produção máxima de metano na digestão anaeróbica, parâmetro-chave na adequação dos substratos para a obtenção do biogás.

3.7.1.2. Carbono Orgânico Degradável (COD)

O carbono orgânico degradável (COD), nas palavras de Assis (2009): “é a fração acessível para a decomposição bioquímica dos resíduos”. Segundo Necker e Rosa (2013), o COD considera a composição gravimétrica dos RSU e, conseqüentemente, a quantidade de carbono capaz de degradar nesses resíduos. A lignina (encontrada em plantas, madeira e papel), por exemplo,

apresenta um percentual considerável de carbono orgânico degradável e é responsável por grande quantidade desse fator. O COD se decompõe lentamente ao longo dos anos e, nesse período, metano e dióxido de carbono são formados. (Filho, 2018). Esse valor, portanto, se trata de algo que varia de local para local e depende do detalhamento da composição gravimétrica dos resíduos gerados pela população. Segundo Assis (2009), caso não se conheça as frações dos resíduos, o IPCC sugere a adoção do valor de 12% para a realização dos cálculos. A Tabela 5 apresenta o teor de COD para diferentes resíduos.

Tabela 3 - Teor de COD para cada componente do lixo.

Componente	Porcentagem de COD (em massa)
A) Papel e Papelão	40
B) Resíduos de Parques e Jardins	17
C) Restos de Alimentos	15
D) Tecidos	40
E) Madeira (excluindo a fração de lignina que se decompõe muito lentamente)	30

(Fonte: Britto, 2006).

3.7.1.3. Fração de COD dissociada (COD_f)

A fração de carbono orgânico degradável dissociada (COD_f) é a parcela do COD que vai se degradar dentro das condições anaeróbias do LDRS. Esse fator reflete o fato de que parte do carbono orgânico degradado não degrada ou degrada muito lentamente em condições anaeróbias. É influenciado diretamente pela temperatura na zona anaeróbia dos resíduos. O valor padrão recomendado para COD_f é 0,5 sob a suposição de que o LDRS é anaeróbico e as frações de COD incluem lignina. (IPCC, 2006).

3.7.1.4. Fator de Oxidação do Metano (OX)

O fator de oxidação reflete a quantidade de metano gerada no aterro que se oxida no solo ou em materiais que cobrem os resíduos. LDRS bem gerenciados, a exemplo de alguns aterros sanitários, tendem a ter taxas de oxidação (OX) mais altas do que locais de despejo (ex.: lixões) não gerenciados. Isso se deve ao fato de que locais cobertos com material espesso promovem fatores de oxidação diferentes de locais bem aerados, onde grandes quantidades de CH₄ podem escapar para a atmosfera, sem serem oxidadas, através de rachaduras e fissuras. (IPCC, 2006). Segundo a EPA (2012), a metodologia do IPCC atribui valores para oxidação de metano equivalente a 10% do biogás não coletado – para locais gerenciados com coberturas oxidantes

do solo – e 0% para os demais locais. O valor padrão do fator de oxidação é zero, o uso de 0,1 para esse fator se justifica por LDRS cobertos e bem gerenciados para estimar tanto difusão como emissões fugitivas. (IPCC, 2006).

3.7.1.5. Fator de Correção do Metano (FCM)

O fator de correção do metano (FCM) considera que os LDRS mal gerenciados produzem menos CH₄ de uma dada quantidade de resíduos do que LDRS bem gerenciados. No caso de aterros sanitários, situação em que há disposição planejada de resíduos, considera-se que 100% dos resíduos estarão dispostos em condições de anaerobiose. Dessa forma, o fator é 1,0. No caso de locais de despejo, como lixões, é adotado 0,4 para aqueles que possuem células de até cinco metros e 0,8 para aqueles com células maiores que cinco metros (IPCC, 2006). O IPCC atualmente sugere o fator de 0,6 na dificuldade de classificação do LDRS. A Tabela 6 apresenta os valores de FCM em função de diferentes tipos de LDRS. Estes se diferenciam conforme suas profundidades, condições de anaerobiose e conforme o grau de gerenciamento do local.

Tabela 4 - FCM recomendado pelo IPCC por tipo de Local de Disposição de Resíduos Sólidos

LDRS	FCM
Gerenciado anaeróbico	1,0
Gerenciado semi-anaeróbico	0,5
Não gerenciado – Profundo (> 5 m)	0,8
Não gerenciado – Pouco profundo (< 5 m)	0,4
LDRS não classificado (IPCC)	0,6

(Fonte: Filho, 2018; IPCC, 2006).

3.7.1.6. Constante de decaimento (k)

A constante de decaimento (k) descreve a taxa com que determinado rejeito decai e produz metano. (EPA, 2012). É função da degradabilidade do resíduo, do teor de umidade do aterro, da disponibilidade de nutrientes para organismos metanogênicos, do pH e da temperatura (Alexander, Burklin e Singleton, 2005). Teores de umidade de até 60% e pH entre 6,6 e 7,4 promovem o aumento dessa constante (Regattieri, 2009). Essa taxa está relacionada ao tempo que o COD leva para decair à metade de sua massa. Segundo Romanel, Santos e van Elk (2017), os modelos FOD consideram a variação anual das emissões de metano com base nos parâmetros k e Lo. O parâmetro k, por sua vez, pode ser apresentado como na Equação 1:

$$k = \frac{\ln(2)}{t^{1/2}} \quad (1)$$

onde,

k = constante de decaimento (ano⁻¹);

t^{1/2} = meia vida do carbono degradável (anos).

Através da Tabela 7, pode-se verificar que, taxas mais rápidas, a exemplo de k = 0,2 (que representam uma meia vida de aproximadamente 3 anos), estão associadas a condições de alta umidade, bem como à existência de materiais rapidamente biodegradáveis, como os restos de alimentos. Taxas de decomposição mais lentas, como k = 0,03, se associam a aterros de resíduos secos de degradação lenta, a exemplo do papel (Abreu, 2009). O Anexo A também nos mostra como essa constante varia de acordo com a tipologia do resíduo e as condições climáticas.

Tabela 5 - Significado dos valores da taxa de geração de metano (k).

k	Indicação
0,2	Decaimento Rápido
0,03	Decaimento Lento
0,05	Padrão

(Fonte: Filho, 2018, adaptado de Penman *et al.* 2000).

Segundo Sun et al. (2015), o valor padrão de k é de 0,09 ano⁻¹, conforme recomendado pelo IPCC. Entretanto, cientistas chineses acreditam que esse valor padrão é muito baixo considerando RSU contendo muitos restos alimentícios. Dessa forma, estabelecem um valor muito mais alto de 0,3 ano⁻¹. No estudo desenvolvido pelos autores, ambos os valores de 0,09 e 0,3 anos⁻¹ foram usados comparativamente para estimar a quantidade de metano produzido em determinados aterros chineses selecionados. O Anexo B apresenta valores para k utilizados por diferentes autores em seus trabalhos.

3.7.1.7. Fração do Metano Presente no Biogás (F)

Esse parâmetro se refere ao percentual de metano presente no biogás. Pode ser encontrado através de aparelhos de medição de biogás no aterro. A Tabela 2 da seção 3.2 apresenta algumas variações desse percentual, segundo diferentes autores. Se o aterro não possuir o valor real da fração de metano, é possível utilizar a estimativa de 0,5, pois geralmente a quantidade de metano presente no biogás de aterro é de 50% (Fonte: Bezerra *et al.*, 2015).

3.7.2. Metodologia do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC)

A metodologia do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) foi elaborada e definida, como ponto de partida, para que os países signatários da UNFCCC pudessem gerar inventários das estimativas de emissões de GEE dentro do país e compará-las com as de outros países (Alves, 2000). Esse método pressupõe a decomposição do carbono orgânico degradável (COD) e a consequente geração de metano, que pode ser determinada através deste e de outros parâmetros (Filho, 2018). Segundo Pedott e Aguiar (2014), por ser a metodologia mais utilizada para a realização de inventários, tem sua aplicação reduzida quando o interesse é quantificar o potencial de aproveitamento de biogás em aterros. A Equação do Inventário do IPCC foi apresentada em 1996 e se trata de um método simplificado para a estimativa da emissão de metano em aterros sanitários (Necker e Rosa, 2013). Passou por uma revisão e obteve uma nova versão no ano de 2006 (Filho, 2018; EPA, 2012).

A Equação 2 do IPCC fornece a estimativa quantidade de CH₄ baseada nos parâmetros de degradabilidade dos resíduos. Segundo Tarazona (2010), essa equação seria uma estimativa razoável para deposições constantes ao longo do tempo, pois se trata de uma aproximação de balanço de massa que não incorpora o parâmetro tempo (t). Isso pressupõe que todo o CH₄ seria emitido imediatamente no ano em estes foram dispostos.

$$CH_4 = (PopUrb \times Taxa \text{ RSU} \times RSDf \times Lo - R) \times (1 - OX) \quad (2)$$

onde,

CH₄ - quantidade de gás metano emitido em toneladas de CH₄/ano;

PopUrb - número de habitantes residentes na área urbana;

Taxa RSU - resíduos sólidos urbanos gerados, dado em toneladas de RSU/habitante x ano;

RSDf - fração dos resíduos que é coletada e depositada no aterro sanitário;

Lo - potencial de geração de metano dos resíduos em toneladas de CH₄/toneladas de resíduo;

R – quantidade de metano recuperado (aproveitado) em toneladas de CH₄/ano;

OX - fator de oxidação do metano na superfície do aterro sanitário.

A Equação 2 é composta por alguns parâmetros necessários para a quantificação do metano emitido em toneladas de CH₄/ano. Na equação, multiplica-se o total de resíduos produzidos pela poluição urbana estimada e, então, é descontado o metano captado para aproveitamento energético. Logo após, desconta-se a parcela de metano que se oxidou na superfície do aterro. Essa equação pode ser desmembrada nas equações 2, 3 e 4. Sem as equações subsequentes, não

é possível calcular alguns dos parâmetros que servem como *inputs* da primeira equação apresentada.

A Equação 2 é a equação do potencial de geração do metano que, como elucidado na seção 3.7.1, também pode ser estimado através de ensaios de Potencial Bioquímico de Metano (BMP). Essa equação é dada pela interação dos parâmetros a seguir:

$$Lo = FCM \times COD \times CODf \times F \times 16 / 12 \quad (3)$$

onde,

Lo - potencial de geração de metano dos resíduos em toneladas de CH₄/tonelada de resíduo;

FCM - fator de correção de metano;

COD - carbono orgânico degradável, dado em tonelada de C/tonelada de resíduo;

CODf - fração de COD dissociada;

F - fração do metano presente no biogás em volume;

(16/12) - fator de conversão do carbono em metano, dado em tonelada de CH₄/tonelada de C.

Os parâmetros que definem Lo são: o FCM, que varia em função das condições de anaerobiose dos LDRS (se 100% dos resíduos estivessem dispostos em condições de anaerobiose, esse fator seria equivalente a 1); o COD, que é a fração orgânica dos diferentes tipos de resíduos passível de ser decomposta; o CODf, que é a parcela orgânica que será efetivamente degradada dentro das condições anaeróbicas; a fração F de metano presente dentro do biogás, que geralmente varia entre na faixa de 40 a 60%. A Equação 4 é um exemplo de cálculo de COD de acordo com a adoção de fatores para alguns tipos de materiais.

$$COD = (0,4 * A) + (0,17 * B) + (0,15 * C) + (0,4 * D) + (0,3 * E) \quad (4)$$

onde,

A - fração de papel e papelão dos resíduos (% em massa);

B - fração de detritos de parques e jardins dos resíduos (% em massa);

C - fração de restos de alimentos dos resíduos (% em massa);

D - fração de tecidos dos resíduos (% em massa);

E - fração de madeira dos resíduos (% em massa).

Essa equação (4) depende da composição gravimétrica estimada dos resíduos orgânicos gerados (neste exemplo, dividida nas categorias de A a E para o cálculo do COD). Entretanto, é possível acrescentar outros fatores referentes a resíduos de outros tipos que contribuam para o cálculo

do COD (ex.: borracha e couro, que possuem fator 0,39 [% COD em massa úmida] ou fraldas com fator de 0,24) (Paustian, Ravindranath e Amstel, 2006). Estes resíduos gerados são representativos de toda, ou de grande parte, da população que contribui com a parcela de resíduos aterrados no LDRS em estudo. Dessa quantidade disponível para decomposição, apenas uma parte é efetivamente decomposta em termos de temperatura da zona aeróbia e dado pela Equação 4:

$$CODf = 0,014 * T + 0,28 \quad (5)$$

onde,

CODf - fração de COD dissociada;

T - temperatura na zona anaeróbia dos resíduos (estimada em 35°C).

Em relação às vantagens e desvantagens do modelo, Pedott e Aguiar (2014) apresentam alguns pontos. Como exemplos de vantagens, os autores citam: o cálculo para todos os tipos de disposição de resíduo e a consideração das especificidades de COD dos resíduos depositados. Como desvantagens, citam as incertezas de 50% a 20% associadas aos parâmetros sugeridos no modelo e que o modelo não considera fatores climáticos, problematizam ainda que o modelo não pode ser aplicado em sistemas encerrados.

A metodologia cinética de primeira ordem do IPCC estima as emissões de CH₄ gerados pela decomposição dos resíduos, admitindo que este seja emitido ao longo do tempo. (Tarazona, 2010). O modelo se baseia em um decaimento de primeira ordem.

$$\sum Q_{CH_4} = k.Rx.Lo.e^{-k(T-x)} \quad (6)$$

onde,

Q_{CH₄} - emissão de metano no ano atual (m³ CH₄/ano);

k - constante de decaimento (ano⁻¹);

Rx - quantidade de resíduos dispostos no ano x (t RSD);

Lo - potencial de geração de metano por tonelada de resíduos (m³ / t RSD);

T - ano atual;

x - ano de deposição do resíduo no aterro (início de operação).

A metodologia dada pela Equação 6 acrescenta a constante de decaimento e o intervalo de tempo da disposição de resíduos, no aterro, no cálculo da emissão de CH₄.

3.7.3. Metodologia LandGEM (USEPA)

O Modelo de Emissões de Gás de Aterro Sanitário – *Landfill Gas Emissions Model* (LandGEM) – é uma ferramenta desenvolvida no Microsoft Excel pela USEPA, utilizada para estimar o fluxo de gases gerados em um aterro. Dentre esses gases, é possível citar o CH₄, o CO₂ e outros poluentes atmosféricos gerados através da decomposição que ocorre nos aterros sanitários de RSU. O modelo é baseado em uma equação de taxa de decomposição de primeira ordem para estimar as emissões da decomposição de resíduos depositados em aterros de RSU (Alexander, Burklin e Singleton, 2005).

Segundo Abreu (2009), esse modelo proposto pela USEPA requer o conhecimento do histórico da deposição dos resíduos ou, pelo menos, da quantidade de lixo depositada e da data de abertura do aterro. Esse modelo usa uma função exponencial de degradação de primeira ordem para estimar a geração de biogás com base em todos os resíduos despejados no local até determinado ano (Alexander, Burklin e Singleton, 2005). A Equação 6 da taxa de decomposição de primeira ordem é aplicada para estimar a quantidade de gás emitida para cada um dos anos do inventário:

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 k \cdot Lo \cdot \left(\frac{Mi}{10} \right) \cdot e^{-kt_{ij}} \quad (7)$$

onde,

Q_{CH_4} = geração anual de metano no ano do cálculo (m³/ano)

i = incremento de tempo de 1 ano

n = (ano do cálculo) - (ano inicial de aceitação de resíduos)

j = incremento de tempo de 0,1 ano

k = taxa de geração de metano (ano⁻¹)

Lo = potencial de geração de metano (m³/Mg)

Mi = massa de resíduos aceitos no i -ésimo ano (Mg)

t_{ij} = idade da j -ésima seção da massa de resíduos Mi aceita no i -ésimo ano (anos decimais, por exemplo, 3,2 anos).

A geração de metano (Q_{CH_4}) pode ser dada em metros cúbicos por ano (m³/ano); pés cúbicos médios por minuto (ft³/minuto) ou massa por ano (Megagramas [Mg] / ano) (EPA, 2012).

Alexander, Burklin e Singleton (2005), citam algumas vantagens e desvantagens da ferramenta *LandGEM*. Como exemplos de vantagens, mostram que: os padrões do modelo seguem os regulamentos federais para aterros sanitários nos Estados Unidos e fatores de emissões da US EPA, também mostram que é possível alterar os valores padronizados na calibração do modelo, sendo que o modelo permite que o usuário insira dados obtidos por análises *in situ* e edite concentrações. Como desvantagens, colocam, por exemplo, que: os padrões do modelo são empíricos, formulados segundo as situações dos aterros norte-americanos, o que pode limitar a aplicação para outros aterros sem a alteração dos parâmetros. A EPA (2012) acrescenta ainda que o modelo LandGEM não inclui o cálculo de oxidação.

3.7.4. Dedução das Variações dos Modelos LFG e Exemplos de Aplicações

Segundo a EPA (2012), a geração total de biogás é igual ao quociente de vazão de metano (dado em m³/ano por exemplo) dividido pela fração volumétrica de metano assumida no biogás (F). Matematicamente, a geração de metano calculada para o caso de o biogás conter 50% de metano é dada pela seguinte expressão:

$$Q_{LFG} = Q / 0.5 = 2Q \quad (8)$$

Dessa forma, o máximo quociente de vazão de biogás “Q_M” seria a Equação 7 (Manual do LandGEM para geração de CH₄) multiplicada por 2 para a obtenção da vazão máxima de biogás, elucidada através da Equação 9. Essa equação foi retirada do *User’s Manual Central America Landfill Gas Model* (Ludwig, 2007).

$$Q_M = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 2.k.Lo.\left(\frac{Mi}{10}\right).e^{-kt_{ij}} \quad (9)$$

Como variações, essa Equação 9, na obra de Aguilar-virgen *et al.* (2014), é multiplicada pelo fator de correção do metano (FCM) e um fator de ajuste de queima.

Outras variações podem ser observadas ao se lidar com diferentes formas matemáticas de abordagem. Urrego-Martínez e Rodríguez-Miranda (2016) apresentam duas formulações de decaimento de primeira ordem (FOD) do Modelo Mexicano (Equação 10) e EPA (Equação 12). Utilizaram os dados de resíduos acumulados no período curto de 2008 e 2009 – equivalentes a um total de 523.675,584 toneladas – para estimar a geração de biogás para um horizonte de 20 anos em um estudo de caso no aterro Doña Juana em Bogotá. O modelo mexicano pode ser descrito matematicamente:

$$Q_M = \sum_{i=1}^n 2.k.Lo.Mi.(e^{-kt_i}) \quad (10)$$

onde,

Somatório - do ano de abertura do aterro +1 (i = 1) até o ano de projeção do encerramento (n);

Q_M = índice de geração de biogás (m³/ano);

Lo = potencial máximo de geração de metano dos resíduos (m³ / Mg);

k = índice de decaimento de metano (ano⁻¹);

Mi = massa de resíduos dispostos no ano i;

t_i = idade dos resíduos depositados no ano i (anos).

Se integrarmos a parcela $k.e^{-k.t}$ em relação a t , dentro dos limites T (tempo de abertura do aterro) a C (tempo desde o encerramento do aterro), obtemos o seguinte:

$$\int_C^T k.e^{-k.t} dt = e^{-k.C} - e^{-k.T} \quad (11)$$

Dessa forma, é possível obter, através da Equação 10 do modelo mexicano, a Equação 12 da EPA. Nessa equação, a massa de resíduos dispostos em cada ano não seria de relevância para o modelo, apenas a média anual dos resíduos dispostos.

$$LFG = 2.Lo.R.(e^{-k.C} - e^{-k.T}) \quad (12)$$

onde,

LFG = quantidade total de gás de aterro no ano em consideração (pés³);

Lo = potencial total de geração de metano dos resíduos (pés³ / libra);

R = média anual de resíduos dispostos durante sua vida ativa (libras);

k = taxa anual de geração de metano (ano⁻¹);

T = tempo desde a abertura do aterro (anos);

C = tempo desde o encerramento do aterro (anos).

Os resultados médios de geração de biogás obtidos no estudo de caso do aterro em Bogotá, utilizando-se das duas metodologias mexicana e EPA, são muito próximos e iguais a 2,48E+05 m³/ano (para o mexicano) e 2,14E+05 m³/ano (para EPA). Os valores de pico de produção de metano foram: 3,45E+05 m³/ano (para o modelo EPA) e 4,46E+05 m³/ano (para o modelo mexicano), ambos atingidos no ano de 2010. Os gráficos A) e B), que apresentam os resultados, podem ser mostrados na Figura 8.

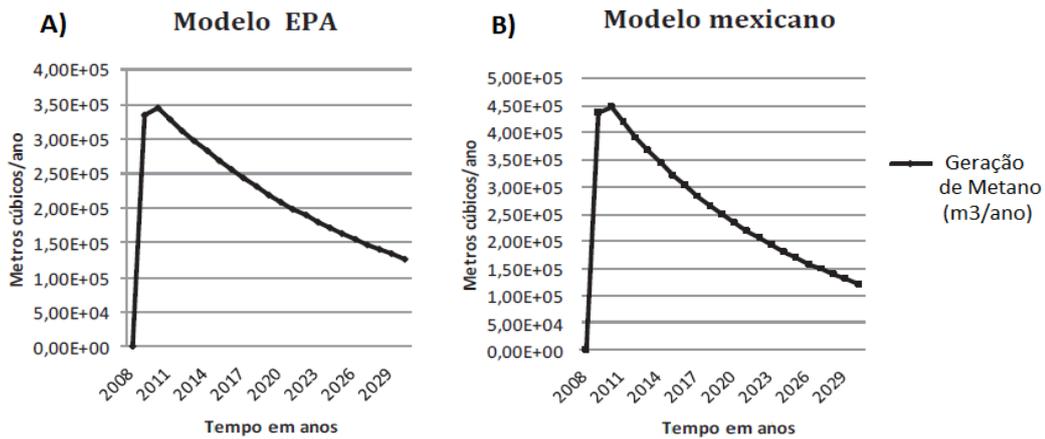


Figura 8 - Comparação quantitativa de qualitativa das metodologias A) EPA e B) Modelo Mexicano (Fonte: Urrego-Martínez e Rodríguez-Miranda, 2016).

Observa-se o decaimento, em ambos os gráficos, para o horizonte de 20 anos. O Anexo B mostra que os autores utilizaram como parâmetros: $k = 0,05 \text{ ano}^{-1}$ e $Lo = 170 \text{ m}^3/\text{t}$ para o Modelo EPA (valores do CAA *Coventional* – conceito que será explicado na seção 4.2.3.1), mas utilizaram $k = 0,065 \text{ ano}^{-1}$ e $Lo = 84 \text{ m}^3/\text{t}$ para o Modelo Mexicano, conforme o artigo.

Filho (2018) analisa comparativamente os modelos: Método de Decaimento de Primeira Ordem do IPCC – similar à Equação 6, acrescida de um fator de correção da soma, que entra multiplicando essa equação – e LandGEM (da EPA) para dados estimados de resíduos aterrados no ACJ. Obteve para o intervalo de resíduos aterrados e parâmetros adotados (detalhe: adotou $k = 0,15$ para IPCC e $k = 0,04$ para o LandGEM e utilizando iterações de Lo [$\text{Gg CH}_4 / \text{Gg resíduo}$] para o IPCC e $100 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{Mg resíduo}$). Como resultado, obteve 34 Gg de CH_4 para o IPCC (no ano do inventário: 2016) e 32 Gg de CH_4 para o valor de pico do LandGEM (no ano 2017) o autor sobrepõe os resultados gráficos gerados para a análise crítica do comportamento de cada modelo, como pode ser mostrado na Figura 9.

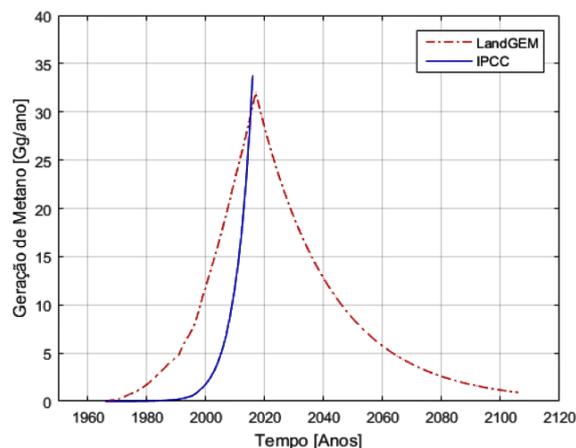


Figura 9 - Análise gráfica dos comportamentos das metodologias IPCC e LandGEM (Fonte: Filho, 2018).

3.8. APROVEITAMENTO DO BIOGÁS

Em lixões desativados, o aproveitamento de biogás é limitado por não haver reposição contínua de resíduos e nem um controle das células de resíduos depositadas ao longo do tempo. Segundo Badurek (2018), a coleta do gás no aterro é necessária para evitar explosões causadas pelo acúmulo de metano e também para evitar a liberação de gases do efeito estufa.

3.8.1. Entraves na Recuperação Energética do Biogás

A utilização do biogás como combustível em turbinas, motores e microturbinas só é possível através de seu pré-tratamento, com a remoção de H₂S e umidade e da determinação do real potencial de geração de energia elétrica a partir de sua vazão, composição química e poder calorífico (Coelho *et al.*, 2004). A presença de gases corrosivos e outros compostos na composição do biogás são obstáculos para o seu armazenamento e consequente produção de energia. Equipamentos como motores a combustão, geradores, bombas, compressores, termostatos e medidores de vazão, são atacados por esse gás e têm suas vidas úteis reduzidas. A remoção de elementos como água, CO₂, gás sulfídrico, enxofre e outros componentes por filtros e dispositivos de resfriamento, condensação e lavagem é necessária para o emprego adequado do biogás (Oliveira e Ramalho, 2006).

O risco de explosão é um grande problema enfrentado na tentativa de aproveitamento de biogás ao se lidar com áreas extremamente instáveis. Células de resíduos mais profundas possuem maiores chances de possuir bolsões de gás, de alto poder calorífico, que se acumularam em locais confinados ao longo do tempo. O teor de metano é o principal fator de risco para a ocorrência de incêndios e explosões. Há um intervalo limite para a explosão que se situa entre 5 a 15% à pressão atmosférica e temperatura ambiente (Genbedien *et al.*, 1992, *apud* Regattieri, 2009). Segundo Regattieri (2009), se ocorrer constante ventilação de biogás para a atmosfera esse risco pode inexistir. Por isso, é necessário que mais pesquisas sejam realizadas, de forma a reduzir os riscos, na realização de quaisquer tipos de aproveitamento de biogás.

Segundo Santos, Barros e Filho (2015), um dos maiores entraves para o aproveitamento energético do biogás, em aterros sanitários, é a viabilidade econômica. Esse aproveitamento se torna viável para cidades com população superior a 200.000 habitantes. Zulauf (2004), relata sobre a limitação do potencial de geração de energia pelo biogás em lixões já desativados, dado que esses depósitos de resíduos foram operados sem mecanismos de drenagem. Caso o lixão tenha interrompido suas atividades e não houver a ocorrência de futuros depósitos de RSU, sua

viabilidade econômica será reduzida (Zulauf, 2004). Também é importante destacar que todo fluido *Newtoniano* adota caminhos preferenciais. Dessa forma, a instalação de sistemas de captação do biogás em antigos lixões possui obstáculos, dado que não houve a disposição planejada das células de resíduos nesse local. Em geral, os trabalhos de aproveitamento de biogás especificamente em lixões, dentro do país, não obtiveram resultados satisfatórios.

3.8.2. Custo e Eficiência Energética do Biogás

Segundo Atabi, Ehyaei e Ahmadi (2014), o gás de aterro tem um valor de aquecimento de 20,5 MJ/m³. Santos, Barros e Filho (2015) demonstram que o biogás possui poder calorífico próximo a 22 MJ/m³. O potencial energético médio de aproveitamento de biogás, nos aterros, é de cerca de 2 GJ (1.895.634 BTU) por tonelada degradada de resíduos (Badurek, 2018).

A captura do metano, gerado a partir da decomposição dos RSU em aterros, tem sido objetivada em muitos países como método viável para se reduzir as emissões de gases de estufa (GEE) e se obter recuperação energética (Kalantarifard e Yang, 2012). Na Tabela 6, há a apresentação de um comparativo de custos em R\$/MW para cada uma das tipologias energéticas implantadas.

Tabela 6 - Comparativo de custos de implantação por tipologia energética (R\$/MW).

Tipologia Energética	R\$ / MW
Usinas de biomassa tradicional (principalmente bagaço)	144
Pequena central hidrelétrica (PCH)	142
Usinas Eólicas	131
Energia Solar (painéis de fotocélula)	500
Biogás de vazadouros a céu aberto (lixões)	381
Biogás de aterros sanitários	284
Biogás (média entre lixões e aterros sanitários)	323

(Fonte: Arcadis Tetraplan, 2010).

Ocorreu significativa superestimação da quantidade de biogás gerada nos aterros sanitários, nos primeiros projetos MDL desempenhados no país, uma vez que não foram considerados vários fatores que influenciavam na quantidade e na qualidade do biogás (Romanel, Santos e van Elk, 2017). A Tabela 7 apresenta a produção média de biogás a partir dos resíduos produzidos diariamente em Brasília.

Tabela 7 - Produção municipal de metano a partir de biogás do aterro utilizando a metodologia IPCC/CETESB.

Município	População Urbana	Lixo (t/dia)	Emissão de CH ₄ (t/dia)	Emissão de CH ₄ (m ³ /dia)	Emissão de CH ₄ (m ³ /hora)	Potencial (MW)	Energia (MWh/dia)
Brasília	2.570.160	1.028,06	38,00	54.359,44	2.264,98	4	90

(Fonte: IEE USP, 2010).

Sabe-se que os novos estudos mudaram a representação das alternativas preferenciais de destinação de resíduos e que, na prática, a destinação é realizada de maneira diferente do que se apresenta na Figura 10. Por outro lado, a pirâmide representada abaixo, trata-se de uma representação antiga, muito difundida, em relação à questão da destinação dos resíduos.



Figura 10 - Pirâmide de preferências dentro da Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (Adaptado de EPA, 2012).

Segundo ICLEI (2009), a principal aplicação do metano gerado em aterros é como combustível em motores de combustão interna a gás (*WtE*). Esses motores movimentam geradores de energia elétrica. Segundo Piñas *et al.* (2016), há inúmeros projetos de aproveitamento energético no Brasil, como nos aterros Bandeirantes e São João em São Paulo. Ambos já produzem energia elétrica.

Coelho *et al.* (2006), elucida que, para que o biogás gerado nos aterros possa ser utilizado, seja em motores, turbinas a gás ou microturbinas, é necessário identificar a vazão do gás, seu poder calorífico e composição química. Além disso, processos de pré-tratamento do biogás, como a remoção de H₂S e de umidade para evitar danos aos equipamentos e para o aumento do poder calorífico do gás, são imprescindíveis. Segundo o autor, as turbinas a gás e os Motores Ciclo Otto de combustão interna ainda são as tecnologias mais utilizadas para a conversão energética

do biogás. Caserana *et al.*, 2011 (*apud* Santos, Barros e Filho, 2015), também comentam sobre a maior rentabilidade do aproveitamento energético do biogás por meio de co-geração em motores de Ciclo Otto.

De acordo com Piñas *et al.* (2016), independentemente do uso final do biogás, é necessário projetar um sistema padrão de coleta, tratamento e queima do biogás com: poços de coleta, sistema de condução, tratamento e desumidificação do gás, compressor e *flare* com queima controlada para garantia de maior eficiência de queima do metano. A Figura 11 apresenta um diagrama de alternativas para o aproveitamento do biogás.

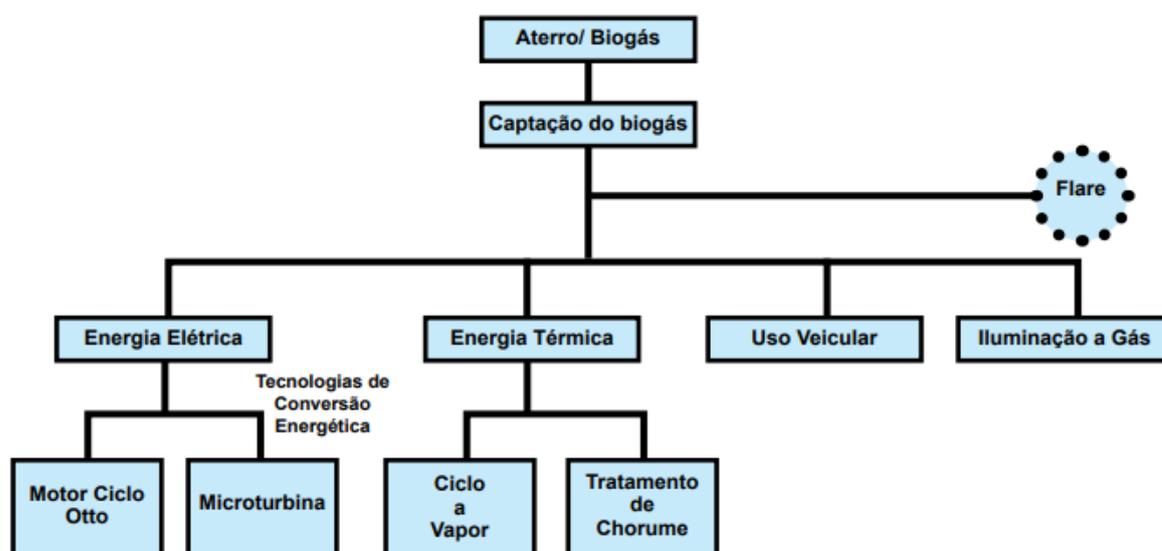


Figura 11 - Diagrama de alternativas de aproveitamento de biogás. (Fonte: ICLEI, 2009, adaptado do Instituto Agir Sustentável).

No trabalho de Santos, Barros e Filho (2015), dois cenários são analisados. O primeiro composto por: dreno, gasoduto (tubulação de coleta) e *flare* (queimador), onde não ocorre a recuperação de energia elétrica por meio do biogás gerado. O segundo, contendo a mesma composição do primeiro, mas objetivando a recuperação energética, por meio da adição de unidade de tratamento para a purificação do biogás e remoção dos compostos indesejados, gasômetro, compressor, tecnologia de conversão energética e gerador elétrico. No trabalho de Jucá, Maciel e Neto (2011) o biogás coletado na célula era direcionado para uma usina piloto, cujos componentes compreendiam: um gerador, um compressor radial (responsável por aplicar vácuo na rede de coleta de forma a extrair o biogás com melhor eficiência), um sistema trocador de calor, um filtro de biogás, um *flare* aberto, um medidor volumétrico de biogás e dispositivos de segurança para o sistema.

Tapahuasco (2009) menciona que a taxa de produção de biogás em camadas de resíduos sólidos urbanos é função da massa específica do gás, de sua distância radial ao centro do dreno vertical, da profundidade vertical em relação ao topo da camada final de cobertura e da velocidade de fluxo de gás tanto na direção horizontal como na direção vertical. Quanto mais profunda for a célula perfurada, maior é a chance de encontrar bolsão de biogás gerado pela digestão anaeróbia. Entretanto, em locais mal gerenciados, maior é o risco de estar lidando com área de imensa instabilidade no aterro.

3.8.3. Instrumentos de Drenagem

Os sistemas de coleta de biogás em aterros sanitários podem ter a configuração de poços verticais (Figura 12A) ou valas horizontais (Figura 12B). O método mais comum de coleta de LFG é através da perfuração de poços verticais no lixo aterrado e a ligação desses poços a uma tubulação lateral transportadora de gás para local de coleta específico. Outro tipo de sistema de coleta de LFG envolve tubulações horizontais dispostas em trincheiras (células de tamanho pré-determinado) no lixo. Alguns sistemas envolvem a combinação de poços verticais e coletores horizontais. A escolha do tipo de sistema de coleta de biogás depende das condições do local e do momento da instalação e qualquer tipo bem projetado será eficaz na coleta de LFG (EPA, 2017).

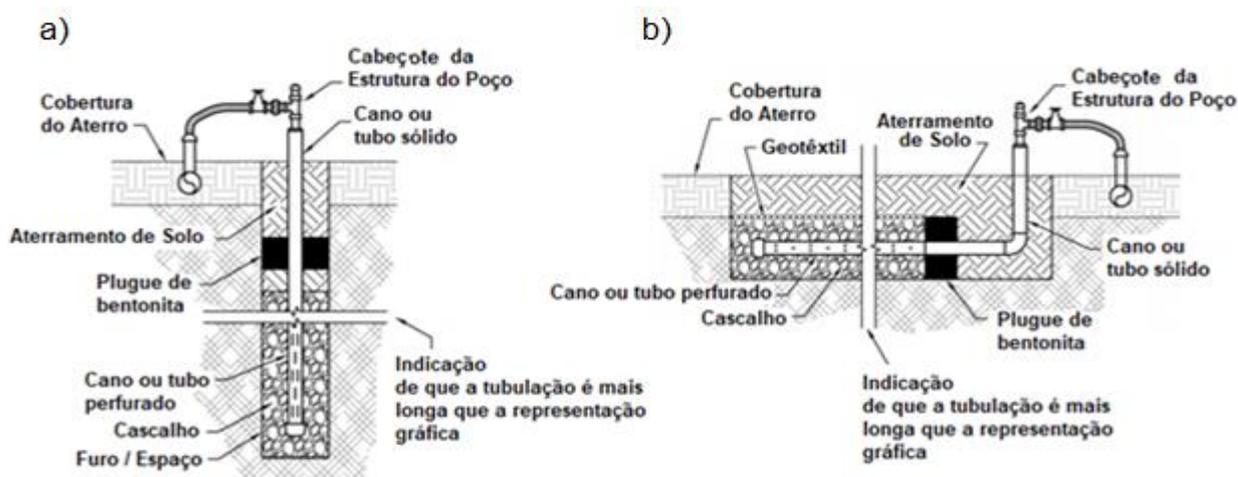


Figura 12 - a) Poço de Extração Vertical de LFG e b) Poço de Extração Horizontal de LFG. (Adaptado de EPA, 2017).

Um exemplo de poço de extração vertical de captação de biogás em aterro sanitário é o do Aterro de Caieras em São Paulo, apresentado na Figura 13.



Figura 13 - Captação de Biogás em aterro Sanitário - Aterro da Essencis CAIERAS (Fonte: Assis, 2009, adaptado de CENBIO, 2006).

Os drenos já existentes, na maioria dos aterros sanitários brasileiros, e que apresentam boa vazão de biogás, podem ser adaptados através da impermeabilização de suas partes superiores, da instalação de cabeçotes e da interligação a sistemas de coleta (ICLEI, 2009). Um exemplo de dreno, que pode ser adaptado e inserido ao sistema de captação de biogás, é apresentado na Figura 14.



Figura 14 - Exemplo de dreno típico de aterro, que pode ser adaptado e inserido no sistema de captação de biogás (Fonte: ICLEI, 2009, adaptado do acervo CENBIO).

3.8.4. Queimadores

A maioria dos aterros sanitários com sistemas de recuperação de energia inclui *flares* (nomenclatura para o queimador projetado em aterros sanitários) para a combustão do excesso de gás e para uso durante paradas do equipamento (EPA, 2017). Segundo o IPCC (2006), a queima do biogás em *flares*, mostrada na Figura 15, é necessária para produzir CO₂, que tem menor potencial de aquecimento global, como GEE, que o metano. O biogás é conduzido para os drenos verticais, nos quais os *flares* são acoplados (Borba, 2006).



A)

B)

Figura 15 - A) Imagem de um flare de biogás com chamas durante a queima e B) outro exemplo de flare. (Fonte: EPA, 2017¹).

Existem manilhas de concreto que apresentam perfurações ou porosidade para possibilitar a drenagem do biogás do aterro. Nesses locais, ocorre a combustão do combustível subterrâneo (biogás) através de fonte de ignição fornecida por quem trabalha no local. Para apagar o fogo proveniente do processo de combustão, é necessário interromper a entrada do comburente (O_2). Isso pode ser feito através do abafamento do dreno-queimador que pode ser visto na Figura 16.



Figura 16 – Queimador em funcionamento no ACJ.

3.8.5. Principais Métodos de Medição de Biogás

Segundo Maciel (2003), os principais métodos de medição de fluxo de gases pela camada de cobertura de um aterro, correspondem à placa de fluxo estática, placa de fluxo dinâmica e análises por infravermelho (por processos óticos ou térmicos). Mariano e Jucá (2010) mencionam os mesmos três métodos. Os princípios que regem esses métodos de medição, suas vantagens, desvantagens e escalas (espacial e temporal) são melhor descritos na Tabela 8.

Tabela 8 - Principais métodos de medição de biogás e técnicas qualitativas de reconhecimento para a localização de hotspots. (Adaptado de Maciel, 2003 e Mønster et al., 2019).

Método	Princípio	Vantagens	Desvantagens	Abrangência	
				Espacial	Temporal
Placa de Fluxo	Avaliação da concentração dos gases, ao longo do tempo em caixas fechadas (estáticas) ou semiabertas (dinâmicas) cravadas no solo de cobertura.	<ul style="list-style-type: none"> * Mais preciso na determinação da emissão pontual; * Larga experiência prática; * Baixo custo; * Simples instalação; * Permite a avaliação simultânea de diversos gases; * Permite determinar parâmetros do solo de cobertura. 	<ul style="list-style-type: none"> * Necessita de inúmeros ensaios para a obtenção da emissão total do aterro; * A duração do ensaio se prolonga a depender das dimensões da placa. 	m ²	Horária
Análises por Infravermelho	Detecta a concentração do biogás acima da superfície do aterro por processos óticos e/ou térmicos através da passagem de luz infravermelha.	<ul style="list-style-type: none"> * Mais preciso na obtenção da emissão total no aterro; * Cobre rapidamente vários hectares; * Passível de identificar dispersão da pluma de contaminação. 	<ul style="list-style-type: none"> * Alto custo; * Tecnologia nem sempre disponível; * Necessita de mão de obra especializada; * Maior susceptibilidade às condições meteorológicas. 	ha	Horária ou Contínua

Segundo Ribeiro (2006), as técnicas óticas de infravermelho oferecem a possibilidade de medidas não intrusivas. Como apresentado na Tabela 8, a técnica de infravermelho é capaz de detectar a concentração do biogás acima da superfície do aterro através da passagem de luz infravermelha. Tanda *et al.* (2017) apresenta resultados com o uso da Termografia Infravermelha (IRT), método de diagnóstico que permite a identificação de anomalias térmicas na superfície do aterro resultantes da geração e emissão de biogás. As aplicações feitas em aterros, na literatura, utilizam geralmente inspeções terrestres ou veículos aéreos não tripulados (UAVs) para capturar imagens de infravermelho (IR) na superfície do aterro. Essa inspeção aérea permite a cobertura de uma grande área. O autor comparou a quantidade de metano emitida nos pontos inspecionados ao que realmente foi coletado pelos poços existentes. As Figuras 17 e 18 mostram exemplos desses resultados obtidos por Tanda *et al.* (2017).

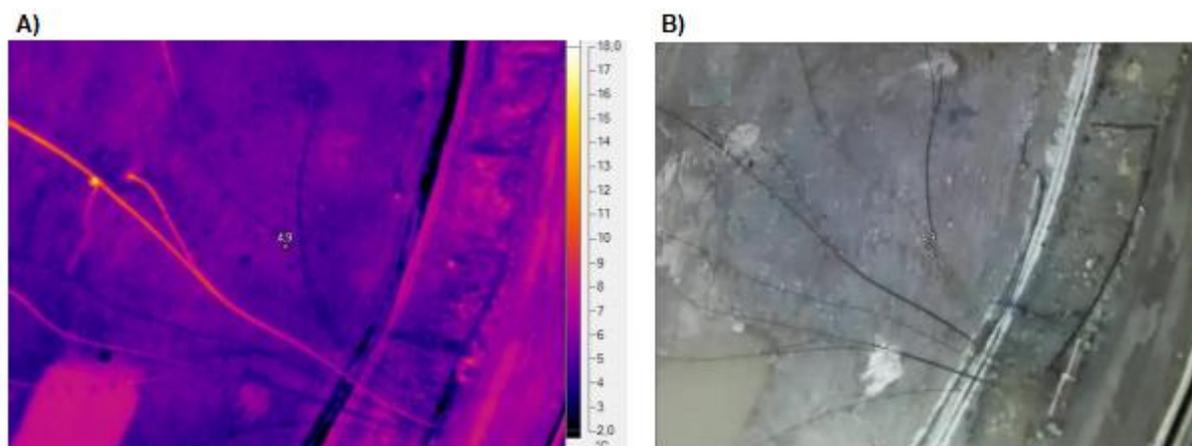


Figura 17 - Tubulações transportando biogás, em altas temperaturas, extraído nos drenos do aterro sanitário, são facilmente visíveis na imagem (A) obtida por infravermelho (IR) sobre a região (B) (Fonte: Tanza et al., 2017).

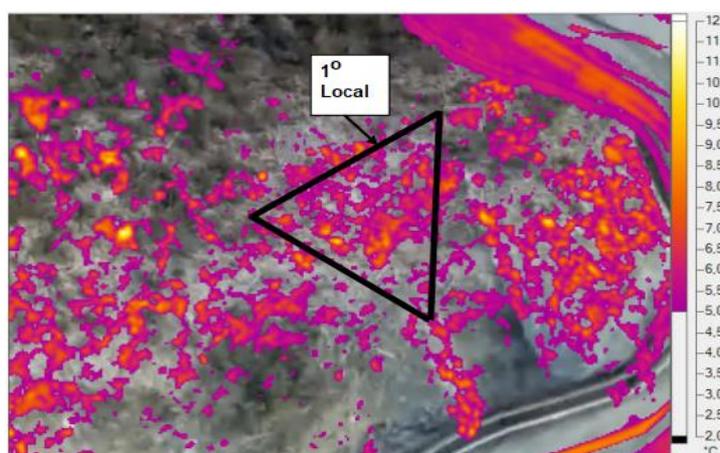


Figura 18 - Dados por IRT obtidos para o primeiro local no projeto (Fonte: Tanza et al., 2017).

A medição do fluxo de gás metano através de métodos como o da placa de fluxo, por sua vez, tem o objetivo de estimar as emissões de metano a partir da superfície do aterro (Candiani e Viana, 2017). No trabalho de Alcântara (2007), há o equacionamento do ensaio de placa do método estático, proposto por Maciel (2003).

$$F = \frac{V}{A} \cdot \rho \cdot \frac{dC}{dt} \quad (13)$$

onde,

F - fluxo de gás [M]*[L]⁻² *[T]⁻¹;

V - volume da câmara [L]³;

A - área de captação do gás [L]²,

ρ - densidade do gás [M]/[L]³

$\frac{dC}{dt}$ - variação da concentração do gás (% volumétrica) com o tempo.

Mariano e Jucá (2010) concluíram que o ensaio de placa de fluxo se trata de um procedimento de fácil utilização e manuseio para a determinação das emissões dos gases pela camada de cobertura. Em sua obra, mapearam as emissões de CH₄ usando a técnica de interpolação de dados com o software *Surfer*® 8 e também utilizou a interpolação pelo método *Kriging* através de testes em aterros sanitários. A interpolação será melhor detalhada na seção 4.2, que corresponde aos métodos utilizados neste trabalho.

3.9. SENSORIAMENTO REMOTO

Sensoriamento é a obtenção de dados por meio de sensores. Em relação aos tipos de sensores é possível citar, por exemplo, os: aéreos (ex.: drone ou veículo aéreo não tripulado – VANT) ou orbitais (ex.: satélites artificiais). Ambos são importantes para a obtenção e manipulação de imagens em ferramentas como o ArcGIS. A origem do sensoriamento remoto está vinculada ao surgimento da fotografia aérea e permite a obtenção de imagens da superfície terrestre (Florenzano, 2007). As ortofotos, por exemplo, são fotografias aéreas (que podem ser obtidas por drones ou outros VANTs) cujas deformações de projeção são todas corrigidas, de modo que o resultado final mostre os objetos em suas verdadeiras posições. O GPS identifica pontos em diferentes coordenadas através das informações obtidas por sensores orbitais por exemplo. O *Google Earth* foi um exemplo de ferramenta que possibilitou que lugares fossem observados a partir do sensoriamento remoto. Essa e outras ferramentas se tornaram públicas na década de 2000 (Carneiro e da Silva, 2012).

➤ Sistema de Informações Geográficas (SIG)

Um sistema de informações geográficas (SIG) – *Geographic Information System* (GIS) – é um sistema de análise, gestão e exibição de informações geográficas, representado por conjuntos de dados (*datasets*, em inglês) e ferramentas capazes de manipular esses dados geográficos (ESRI, 2006). O ArcGIS, por exemplo, é um *software* que surgiu como alternativa de integração das diferentes ferramentas de tratamento de imagens, quantificação e qualificação de modelos de superfície principalmente. Uma vantagem do ArcGIS é a capacidade de acessar dados SIG em qualquer formato e utilizar bancos de dados múltiplos ao mesmo tempo (ESRI, 2006). Por meio dessa ferramenta, também é possível realizar cálculos através dos atributos dos arquivos gerados e também analisar os erros advindos desses resultados (Johnston, 2001). Nesse trabalho, o ArcGIS foi utilizado para a criação de *shapefiles* (em inglês) – dados vetoriais que pode ser dos seguintes tipos: *Point*, *Polyline*, *Poligon* (áreas), *MultiPoint*, *MultiPatch*.

4. METODOLOGIA DO TRABALHO

A metodologia deste trabalho pode ser dividida em dois focos principais. O primeiro deles contempla a avaliar os valores de pico de geração de biogás para diferentes cenários realizados nos modelos teóricos IPCC e LandGEM, com base no levantamento das características de resíduos aterrados para o ACJ, bem como nas variações dos parâmetros k e L_0 , conforme a literatura. O segundo foco compreende o mapeamento e atribuição de coordenadas aos queimadores existentes no ACJ, através de visualização em ortofoto recente e posterior interpolação, pelo método de interpolação IDW, dos dados de fluxo de biogás e concentração (percentual) de metano medidos em campo. Os resultados da interpolação dos dados de concentração de CH_4 são então submetidos a um teste de validação e os resultados da interpolação dos dados de fluxo são usados para fornecer uma estimativa de geração aproximada para o fluxo anual de biogás no ACJ.

4.1. MATERIAIS

4.1.1. Objeto de Estudo (ACJ)

Desde a década de 60, o Aterro Controlado do Jóquei Clube de Brasília/DF (tendo “Lixão da Estrutural” como antiga nomenclatura) foi sendo utilizado para a disposição final inadequada de resíduos. Muitos esforços foram empreendidos para que houvesse o gerenciamento das células de resíduos existentes no ACJ após a sua desativação. A existência desse depósito de resíduos gerava impactos sobre os corpos hídricos adjacentes, ameaçando sua contaminação por lixiviado e a possível infiltração desse subproduto no lençol freático. Foi um local que se tornou foco de degradação ambiental e centro de conflitos sociais, motivados pela ocupação do seu entorno. Os catadores de materiais recicláveis trabalhavam na região de forma degradante, sendo vítimas de acidentes e outros problemas advindos do recebimento não adequado de resíduos (SLU, 2017).

O local recebia praticamente todo o lixo que era coletado no Distrito Federal. Se tratava de um recebimento de aproximadamente 2.800 t/dia de RSU e cerca de 6.000 t/dia de resíduos da construção civil, além de podas, galhadas e resíduos volumosos (Salgado, 2016). O ACJ se configura em uma área de 2 km² (200 hectares) como é retratado por Pereira (2015) e demais autores, sua entrada, na via de acesso mais próxima à guarita do ACJ, está localizada no ponto de coordenadas 15°46'29.94"S e 47°59'57.74"W. O ACJ é limítrofe ao Parque Nacional de Brasília (PNB) e aos córregos do Acampamento e Cabeceira do Valo (Figura 19).



Figura 19 - Disposição das Células de RS no ACJ ao longo do tempo. (Fonte: Cavalcanti, 2013, adaptado de Santos, 1996).

Nas Figuras 19, é possível observar que a expansão das células de resíduos, ao longo dos anos, se deu prioritariamente da porção sul para a porção norte do ACJ. Também se observa que a deposição não se deu de forma uniforme ao longo do tempo. Para as deposições mais antigas, predomina-se o uso de trincheiras (tipo de disposição de células de resíduos explicado na seção 3.6.2 deste trabalho) como demonstra a Figura 20.

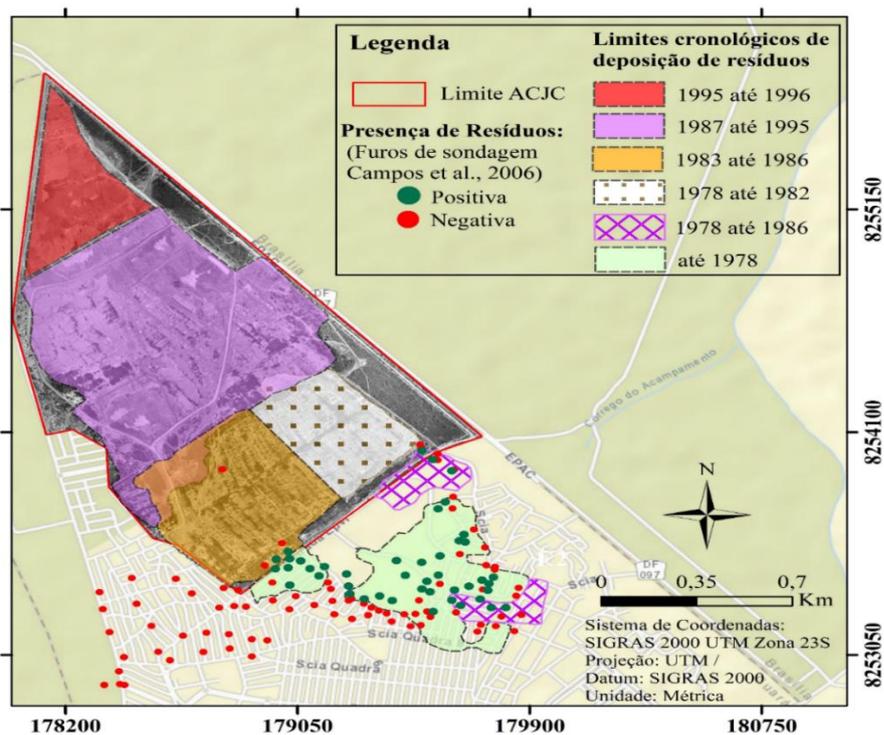


Figura 20 - Limites cronológicos da evolução da deposição de resíduos no ACJ (Fonte: Diniz, 2019. *In Press*).

Segundo Diniz (2019), a Figura 20 não apenas indica quando se deu a deposição de resíduos nas diferentes porções de aterros, indica ainda furos de sondagem realizados para a constatação da presença de resíduos. Alguns dos pontos de sondagem, dentro do limite do ACJ, foram dados como negativos, havendo a possibilidade de terem sido executados no vão existente entre trincheiras sucessivas.

O tipo de disposição dos resíduos se alterou com o passar dos anos. Dessa forma, uma mesma cota, dentro do limite do ACJ, poderia apresentar resíduos de idades completamente diferentes. Segundo Cavalcanti (2013), a partir de 1996, parte da porção intermediária do ACJ começou a ser utilizada para a deposição dos resíduos através do método da área (explicado na seção 3.6.2).

O depósito de resíduos, ACJ, se expandiu junto com o crescimento da Cidade da Estrutural e o aumento da população do DF e entorno. A Cidade da Estrutural foi criada como sede de Região Administrativa (RA) do DF em 2002. A Via Estrutural – rodovia EPCL-DF-096/BR-070 – é a principal via de acesso do ACJ (Filho, 2018). A evolução da disposição de resíduos, considerando o limite do ACJ, juntamente com o crescimento da Cidade Estrutural entre os anos de 1964 e 1997 pode ser observada na Figura 21.

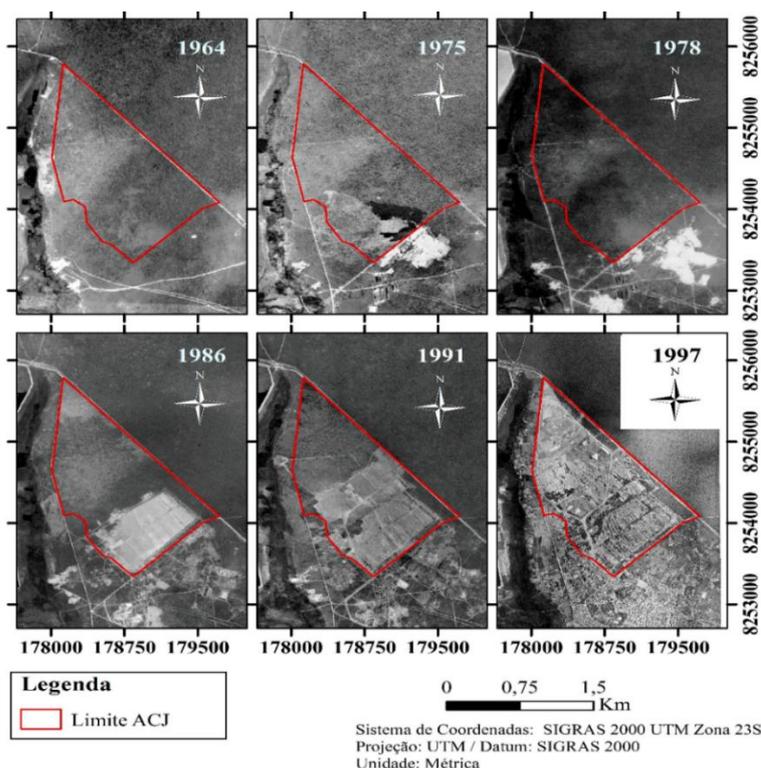


Figura 21 - Evolução da disposição de resíduos juntamente com a evolução da Cidade Estrutural nos arredores do limite do ACJ entre os anos de 1964 e 1997 (Fonte: Diniz, 2019. *In Press*).

Observa-se, na Figura 21, que a disposição de resíduos acompanhou o crescimento da Cidade Estrutural nos arredores do limite do ACJ.

Para analisar criticamente as estimativas de geração biogás no ACJ, é necessário ter conhecimento do clima da região, definidor de muitos parâmetros, como a taxa de geração (k), utilizada neste trabalho, e que também é influenciada por fatores climáticos. Segundo dados de temperatura média anual e mensal (do ar), precipitação pluviométrica média anual e mensal, utilizando-se da classificação proposta por Köppen-Geiger (1900), adaptada por Setzer (1966), o clima do Distrito Federal é do tipo Aw, que caracteriza a região como tropical com estação seca no inverno, com cota altimétrica menor que 1000 metros e temperatura no inverno maior que 18°C (Cardoso, Marcuzzo e Barros, 2015). Carneiro (2002), utilizando-se dos dados da CODEPLAN (1984) inclui, em seu trabalho, mais dois tipos climáticos para o Distrito Federal: o Cwa, tropical de altitude com cota altimétrica de 1000 a 1200 metros, temperatura no inverno menor que 18°C e no verão maior que 22°C, e o Cwb, tropical de altitude com cota altimétrica maior que 1200 metros, temperatura no inverno menor que 18°C e no verão menor que 22°C.

As principais classes de solos no DF são os latossolos, que podem ser divididos em: Latossolos Vermelhos (ocupando aproximadamente 38% da área) e Latossolos Vermelho-Amarelos (ocupando aproximadamente 15%). A Figura 22 apresenta um mapa pedológico do Distrito Federal.

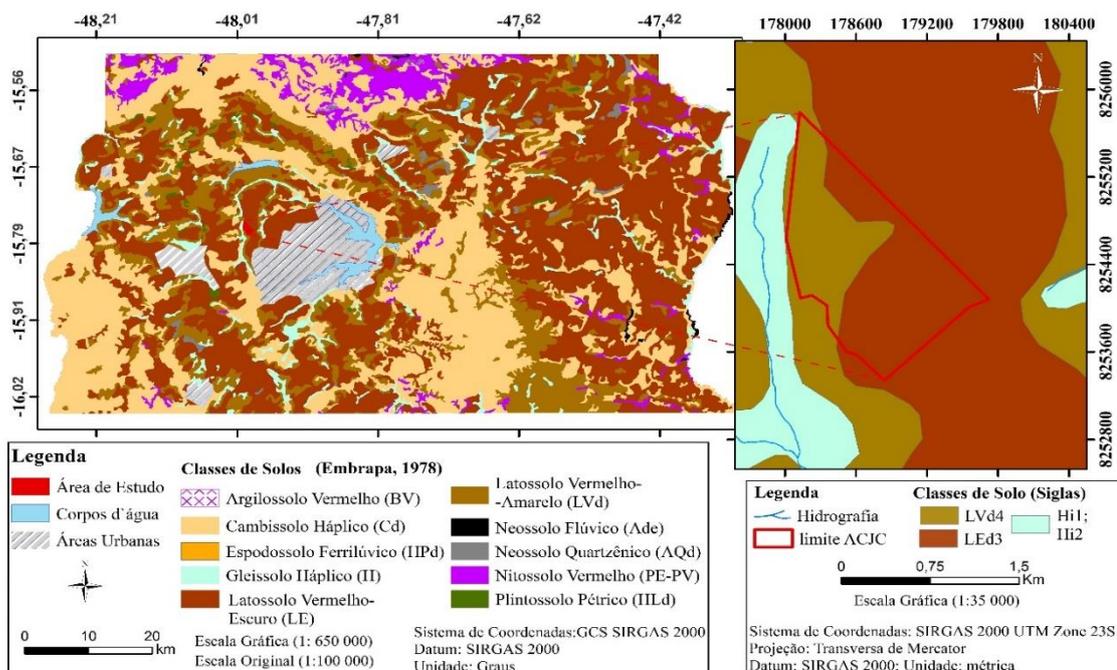


Figura 22 - Mapa pedológico do DF com ampliação para o ACJ à direita (Fonte: Diniz, 2019. *In Press*).

Como é possível ver na Figura 22, a porção mais ao norte do ACJ é formada por latossolo vermelho-amarelo e a porção ao sul é formada por latossolo vermelho.

Os latossolos têm como característica a capacidade moderada de infiltração de água, além de serem profundos, possuindo até 20 metros de espessura (Adasa, 2018).

O ACJ também apresenta manilhas de cimento, em sua extensão, que executam a função de drenos e queimadores. Suas funções estão apresentadas na seção 3.8.4. A distribuição desses queimadores na porção central do ACJ pode ser vista na Figura 23.



Figura 23 - Foto, tirada em campo, dos queimadores existentes na parte alta do ACJ.

Para a medição do fluxo de biogás e da concentração de seus componentes, *in situ*, é necessário realizar o abafamento dos queimadores para cessar o processo de queima do gás e utilizar equipamentos de medição adequados e resistentes a altas temperaturas.

4.1.2. Instrumentos de Medição

Através das medições de metano realizadas, com os instrumentos de medição adquiridos para campo, foi possível atribuir aos queimadores amostrados, seus respectivos valores para percentual de metano presente no biogás e fluxo de biogás para determinados pontos analisados. Foi utilizado o analisador Landtec GEM5000, cujo anemômetro derreteu durante a realização dos ensaios de campo pela equipe P&D RAEESA, devido às altas temperaturas em toda a coluna do dreno.

4.1.2.1. Landtec GEM5000

O equipamento Landtec GEM5000 foi desenvolvido para monitorar os sistemas de extração de gás de aterro (LFG). O medidor possui um tubo acoplado, por onde entra o biogás, que deve ser inserido no local de emissão de metano. O instrumento, apresentado na Figura 24, é capaz de fazer a análise do conteúdo de metano, dióxido de carbono e oxigênio no gás de aterro com mais de uma opção para análise (Meeroff, 2018).



Figura 24 - Medidor Landtec GEM5000 (Fonte: Meeroff, 2018).

O analisador de gás (GEM5000) tem a capacidade de exibir e registrar valores de fluxo intenso por meio de um anemômetro, que é conectado ao analisador para fornecer instantaneamente a indicação de fluxo (Landtec, 2019). Uma vantagem do analisador é fornecer o resultado da medição apenas após uma série de calibrações internas, até a obtenção do resultado ótimo.

4.1.2.2. Anemômetro

O anemômetro é um instrumento – nesse caso portátil – que pode medir velocidade, fluxo e temperatura e até mesmo pressão efetiva ou diferencial de fluidos como o ar. Segundo o manual do GEM5000, Landtec (2019), o anemômetro do analisador de gás tem diâmetro de 11 mm e amplo intervalo operacional de temperatura (até 80°C). Para o caso do ACJ, em particular, é necessário que o anemômetro suporte altas temperaturas. Isso se dá pelo fato de que, mesmo com as manilhas dos queimadores abafadas, as temperaturas são muito altas em toda a coluna do dreno-queimador. O derretimento de anemômetros é fácil de ocorrer sob condições adversas.

Nesse trabalho, além da manipulação dos dados de campo, também foi feito o levantamento de dados do ACJ informados por órgãos de responsabilidade e pela literatura para a análise dos modelos LandGEM e IPCC.

4.1.3. Dados

4.1.3.1. Levantamento dos Resíduos Aterrados no ACJ

Nessa etapa, fez-se o levantamento dos dados de resíduos aterrados no ACJ. Segundo o SLU (2019), não é possível apresentar dados de resíduos aterrados desde o início da disposição no ACJ. Entretanto, há dados de resíduos aterrados datados desde o ano de 2004 até o início de 2018. O volume total de resíduos sólidos aterrados no Aterro Controlado do Jóquei diminuiu nos últimos quatro anos segundo dados disponibilizados nos relatórios do SLU (2017). A contribuição do ASB tem parte significativa na redução dos resíduos dispostos no ACJ. Os

valores para as quantidades, em toneladas de resíduos, aterradas ao longo desses anos são mostrados na Figura 25.

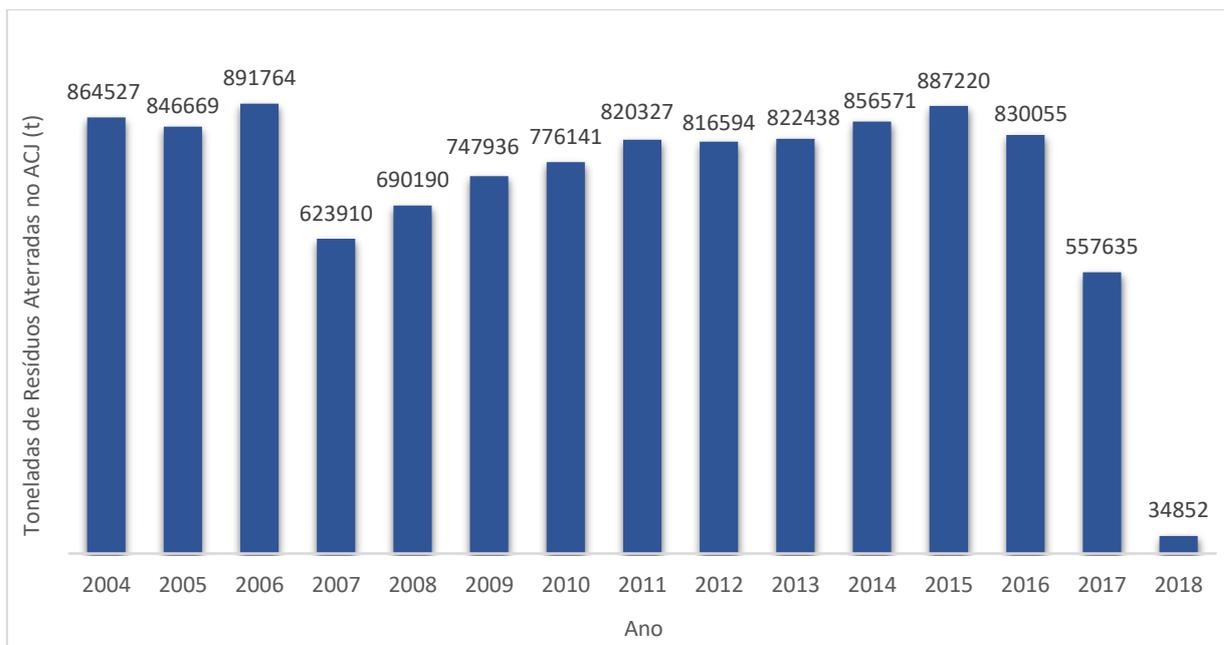


Figura 25 - Toneladas de Resíduos Aterradas no ACJ entre os anos de 2014 e 2018.

Em 2015, a quantidade aterrada no ACJ foi de 887220 toneladas. Em 2016, a quantidade foi de 830055 toneladas e, em 2017, a redução da quantidade surtiu em 557635 toneladas aterradas (SLU, 2017), que pode ter ocorrido graças ao melhoramento do sistema de coleta seletiva. No primeiro trimestre de 2018, 207115 toneladas de rejeitos foram aterradas. Dessas, 34852 toneladas foram aterradas especificamente no ACJ e a outra parcela seguiu para o Aterro Sanitário de Brasília (SLU, 2018). A desativação oficial do ACJ em 2018 contribuiu significativamente para a redução de resíduos aterrados, no que tange ao recebimento de resíduos diversos, com exceção de entulhos, que ainda seguem para a URE.

Na literatura, a exemplo do trabalho de Carneiro (2012), há a representação gráfica dos resíduos aterrados no intervalo de tempo de 1967 e 2001. Isso foi feito a partir de dados de anos conhecidos, que são referenciados na obra do autor. Filho (2018) apresenta uma série de dados de resíduos aterrados obtidos com base nos dados do trabalho citado anteriormente e em relatórios do SLU. Diniz (2019, *In Press*), em seu trabalho, utilizou ainda dados conhecidos do SLU-IBRAM (1978), do relatório anual da SALUB (1999) de 1995 a 1999, do SNIS (2002 e 2003) e outros referenciados pela autora para a realização de uma regressão capaz de fornecer a quantidade estimada de resíduos para os anos sem dados catalogados.

4.1.3.2. Dados do INMET

O intervalo de tempo de 2004 a 2018, cujos dados de resíduos aterrados foram disponibilizados pelo SLU (2019), pode ser analisado quanto às suas características meteorológicas. O INMET (2019) fornece dados meteorológicos para determinado ano de análise. Esses dados foram reunidos, em forma de gráfico, para disponibilizar informações sobre as condições meteorológicas do período.

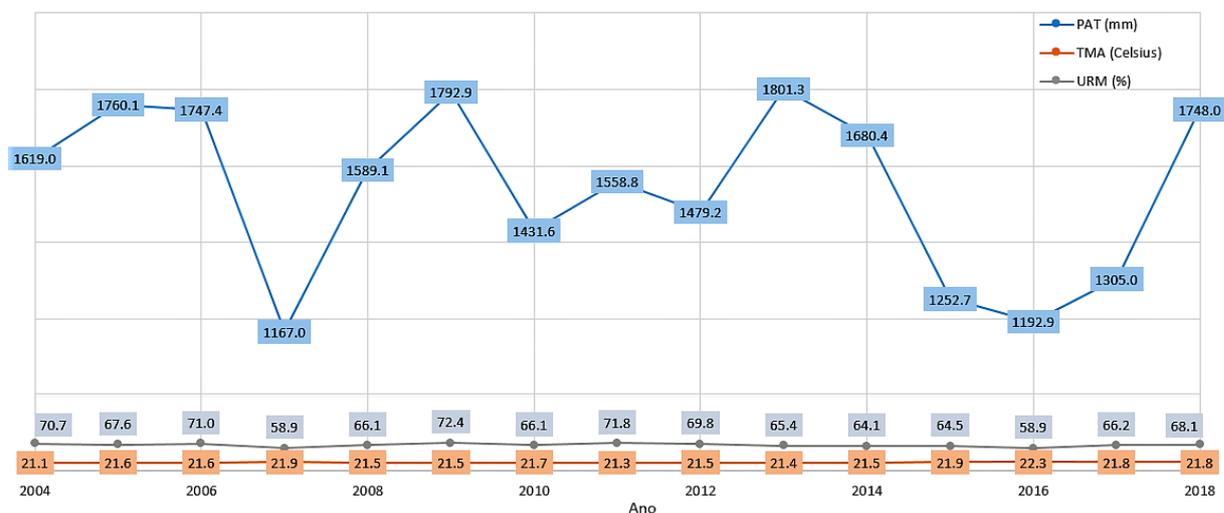


Figura 26 - Condições meteorológicas: Precipitação Anual Total (PAT) [mm], Temperatura Média Anual (TMA) [°C], Umidade Relativa Média (URM) [%] do período entre 2004 e 2018 (Adaptado do INMET, 2019).

A Figura 26, demonstra que em 2018, choveu 1748 mm e no ano anterior (2017), choveu 1305 mm. Para todos os anos anteriores, a precipitação anual total foi maior que 1000 mm. Se enquadrando na classificação indicada por Urrego-Martínez e Rodríguez-Miranda (Anexo A). Tomando como base a precipitação anual média (108,75 mm em 2017 e 145,67 mm em 2018) Paustian, Ravindranath e Amstel (2006) enquadram o local na zona climática tropical seca, ratificada na seção 4.1.4. As medições *in situ*, nesse trabalho, foram feitas em três dias diferentes. Os dados do INMET (2019) para precipitação diária, temperatura média e a umidade relativa média para as datas de medição são mostrados na Tabela 9 abaixo.

Tabela 9 - Dados do INMET (2019) para precipitação diária, temperatura média e umidade relativa média para os três dias de medição.

Data	Precipitação (mm)	Temperatura Média (°C)	Umidade Relativa Média
04/04/2019	5,1	23,02	80,5
08/04/2019	2,6	20,52	89,5
09/04/2019	7,8	21,66	82,25

(INMET, 2019).

4.1.3.3. Dados Relevantes para o Mapeamento dos Queimadores no ACJ

O ACJ dispõe de diversos poços verticais de drenagem (PROGEA, 2005). A Valor Ambiental (2019) sinaliza um total de 149 unidades de queimadores existentes do lixão; das quais 127 estão ativas na área operacional e 22 estão ativas na área embargada. Também disponibiliza marcos superficiais, que podem ser usados para a projeção dos queimadores demarcados. O primeiro voo – que possibilitou a obtenção de uma ortofoto original do ACJ – foi realizado no dia 21 de agosto de 2018. O voo mais recente foi realizado no dia 25 de setembro de 2018 (Diniz *et al.*, 2019). Esses dados são importantes para o mapeamento visual dos queimadores.

4.1.3.4. Valores de Taxa de Geração (k) para o Uso dos Modelos

O Anexo A apresenta valores para a taxa de geração (k) que variam com base na tipologia do resíduo (relacionada ao tempo de meia vida e velocidade de degradação) e nas condições climáticas referentes ao LDRS. Para o enquadramento do LDRS na classificação do tipo Aw, que caracteriza a região como tropical com estação seca no inverno, são indicadas taxas de geração (Anexo A) equivalentes a 0,045 (para resíduos compostos predominantemente por papel), 0,025 (madeira, que se degrada mais lentamente, porém possui grandes elevado COD), 0,065 (outros), 0,06 (resíduos alimentares) e 0,05 (resíduos a granel). O Anexo B apresenta valores para k e L_0 , utilizados por diferentes autores. Muitos deles utilizam valores-padrão, para os parâmetros, em suas estimativas, a exemplo de: 0,05 (apresentado na Tabela 5 da seção 3.7.1.6, correspondente ao CAA *Conventional*) e 0,04 (correspondente ao *Inventory Conventional*), encontrados dentro da ferramenta LandGEM. Tais valores *default* da ferramenta serão utilizados para compor os cenários desenvolvidos nesse trabalho. O Anexo A mostra a indicação do uso dos parâmetros $k = 0,08 \text{ ano}^{-1}$ e $L_0 = 84 \text{ m}^3/\text{t}$ (Urrego-Martínez e Rodrigues-Miranda, 2016) para a precipitação anual maior que 1000 mm (caso do DF).

4.1.3.1. Dados de Composição Gravimétrica para o Modelo do IPCC

Os Anexos D e E apresentam a composição gravimétrica proveniente de documentação do SLU-IBRAM (1978) para os anos 1971 e 1977. O Anexo F mostra a composição gravimétrica da Estrutural (SLU, 2015), utilizada representativamente para o cálculo de COD a partir do ano 2015. Em relação ao último conjunto de dados (2015) a separação das tipologias de resíduos não é detalhada conforme a Equação 4 da seção 3.7.2. Dessa forma, tomou-se os dados dos dois outros anos (1971 e 1977) para analisar a representatividade de cada resíduo nas classes da composição de 2015.

4.1.3.2. Dados das Medições de CH₄ nos Drenos e das Condições Climáticas

Em relação às medições de fluxo, foi possível obter apenas 8 (oito) medições, pois as altas temperaturas dentro do dreno estavam acima do intervalo operacional suportado pelo anemômetro, fazendo com que este derretesse. Os dados de fluxo de biogás são apresentados na Tabela 9. Esses dados foram obtidos pela equipe do projeto P&D Raeesa (2019).

Tabela 10 - Dados das medições de fluxo realizadas em campo para o projeto.

ID	UTM-E	UTM-N	Data	CH ₄ (%)	Fluxo [m ³ /min]	Fluxo [m ³ /h]
PMLFG001	178709	8254571	04/04/2019 08:51	10,4	0,3653	21,918
PMLFG002	178716	8254492	04/04/2019 09:04	34,3	0,354	21,24
PMLFG003	178744	8254528	04/04/2019 09:13	36,5	0,3766	22,596
PMLFG004	178668	8254614	04/04/2019 09:23	49,6	0,1331	7,986
PMLFG005	178628	8254692	04/04/2019 09:33	50,5	0,4304	25,824
PMLFG006	178603	8254649	04/04/2019 09:40	51,3	0,5352	32,112
PMLFG007	178576	8254706	04/04/2019 09:51	48,4	0,371	22,26
PMLFG008	178540	8254661	04/04/2019 10:04	28,4	0,3171	19,026

O Anexo H apresenta os dados de percentual de metano no biogás, medidos em campo, com suas respectivas coordenadas planialtimétricas, datas e horários das medições, assim como os dados de fluxo da Tabela 10.

Um fator importante a se considerar, na análise dos dados, é a mudança súbita no padrão das coordenadas planialtimétricas correspondentes à localização dos pontos medidos (segunda coluna – UTM-E e terceira coluna – UTM-N – da Tabela 10). Isso se deve ao fato do ACJ estar situado entre duas zonas diferentes. Dessa forma, quando se passa da zona 22 para a 23, o padrão das coordenadas planialtimétricas se altera.

A Tabela 9 da seção 4.1.3.2, é importante para a análise das condições meteorológicas dos dias das medições. Pode-se observar que o dia de medição em campo, que apresentou maior lâmina d'água para a precipitação, também apresentou menor valor para concentração percentual de metano (1,9%) e o dia com maior umidade relativa média foi o que apresentou maior valor para a concentração (57,9%)

Os pontos da Tabela 10 (medições de fluxo) e do Anexo H (total de pontos amostrados com dados de concentração de metano) podem ser melhor visualizados na Figura 27.

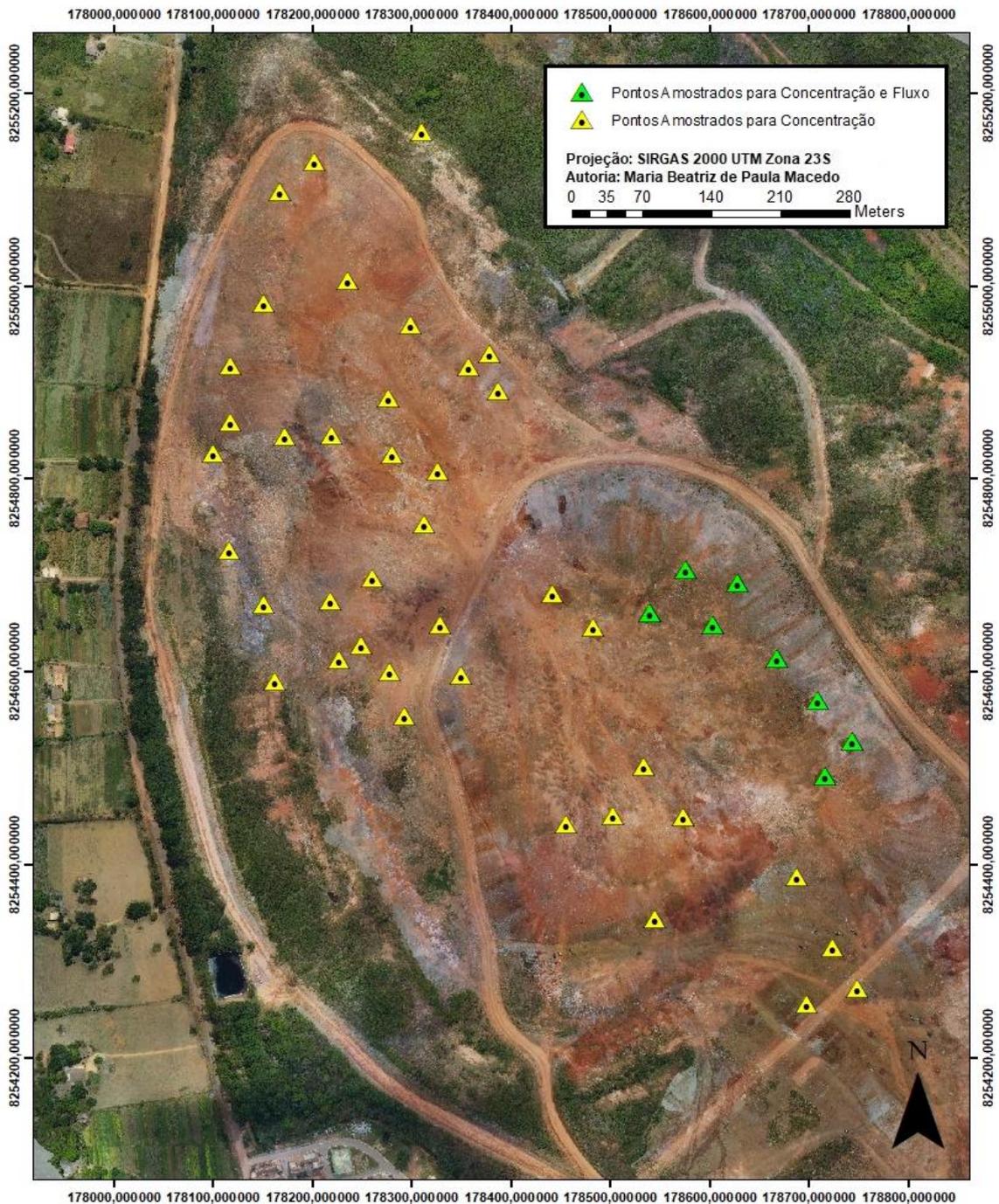


Figura 27 - Distribuição espacial dos pontos amostrados no ACJ.

As medições de fluxo foram realizadas em queimadores próximos uns aos outros até a inutilização do instrumento do anemômetro pela equipe P&D Raesa. Dessa forma, a concentração dos dados, em uma só área, pode enviesar os resultados obtidos pela interpolação, reduzindo a acurácia dos valores obtidos em relação aos valores reais.

Em relação às medições de concentração percentual de metano no biogás, percebe-se maior espalhamento e maior cobertura de toda a extensão do ACJ.

4.2. MÉTODOS

Os métodos utilizados, neste projeto, podem ser resumidos através dos pontos apresentados a seguir.

- ✓ Mapeamento dos queimadores do ACJ georreferenciados

- ✓ Resultados Teóricos
 - ❖ Modelo LandGEM
 - Cenário 1 – Resíduos aterrados conforme o Cenário 1
 - Estimativa dos valores de pico de Metano e Biogás Total através dos seguintes subcenários:
 - A – Inventory conventional
 - B – Inventory arid área
 - C – Inventory wet
 - D – Precipitação anual > 1000mm
 - Cenário 2 – Resíduos aterrados conforme o Cenário 2
 - Estimativa dos valores de pico de Metano e Biogás Total através dos seguintes subcenários:
 - A – Inventory conventional
 - B – Inventory arid área
 - C – Inventory wet
 - D – Precipitação anual > 1000mm
 - ❖ Modelo IPCC
 - Equação 2 do IPCC (baseada no COD): Utiliza o Cenário 1 de resíduos aterrados para as estimativas feitas para os dois cenários
 - Cenário I – Compreende os valores de COD calculados com base nas composições gravimétricas (Anexos D, E e F)
 - Cenário II – Valores de COD discretizado (Anexo G)
 - Equação 6 do IPCC (modelo de decaimento)
 - Cenário III – Utilização dos parâmetros k e Lo do subcenário A (*Inventory Conventional*) do LandGEM
 - Cenário IV – Utilização de um valor médio para os Lo's obtidos através do uso dos valores discretizados de COD (Anexo G)

- ✓ Resultados Empíricos
 - ❖ Interpolação IDW (*Natural Breaks*) dos dados de fluxo dos drenos amostrados
 - Delimitando a área dos drenos amostrados
 - Geração de tabela de fluxo por área de contribuição
 - Estimativa extrapolativa de fluxo para toda a área do ACJ
 - Interpolação livre com os drenos amostrados
 - ❖ Interpolação IDW (*Equal Interval*) dos dados de percentual de metano
 - Teste de validação da interpolação dos pontos amostrados com dados de concentração de metano

4.2.1. Criação do *Shapefile* dos Queimadores Georreferenciados e Valorados

Para criar o *shapefile* com as coordenadas dos queimadores, foi feita a sobreposição dos marcos superficiais conhecidos (comentados na seção 4.1.3.2) com a ortofoto mais recente do ACJ, obtida após o sobrevoo do dia 25 de setembro de 2018 por Diniz *et al.*, 2019. Os primeiros pontos, foram demarcados um a um, através da detecção visual dos queimadores ao longo da ortofoto. O uso dos marcos superficiais, auxiliou na inclusão do restante dos queimadores (não detectados em uma primeira visualização na ortofoto). Através da adição de transparência ao *layer* obtido, por meio dos marcos, foi possível comparar tal conjunto de dados com os queimadores existentes em sua posição real na ortofoto e encontrá-los.

Após a mapeamento dos queimadores, é necessário valorá-los dentro da Tabela de Atributos (*Attribute Table*) do ArcGIS. Para isso, é necessário abrir o conjunto de dados das medições *in situ*. Foi possível que os pontos medidos com GPS, em campo, apresentam determinado grau de deslocamento em relação à localização dos queimadores na ortofoto. Isso se deve ao fato de haver erros associados aos dois tipos de georreferenciamento. Foram então valorados os pontos com dados das medições para concentração de CH₄ no biogás e/ou de fluxo de biogás, obtidos através do medidor Landtec GEM5000. Criou-se três novas colunas na Tabela de Atributos em relação aos dados de: percentual de CH₄ no biogás, fluxo de gás em [m³/min] e fluxo de gás em [m³/h]. A Tabela 11 mostra um exemplo para 10 pontos amostrados (Tabela 9 e Apêndices D e e valorados em relação ao fluxo e percentual de CH₄ no biogás.

Tabela 11 - Parte dos dados de fluxo e concentração de metano para alguns queimadores georreferenciados (Retirada da *Attribute Table* do ArcGIS).

FID	Shape *	Flow_m3/h	CH4per100	Longitude	Latitude
0	Point	0	0	178598.171639	8254535.06259
1	Point	21.24	34.3	178714.888995	8254490.07399
2	Point	21.918	10.4	178705.622292	8254570.90771
3	Point	22.596	36.5	178743.070337	8254529.21838
4	Point	0	0	178641.510566	8254430.08425
5	Point	0	0	178600.370125	8254602.03818
6	Point	0	0	178536.203176	8254602.23148
7	Point	32.112	51.3	178601.516359	8254650.60228
8	Point	7.986	49.6	178666.664081	8254613.78788
9	Point	0	45.3	178481.527929	8254645.62556
10	Point	19.026	28.4	178539.698714	8254662.1727

Os pontos com valores equivalentes a 0 (zero), no exemplo da Tabela 10, se tratam de pontos em que não houve medições. A partir dos dados, é possível gerar mapas de isovalores, através da ferramenta de interpolação.

4.2.2. Interpolação IDW

A interpolação gera uma estimativa de valor de um atributo em locais não amostrados. A lógica da interpolação é a de que os valores deste atributo tendem a ser semelhantes em regiões mais próximas do que em regiões afastadas. A vantagem da interpolação é o fato de ser capaz de converter observações pontuais em campos contínuos (Jakob e Young, 2016). Isso pode ser melhor observado no teste realizado por outro autor na Figura 28.

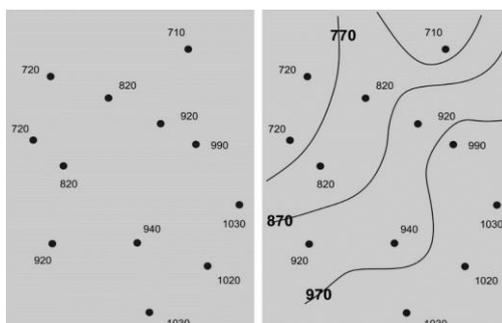


Figura 28 - Esquema explicativo de uma interpolação (Fonte: Kawakubo).

A função do interpolador é prever todos os valores na superfície através de pontos conhecidos. Em *Spatial Analyst Tools*, dentro do *ArcToolbox* (ferramentas do ArcGIS), é possível encontrar diferentes métodos de interpolação: IDW, *Kriging*, *Natural Neighbor* e *Spline*. O IDW (*Inverse Distance Weighting*), cuja tradução é: “Ponderação do Inverso das Distâncias”, tem o objetivo de prever e estimar um valor desconhecido para um determinado local, usando os valores amostrados à sua volta. Essa interpolação implementa o pressuposto de que pontos mais próximos, entre si, apresentam maior correlação do que os mais distantes. Dessa forma, pontos próximos terão maior peso atribuído do que os pontos distantes. Se trata de um método que funciona melhor caso os pontos não estejam todos concentrados em um mesmo local (Jakob e Young, 2016). A Figura 29 mostra uma simulação feita no ArcGIS para a interpolação IDW.

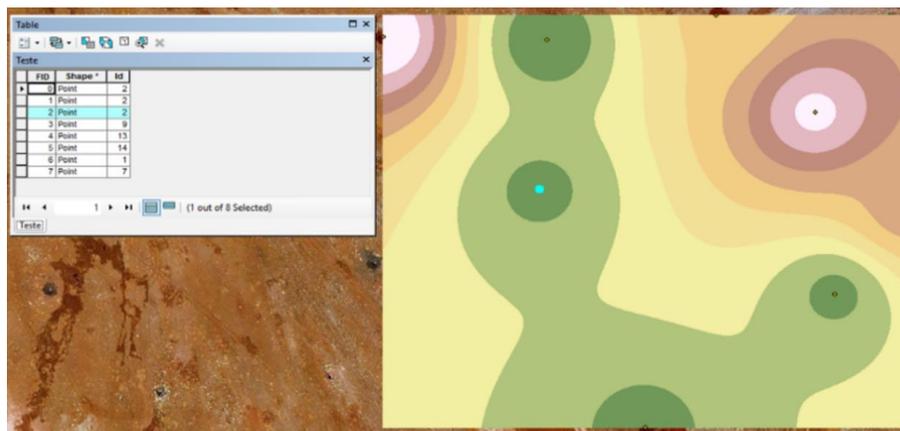


Figura 29 - Simulação de mapa de isovalores para sete drenos do ACJ.

A simulação da Figura 29 foi feita com valores aleatórios (2, 9, 13, 14, 1, 7) para mostrar o funcionamento da ferramenta de interpolação IDW. Alguns trabalhos demonstram que o inverso da distância (IDW) é um método de interpolação mais eficiente que o método de regressão *Kriging* (Silva *et al.*, 2008). Além disso, o IDW se trata de um interpolador amplamente utilizado. Dessa forma, foi escolhido para ser utilizado, neste trabalho, para a obtenção dos mapas de isovalores e posterior análise das áreas de influência das concentrações e fluxos nos queimadores existentes na área do ACJ escolhida.

4.2.2.1. Etapas da Interpolação, Análise do Fluxo por Área e Validação

A interpolação utilizada para fluxo de biogás, foi a IDW e o método de classificação utilizado foi o método *Natural Breaks*. Neste método, os limites são definidos para valores de dados mais diferentes uns dos outros. O método de classificação *Equal Interval* é melhor aplicado a intervalos de dados familiares, como porcentagens e temperatura; além de outros métodos de classificação, não podem ser aplicados a essa situação (Esri, 2019). Esse método será utilizado para a validação da interpolação dos dados de percentual de metano (CH₄) no biogás. A interpolação gera classes de intervalos de valores distribuídas em diferentes áreas de contribuição.

Para analisar o fluxo de biogás por área de contribuição e, posteriormente, prever as emissões anuais (a fim de estabelecer uma comparação com os cenários dos modelos), foram, primeiramente, criados *buffers* de 50 metros ao redor dos oito drenos (onde foi medido fluxo) e depois foi usada a ferramenta “*Dissolve*” para juntá-los em uma grande área de delimitação.

O tamanho da área de delimitação não é fator decisivo para o cálculo do fluxo médio por área, pois o importante é a área de contribuição de cada classe da interpolação. Após a obtenção da área, dividiu-se a média de cada um dos intervalos (classes) pela sua respectiva área de contribuição e, ao final, multiplicou-se a média de todos os valores pela área total do ACJ para estimar o fluxo em [m³/h] e posteriormente o fluxo anual [m³/ano] para toda a extensão do objeto de estudo. O valor encontrado foi comparado com os cenários obtidos pelos modelos.

A validação foi feita para a concentração de biogás, através da utilização 30 pontos aleatórios (dos 48 pontos amostrados) e validação com os 17 pontos restantes.

4.2.3. Criação de Cenários para os Modelos LandGEM e IPCC

4.2.3.1. Cenários (LandGEM)

Para o uso da ferramenta LandGEM, se fez necessária a criação de cenários, visto que o LandGEM é uma ferramenta de caracterização detalhada de aterros sanitários e o objeto de estudo desse trabalho é o ACJ. Para usar a ferramenta, é necessário entrar com informações prioritárias (*inputs*). Utilizou-se parâmetros de entrada, como o ano de abertura (dados disponíveis na literatura) e fechamento (ano fixo) de desativação do ACJ conforme mostrado na Figura 28 para todos os cenários.

USER INPUTS		Landfill Name or Identifier: ACJ
1: PROVIDE LANDFILL CHARACTERISTICS		
Landfill Open Year	1967	
Landfill Closure Year	2018	
Have Model Calculate Closure Year?	<input type="radio"/> Yes <input checked="" type="radio"/> No	
Waste Design Capacity		megagrams

Figura 30 - Informações de abertura (estimada de acordo com os dados existentes na literatura) e fechamento (dado fixo) do ACJ inseridos no LandGEM.

Há informações documentadas pelo SLU (2018) sobre o ano de desativação das atividades do ACJ. Dessa forma, não é necessário pedir que o modelo calcule o ano de fechamento, como está indicado pela seta na Figura 30. Também é necessário fazer o levantamento das quantidades de resíduos catalogadas ou estimadas através de projeção para anos sem dados catalogados (seção 4.1.3.1).

Segundo a EPA (2012), os parâmetros utilizados pelo LandGEM podem estar em conformidade com o U.S Clean Air Act (CAA) – que fornece estimativas de emissões máximas esperadas para determinar a aplicabilidade da regulamentação americana nas condições do aterro – ou com dados de inventários (*Inventory*), baseados na Compilação de Fatores de Emissão de Poluentes do Ar da EPA – usados na ausência de dados específicos do aterro, para realizar estimativas que se aproximem das condições reais. A depender das condições do aterro, como já dito em seções anteriores, a taxa de geração e quantidade de biogás gerado variam. Dessa forma, existem três cenários principais na ferramenta LandGEM apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Cenários existentes no LandGEM e suas características responsáveis pelos valores dos parâmetros k (taxa de geração) e Lo (potencial de geração).

Cenário <i>default</i>	Situações de Uso	Parâmetro k (ano ⁻¹)	Parâmetro Lo (m ³ /t)
Convencional (<i>Conventional</i>): Aterros não-áridos	Usado geralmente no desconhecimento de dados (correspondente ao decaimento padrão).	0,04 (<i>Inventory Conventional</i>) e 0,05 (<i>CAA Conventional</i>)	100 (<i>Inventory Conventional</i>) e 170 (<i>CAA Conventional</i>)
Área árida (<i>Arid Area</i>): Aterros áridos	Para aterros com resíduos que se degradam lentamente ou na condição árida.	0,02 (<i>Inventory Conventional</i>) e 0,02 (<i>CAA Conventional</i>)	100 (<i>Inventory Conventional</i>) e 170 (<i>CAA Conventional</i>)
Úmido (<i>Wet/Biorreactor</i>)	Aterro projetado para condições úmidas dadas pela recirculação de lixiviado.	0,7 (<i>Inventory Conventional</i>)	96 (<i>Inventory Conventional</i>)

Neste trabalho foi escolhido o *Inventory*, para a realização das estimativas de metano, devido à ausência de medições dos parâmetros em campo – ao invés dos cenários do CAA, que têm o objetivo de apresentar o máximo esperado para as estimativas conforme a regulamentação

É importante salientar que a unidade do potencial de geração de metano (Lo) no LandGEM é dada em metros cúbicos de metano por tonelada de resíduo [$\text{m}^3 \text{CH}_4 / \text{t RS}$] e, no modelo do IPCC, o Lo é dado em toneladas de metano por tonelada de resíduo [$\text{t CH}_4 / \text{t RS}$]. Dessa forma os valores de 96, 100 e 170 $\text{m}^3\text{CH}_4/\text{t}$ – como mostrado na Tabela 12 – seriam iguais a 0,063; 0,066 e 0,11 tCH_4/t respectivamente. Isso se trata de uma informação básica que não é muito bem elucidada em artigos que comparam os modelos, gerando questionamentos a respeito do parâmetro Lo e suas aplicações.

No LandGEM, a densidade do metano utilizada para as conversões é de 0.00066715 $\text{tCH}_4 / \text{m}^3 \text{CH}_4$ (ou 0.66715 kg/m^3) e a de conversão do biogás total é de 0,0012 $\text{tCH}_4 / \text{m}^3 \text{CH}_4$, relativamente próxima dos valores apresentados no primeiro parágrafo da seção 3.1.2.

➤ Cenário 1

O primeiro cenário contempla o levantamento e interpolação dos dados de resíduos aterrados entre os anos de 1967 e 2001 feitos por Carneiro (2012) e identificados com o auxílio do algoritmo *WebPlotDigitizer* da Automeris (2019), mostrado na Figura 31. Para a utilização dos

melhores valores, foi feita uma média com os valores também encontrados por Diniz (2019, *In Press*) e Nisyama (2019, *In Press*) conforme mostrado no Apêndice D.

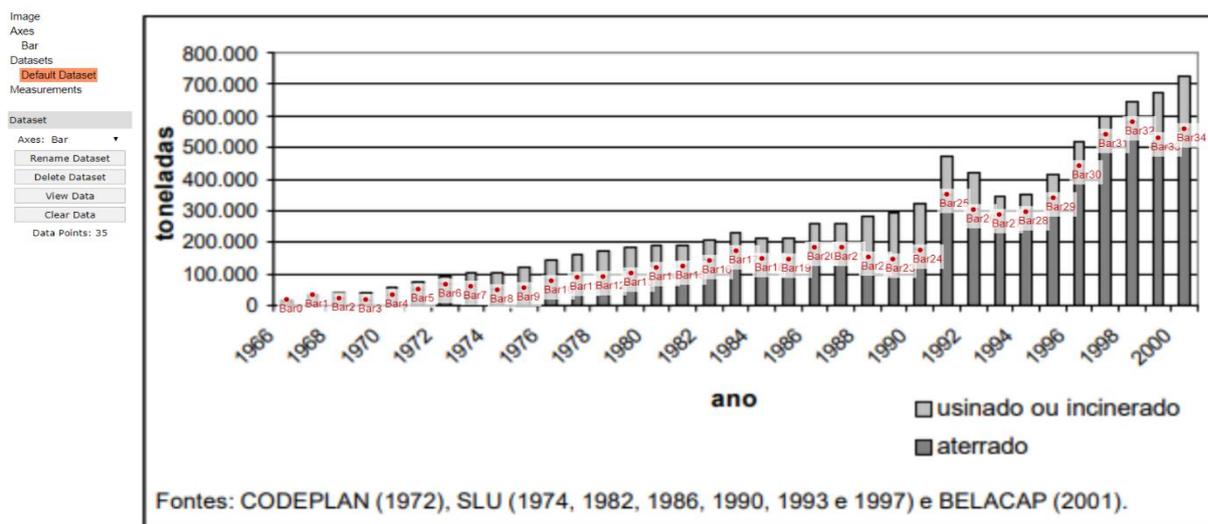


Figura 31 - Layout da ferramenta Automeris para a identificação de valores de resíduos aterrados no gráfico de Carneiro (2012).

Para os anos de 2004 a 2018, utilizou-se o levantamento de dados feito na seção 4.1.3.1. A tabela dos resíduos aterrados construída, com base nesse cenário 1, está presente na Tabela 13.

Para os anos de 2002 e 2003 foi feita uma interpolação linear do tipo:

$$(y_1 - y_0) * \left(\frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \right) \quad (14)$$

$$(y_1 - y_0) * \left(\frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \right)$$

A interpolação linear (Equação 13), feita no Excel, para os resíduos aterrados no aterro é incapaz de descrever o que de fato ocorre na realidade. Entretanto, isso foi realizado para se estimar, de forma aproximada, valores para a quantidade de resíduos aterrados para os dois anos sem dados.

➤ Cenário 2

Para o Cenário 2, decidiu-se utilizar uma curva de regressão ótima para estimar os resíduos dos anos sem dados a partir de dados catalogados. Primeiramente, foi feita uma regressão polinomial cúbica no Excel (foi escolhida aquela com maior R²) com alguns dados conhecidos, também utilizados por Diniz (2019, *In Press*) como foi dito na seção 4.1.3.1. Dessa forma, foi possível obter a seguinte regressão mostrada na Figura 30.

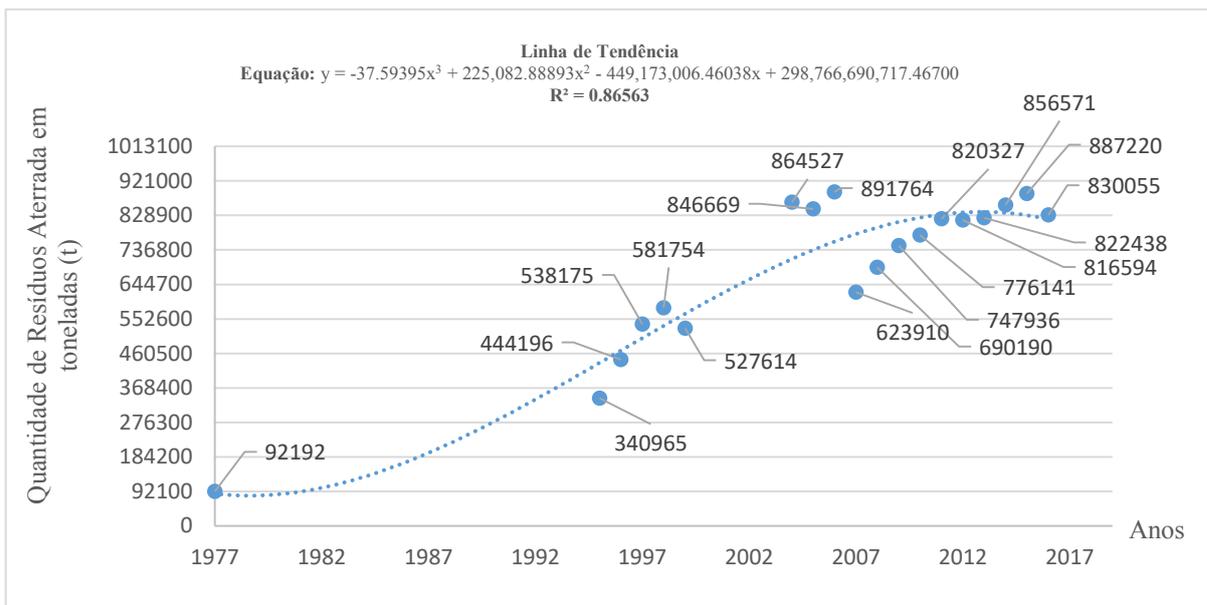


Figura 32 - Primeira regressão para a quantidade de resíduos aterrados obtida no Excel.

A regressão mostrada na Figura 32 só se ajusta bem até o ponto 1977 (com dado catalogado). Entretanto, Diniz (2019, In Press), em seu trabalho, obteve regressões ótimas para o conjunto de dados catalogados, como pode ser visto no Anexo C deste trabalho. Dessa forma, para o Cenário 2 de estimativa de emissão de metano, foi utilizada a combinação de resíduos estimada pela autora e os anos do SLU (2019) com dados. Essa combinação pode ser vista no segundo cenário 2 de resíduos da Tabela 13.

➤ Resultados dos Cenários 1 e 2 (Dados)

O resultado dos cenários 1 e 2 pode ser visto na Tabela 13. No cenário 1, observa-se os resíduos obtidos no WebPlotDigitizer para os dados de Carneiro (2002), no período de 1967 até 2001, juntamente com a projeção linear para 2002 e 2003 e os dados do SLU (2019) de 2004 a 2018. No cenário 2, observa-se os valores obtidos pela regressão feita por Diniz (2019, *In Press*) mais os dados do SLU (2019).

Tabela 13 - Cenários 1 e 2 dos resíduos aterrados.

Cenário 1		Cenário 2		Cenário 2			
Ano	Toneladas Aterradas	Ano	Toneladas Aterradas	Ano	Toneladas Aterradas		
1967	18232	1993	304143	1967	44638	1993	273056
1968	34254	1994	288121	1968	47858	1994	292755
1969	26427	1995	297514	1969	51311	1995	313874
1970	20138	1996	339503	1970	55012	1996	336517

Ano	Toneladas Aterradas
1971	36388
1972	56311
1973	72580
1974	66272
1975	56311
1976	60961
1977	82541
1978	97153
1979	96155
1980	107114
1981	122386
1982	128694
1983	146959
1984	177841
1985	152270
1986	152270
1987	186804
1988	186804
1989	152762
1990	150834
1991	180496
1992	351657

Fonte A: Carneiro (2002); SLU (2019).

Ano	Toneladas Aterradas
1997	441712
1998	541160
1999	581208
2000	529005
2001	558852
2002	660920
2003	762723
2004	864527
2005	846669
2006	891764
2007	623910
2008	690190
2009	747936
2010	776141
2011	820327
2012	816594
2013	822438
2014	856571
2015	887220
2016	830055
2017	557635
2018	34852

Ano	Toneladas Aterradas
1971	58981
1972	63236
1973	67798
1974	72689
1975	77932
1976	83555
1977	89582
1978	96045
1979	102974
1980	110402
1981	118367
1982	126906
1983	136061
1984	145876
1985	156400
1986	167683
1987	179780
1988	192749
1989	206654
1990	221562
1991	237546
1992	254683

Fonte B: Diniz (2019, *In Press*); SLU (2019).

Ano	Toneladas Aterradas
1997	360794
1998	386822
1999	414728
2000	444646
2001	476724
2002	511115
2003	547987
2004	864527
2005	846669
2006	891764
2007	623910
2008	690190
2009	747936
2010	776141
2011	820327
2012	816594
2013	822438
2014	856571
2015	887220
2016	830055
2017	557635
2018	34852

➤ Subcenários (LandGEM)

Tanto para o Cenário 1, quanto para o Cenário 2, foram implementados diferentes subcenários. Para todos eles os parâmetros de poluentes e compostos orgânicos não-metânicos (NMOC) foram mantidos no *default*.

A) *Inventory Conventional*: Para o modelo do LandGEM, o percentual de CH₄ utilizado no LandGEM foi de 45% (0,45) – média das medições de percentual realizadas em campo. A taxa de geração (k) e o potencial de geração (Lo) utilizados foram os do *Inventory Conventional* de 0,04 ano⁻¹ e 100 m³/Mg, respectivamente, (equivalente ao utilizado por alguns autores conforme apresentado no Anexo B). Esse subcenário poderia se aproximar da classificação do IPCC (Anexo A) para a condição tropical seca com composição gravimétrica com alto teor de papel.

- B) *Inventory Arid Area*:** Equivalente ao cenário anterior, mas utilizando a taxa de geração (k) igual a $0,02 \text{ ano}^{-1}$ e o Lo igual a $100 \text{ m}^3/\text{Mg}$ (simulando o decaimento para a condição climática seca no aterro). Esse subcenário poderia se aproximar da classificação do IPCC (Anexo A) para a condição tropical seca com composição gravimétrica com altos teores de madeira (que se degrada lentamente).
- C) *Inventory Wet*:** Equivalente ao cenário anterior, mas utilizando a taxa de geração (k) de $0,7 \text{ ano}^{-1}$ (valor elevado) e o Lo de $96 \text{ m}^3/\text{Mg}$ (ambos fornecidos pelo LandGEM para a situação de constante recirculação de lixiviado).
- D) *Precipitação Anual Total > 1000 mm*:** Equivalente ao Cenário 1A, utilizando a taxa de geração (k) igual a $0,08 \text{ ano}^{-1}$ e o Lo igual a $84 \text{ m}^3/\text{Mg}$, conforme a indicação de Urrego-Martínez e Rodríguez-Miranda (2016) no Anexo A, apesar de serem indicados para o uso no Modelo Mexicano.

4.2.3.2. Cenários para a Equação 2 do IPCC (Baseada no COD)

Para estes cenários, utilizou-se as equações 2 e suas auxiliares 3, 4 e 5 para a criação de uma planilha Excel. Foram utilizados dados de entrada que compreendem as composições gravimétricas dos anos 1971, 1977 e 2015 (comentadas na seção 4.1.3.4 e necessárias para o cálculo do COD), adotou-se a temperatura da zona anaeróbia (para o cálculo de CODf) como 35°C (mostrado na seção 3.2); utilizou-se o percentual de CH_4 no biogás, obtido através da média das medições realizadas em campo (Anexo H) por meio do Landtec GEM5000. Também foram adotados valores de FCM (baseados nas condições do ACJ quanto à sua disposição não planejada de resíduos e profundidade). Adotou-se LDRS não gerenciado pouco profundo – $\text{FCM} = 0,4$ – até 2000 e não gerenciado profundo – $\text{FCM} = 0,8$ – a partir de 2000. Por fim, calculou-se o potencial de geração (Lo) para os diferentes anos por meio dos cálculos de COD e CODf. Para a oxidação (OX), foi utilizado o valor zero, pelas justificativas fornecidas na seção 3.7.1.4. A Tabela 11 mostra os dados adotados para as estimativas de CH_4 pelo IPCC.

Tabela 14 - Tabela de valores adotados para a utilização das equações do IPCC.

Temperatura na zona anaeróbia	Percentual de CH_4 no biogás	FCM (Até 2000): Adotou-se Não Gerenciado Pouco Profundo	FCM (Após 2000): Adotou-se Não Gerenciado Profundo
35	0,45	0,4	0,8

A Tabela 11 apresenta duas adoções para FCM. Aquela de 0,4 foi usada até 2000, considerando LDRS não gerenciado pouco profundo. Essa adoção é uma suposição, pois não é possível associar com exatidão a elevação nas cotas no ACJ aos anos de deposição dos resíduos. As cotas do ACJ variam na faixa de 1077 a 1146 aproximadamente como é possível ser observado no Apêndice E deste trabalho. No trabalho de Carneiro (2002), é apresentado que a produção per capita do DF passou de 0,40 kg/hab.dia, no início da década de 1970 a 1,0 kg/hab.dia no ano 2000. Portanto, foi adotado o FCM para LDRS não gerenciado profundo a partir dos anos 2000

Para a composição gravimétrica de 2015, que não possui igual nível de detalhamento das composições gravimétricas de 71 e 77, foram feitas estimativas que levaram em consideração a representatividade das categorias a nível micro (i.e., restos de alimentos, madeira, etc.) em relação às categorias macro do Anexo F (i.e., orgânicos, rejeitos, etc.), devido à ausência de dados da tipologia dos resíduos aterrados no ACJ com igual nível de detalhamento das microcategorias. Sabe-se que isso é insuficiente para gerar dados acurados e que se afasta da situação real, mas isso foi feito para se ter uma ideia do comportamento das emissões para este tipo de metodologia.

Filho (2018), em seu trabalho, discretiza uma faixa de valores de COD de 0,223 a 0,136, ao longo dos anos 1966 a 2017, mostrando que os valores de carbono orgânico degradável (COD) se reduzem com o passar do tempo. Nesse trabalho, os dados do cenário 2 do IPCC foram usados da forma apresentada no Anexo F. Através de informações do MCTI (2006), o autor comenta ainda que os valores ótimos de COD no país estariam contidos dentro do intervalo de 17,8 e 28,4% (0,178 e 0,284).

➤ **Cenário I-1**

O primeiro cenário do IPCC utiliza a situação de resíduos contida no Anexo C (para os resíduos aterrados) e as composições gravimétricas fornecidas nos Anexos D, E e F para o cálculo do COD. Esse cenário será comparado com aquele apresentado pelo modelo anterior do LandGEM.

➤ **Cenário II-1**

O segundo cenário também utiliza a situação de resíduos contida no Anexo C e a tabela com os valores de COD discretizados do trabalho de Filho (2018). Também será comparado com o Cenário 1 do LandGEM.

4.2.3.1. Cenários para a Equação 6 do IPCC (Modelo de Decaimento)

O modelo de decaimento se baseia na premissa de que os resíduos depositados no ano 0 (zero) sofrem decaimento ao longo de todos os anos. São, então, acompanhados do acréscimo de resíduos provenientes do ano 1 (um), adicionados ao total de resíduos do ano zero, mas que também sofrem decaimento individualmente; e assim por diante até atingir um horizonte em que não haja mais matéria para ser degradada e emitida em forma de metano. Dessa forma, foi feito um esquema explicativo para ajudar no entendimento, como é possível ver na Figura 33.

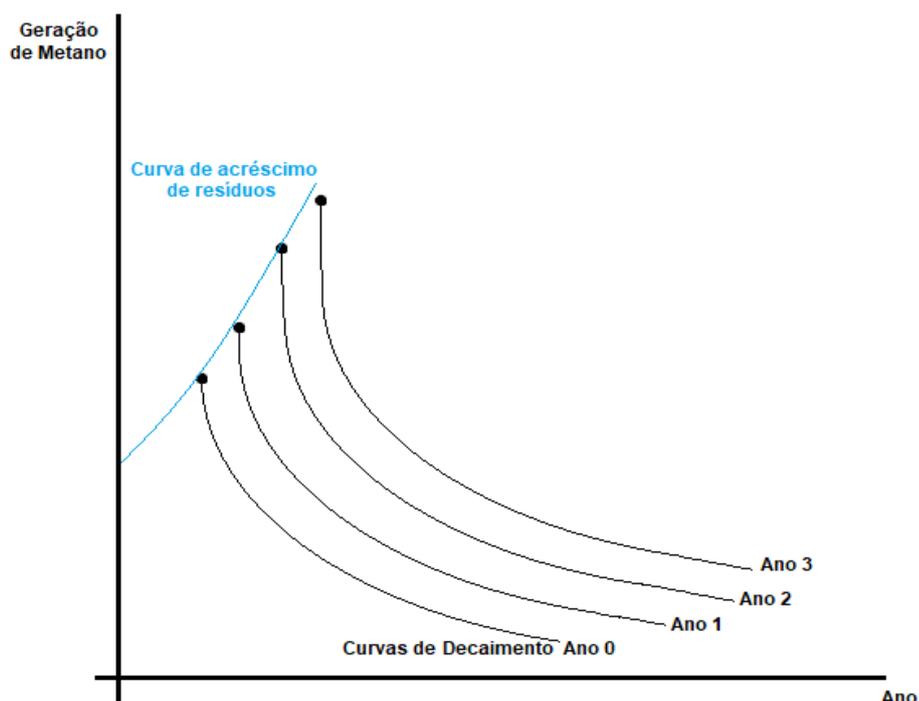


Figura 33 - Esquema explicativo do modelo de decaimento LFG.

O esquema feito na Figura 33 não é assunto novo, mas geralmente é de difícil dedução. É preciso entender bem o funcionamento do modelo de decaimento antes da geração de dados. O modelo de decaimento do IPCC foi construído no Excel com os dados de resíduos apresentados no Anexo C. Parte da tabela criada pode ser visualizada no Apêndice F. Variou-se os parâmetros conforme dois diferentes cenários.

➤ **Cenário I-2**

Os parâmetros utilizados para o uso da Equação 6 do IPCC foram os mesmos do Inventory Conventional do LandGEM ($k = 0,04 \text{ ano}^{-1}$ e $Lo = 100 \text{ m}^3/\text{Mg}$).

➤ **Cenário II-2**

O Lo foi calculado através dos dados da Tabela 11, dados de densidade do CH_4 e dos valores discretizados de COD do Anexo G ($k = 0,04 \text{ ano}^{-1}$ e $Lo = 64,4 \text{ m}^3/\text{Mg}$).

5. RESULTADOS

5.1.1. Mapa do Resultado do Georreferenciados dos Queimadores no ACJ

Foram demarcados 150 queimadores (FID 0 a 149). Como mencionado na seção 4.1.3.2, a Valor Ambiental (2019) sinaliza 127 unidades de queimadores ativas na área operacional e 22 ativas na área embargada. A demarcação dos potenciais queimadores é passível de erros, dada a resolução dos *pixels*. Ademais, até o presente momento, não se tem conhecimento de quantos queimadores estão efetivamente em atividade, dado que acender os queimadores consiste em uma atividade manual feita pelos trabalhadores do ACJ. Os queimadores se dividem em duas zonas 22S (Apêndice B) e 23S (Apêndice C). A Figura 34 apresenta a distribuição espacial dos queimadores no ACJ.

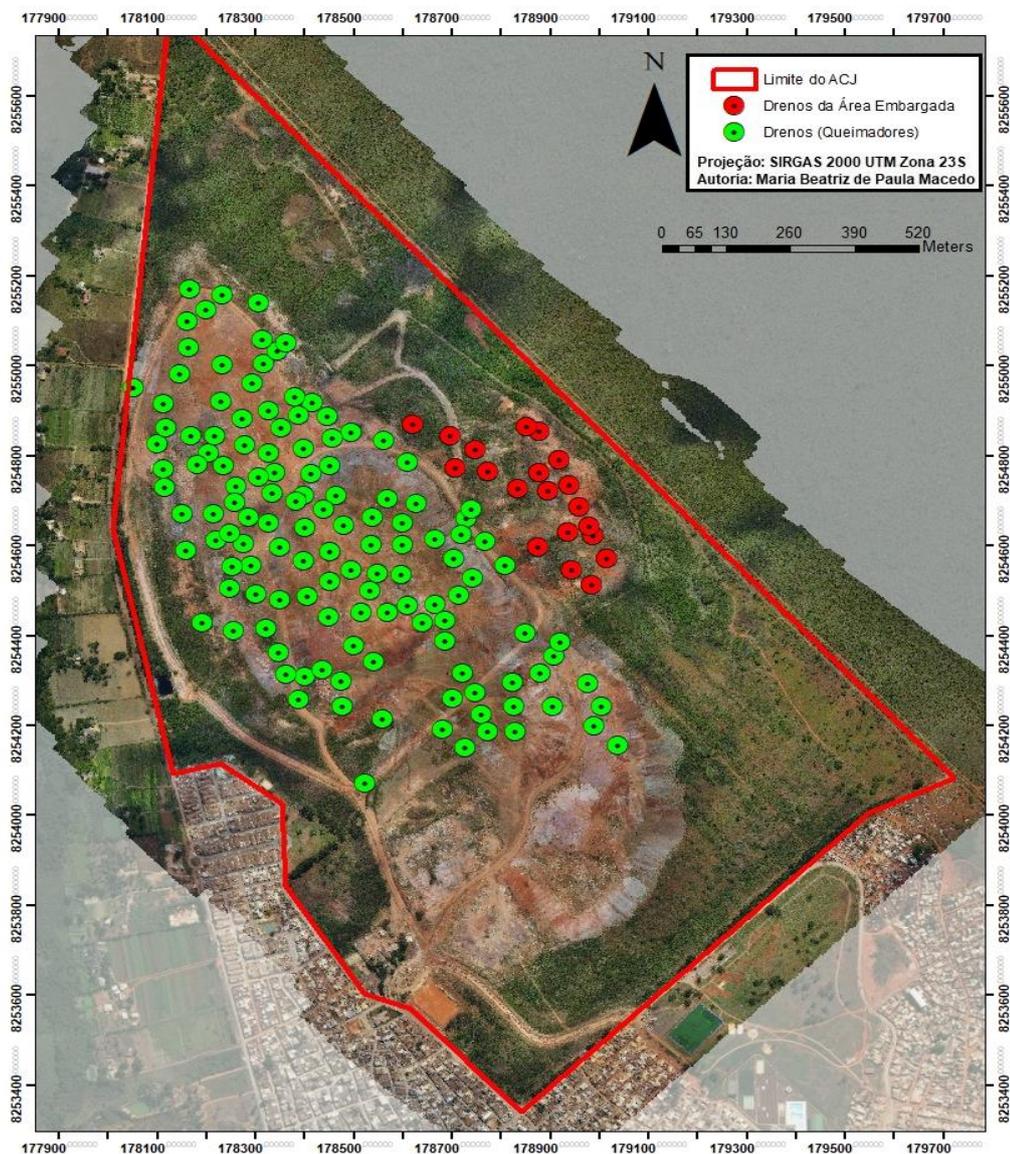


Figura 34 - Mapa final da distribuição dos queimadores de biogás no ACJ gerado no ArcGIS.

5.1.2. Resultados dos Cenários do LandGEM

Os resultados dos gráficos dos cenários 1 e 2, do LandGEM, divididos em subcenários A, B, C e D, podem ser vistos a seguir.

➤ Cenário 1A – *Inventory Conventional*

A Figura 35, a seguir, apresenta os resultados e valores de pico obtidos para o primeiro cenário.

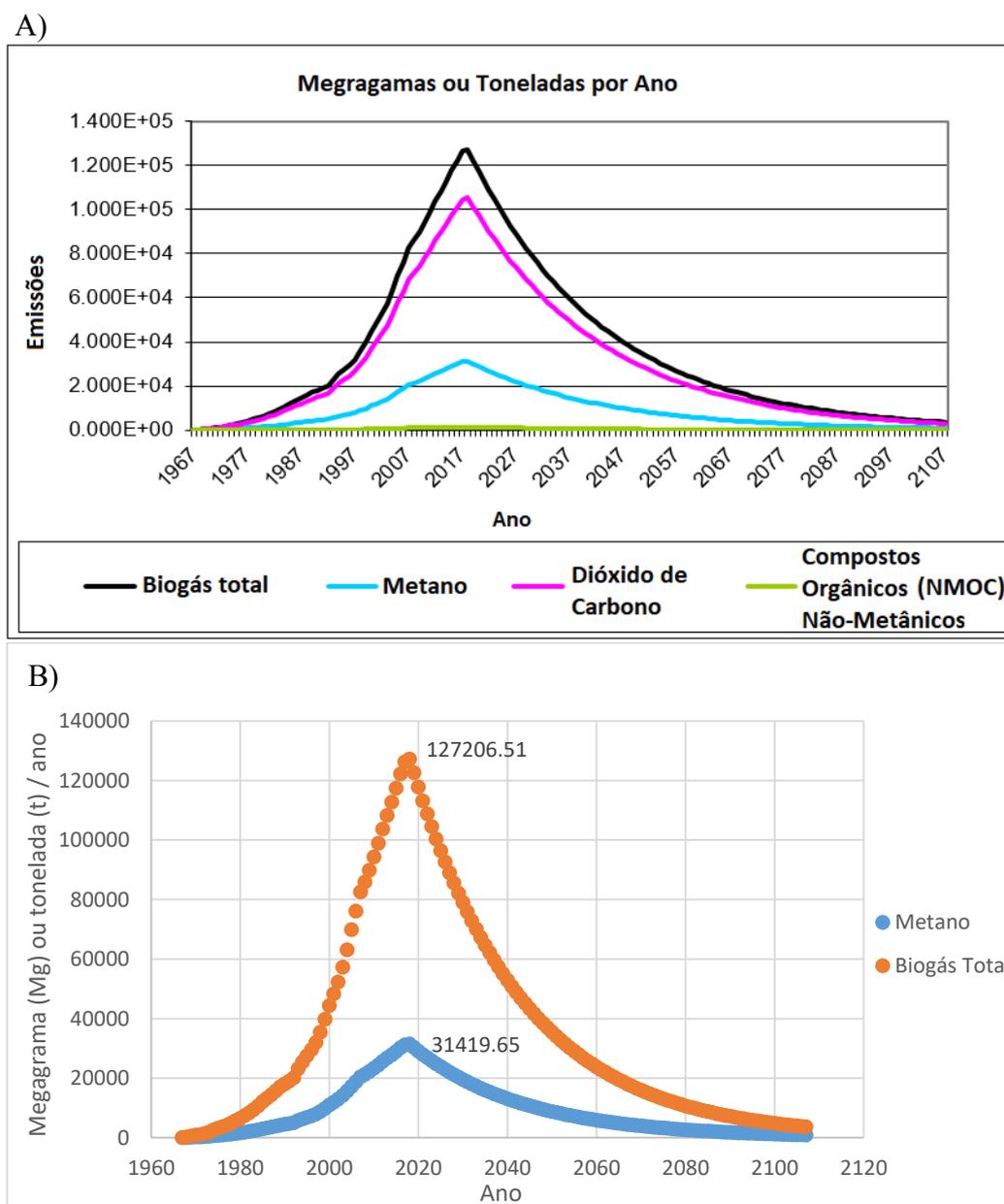


Figura 35 - A) Resultado gráfico do comportamento das emissões ao longo dos anos e B) Curvas isoladas do metano e do biogás total com os respectivos valores de pico para o Cenário 1A.

Observa-se que os valores de pico de emissão do cenário 1A são atingidos no ano de 2018, sendo de aproximadamente 31,4 Gg para metano (CH_4) e 127,2 Gg para biogás total.

➤ **Cenário 1B – Inventory Arid Area**

A Figura 36 apresenta os resultados e valores de pico do subcenário B analisado, que simula a condição árida para o LDRS.

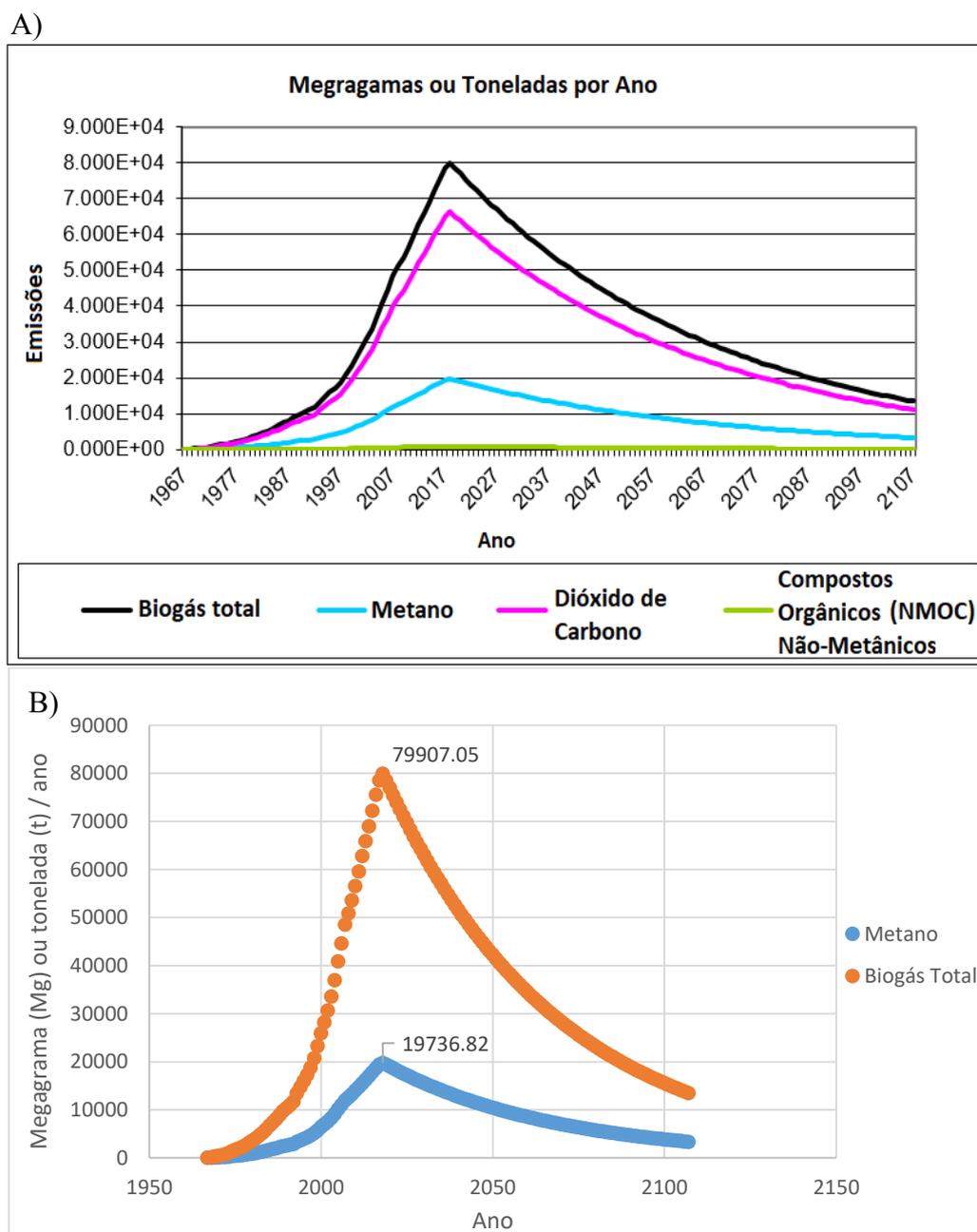


Figura 36 - A) Resultado gráfico do comportamento das emissões ao longo dos anos e B) Curvas isoladas do metano e do biogás total com os respectivos valores de pico para o Cenário 1B.

Os valores de pico de emissão do cenário 1B também são atingidos no ano de 2018, sendo de aproximadamente 19,7 Gg para metano (CH₄) e 79,9 Gg para biogás total. É possível perceber que, após o valor de pico, ocorre um decaimento mais lento, ao longo dos anos, se comparado ao cenário 1A.

➤ **Cenário 1C – *Inventory Wet***

A Figura 37 apresenta os resultados do cenário 1C, que simula a condição de recirculação de lixiviado dentro do LDRS, gerando um ambiente bem mais úmido internamente.

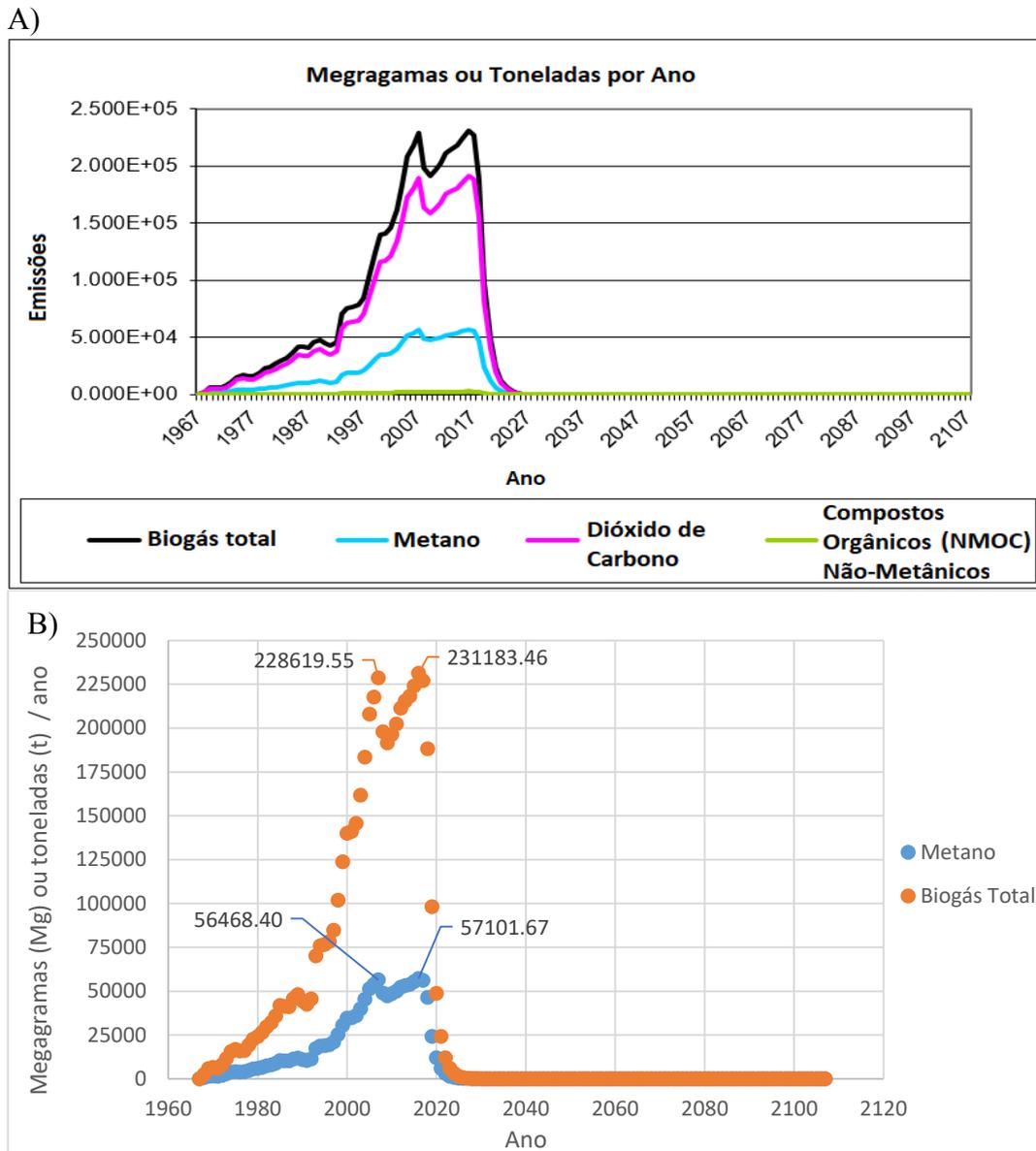


Figura 37 - A) Resultado gráfico do comportamento das emissões ao longo dos anos e B) Curvas isoladas do metano e do biogás total com os respectivos valores de pico para o Cenário 1C.

Observa-se que, para este cenário, o decaimento ocorre rapidamente e não se prolonga ao longo dos anos, como é possível observar nos cenários 1A e 1B. No gráfico, é possível observar dois picos de emissão. O primeiro é atingido no ano de 2007 de aproximadamente 56,5 Gg para o metano e 228,6 Gg para o biogás total e o segundo, no ano de 2016, sendo de aproximadamente 57,1 Gg para metano (CH_4) e 231,2 Gg para biogás total. Observa-se que o decaimento ocorre rapidamente e não se prolonga ao longo dos anos, como acontece nos cenários 1A e 1B.

➤ **Cenário 1D – Precipitação Anual Total > 1000 mm**

A Figura 38 apresenta o resultado para o cenário 1D que contempla a condição pluviométrica da região, segundo o modelo mexicano (Anexo A).

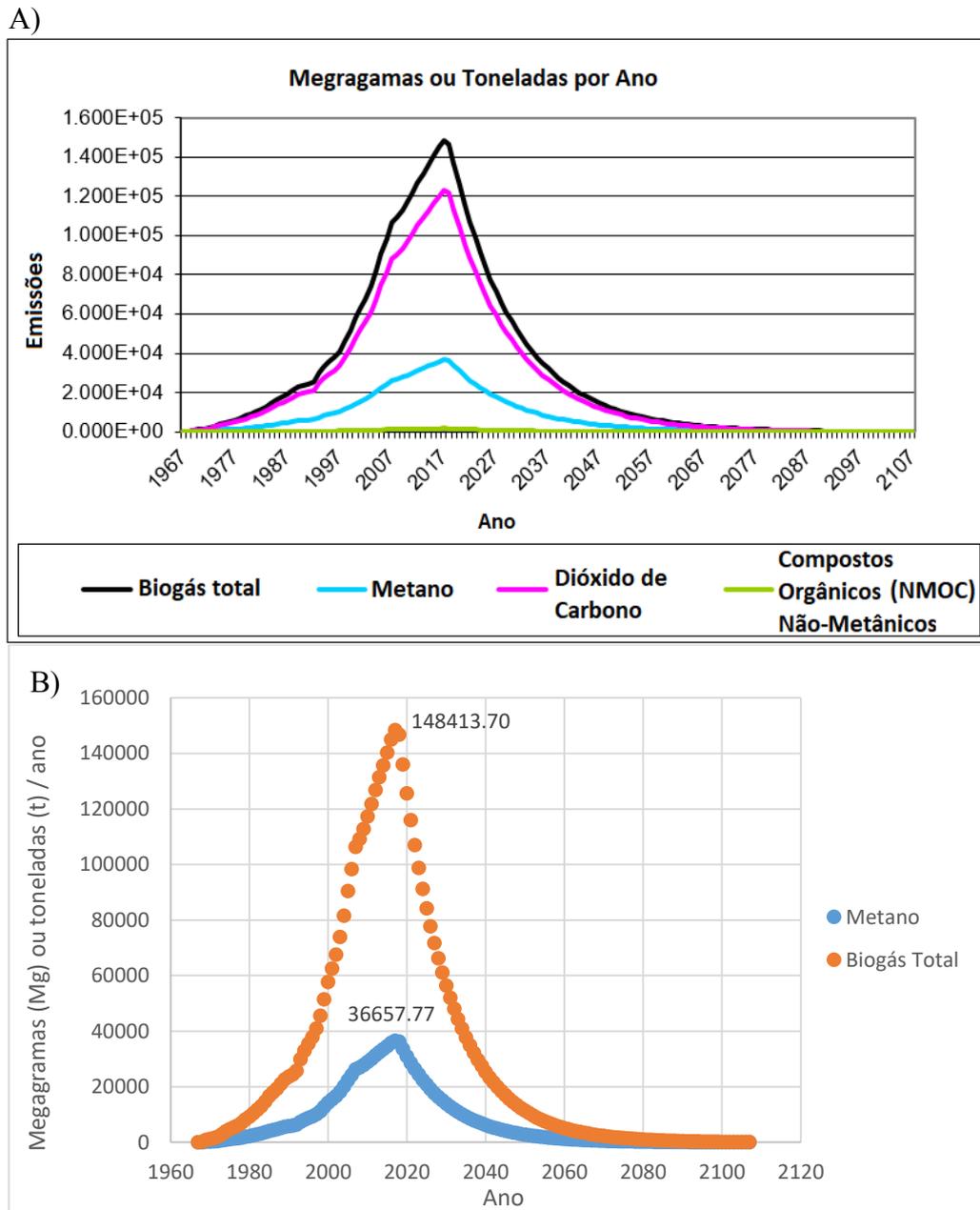


Figura 38 - A) Resultado gráfico do comportamento das emissões ao longo dos anos e B) Curvas isoladas do metano e do biogás total com os respectivos valores de pico para o Cenário 1D.

Os picos de geração de metano e de biogás total para o Cenário 1D (Figura 38) são 36,7 Gg e 148,4 Gg respectivamente, atingidos no ano de 2017. Resultado maior do que aqueles obtidos pelos cenários 1A e 1B que possuíam, valores para a taxa de geração (k) menores e valores para o potencial de geração (Lo) maiores do que os utilizados no cenário 1C.

➤ **Cenário 2A – Inventory Conventional**

A Figura 39 apresenta os resultados para o cenário 2A, que difere do 1A apenas em relação aos resíduos aterrados.

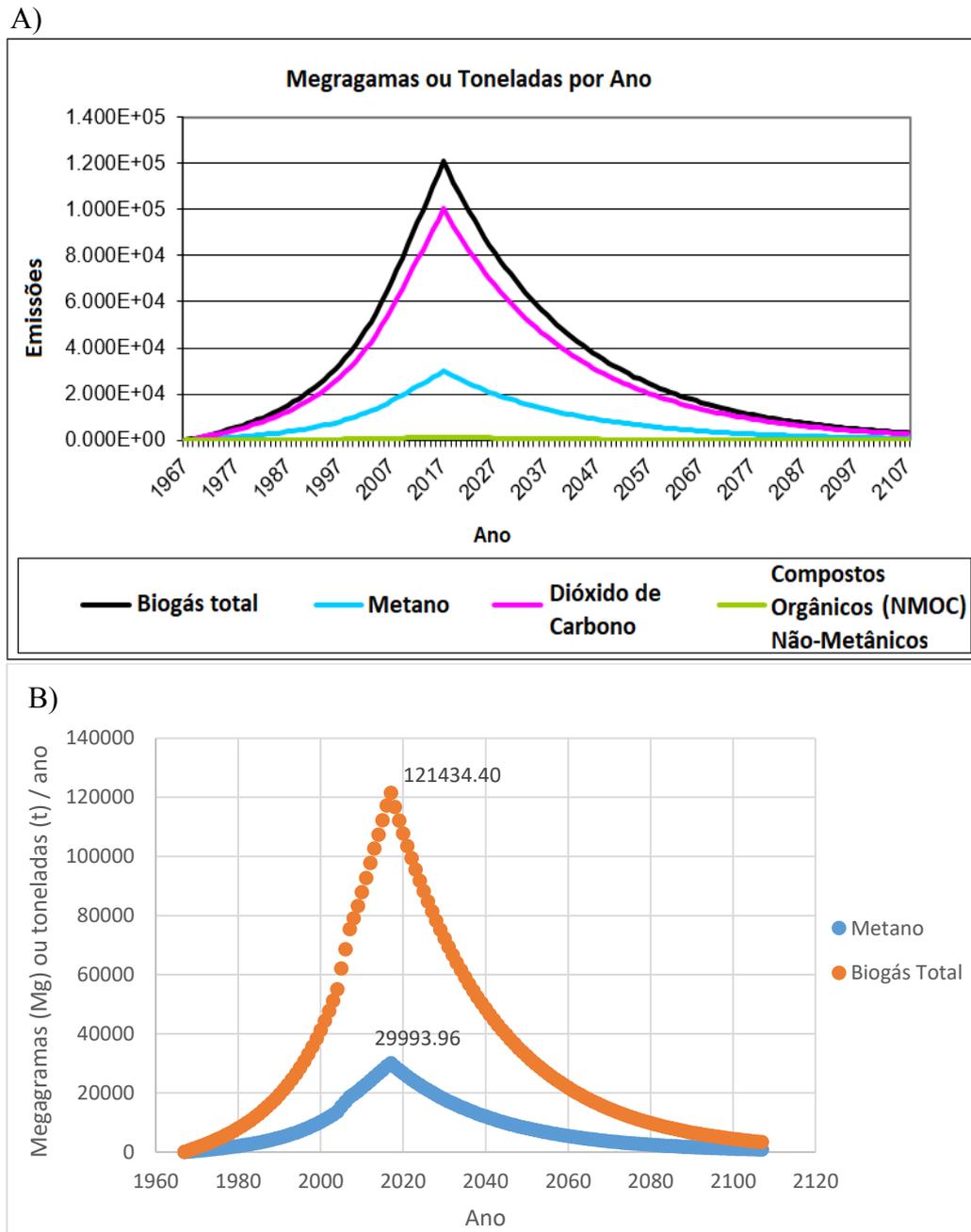


Figura 39 - A) Resultado gráfico do comportamento das emissões ao longo dos anos e B) Curvas isoladas do metano e do biogás total com os respectivos valores de pico para o Cenário 2A.

Os valores de pico de emissão do Cenário 2A (Figura 39) são atingidos no ano de 2017. Os valores estimados foram de aproximadamente 29,9 Gg para o metano gerado e 121,4 Gg para o biogás total.

➤ **Cenário 2B – Inventory Arid Area**

A Figura 40 corresponde ao cenário 2B (condição árida no aterro ou resíduos que se degradam lentamente) e pode ser vista a seguir.

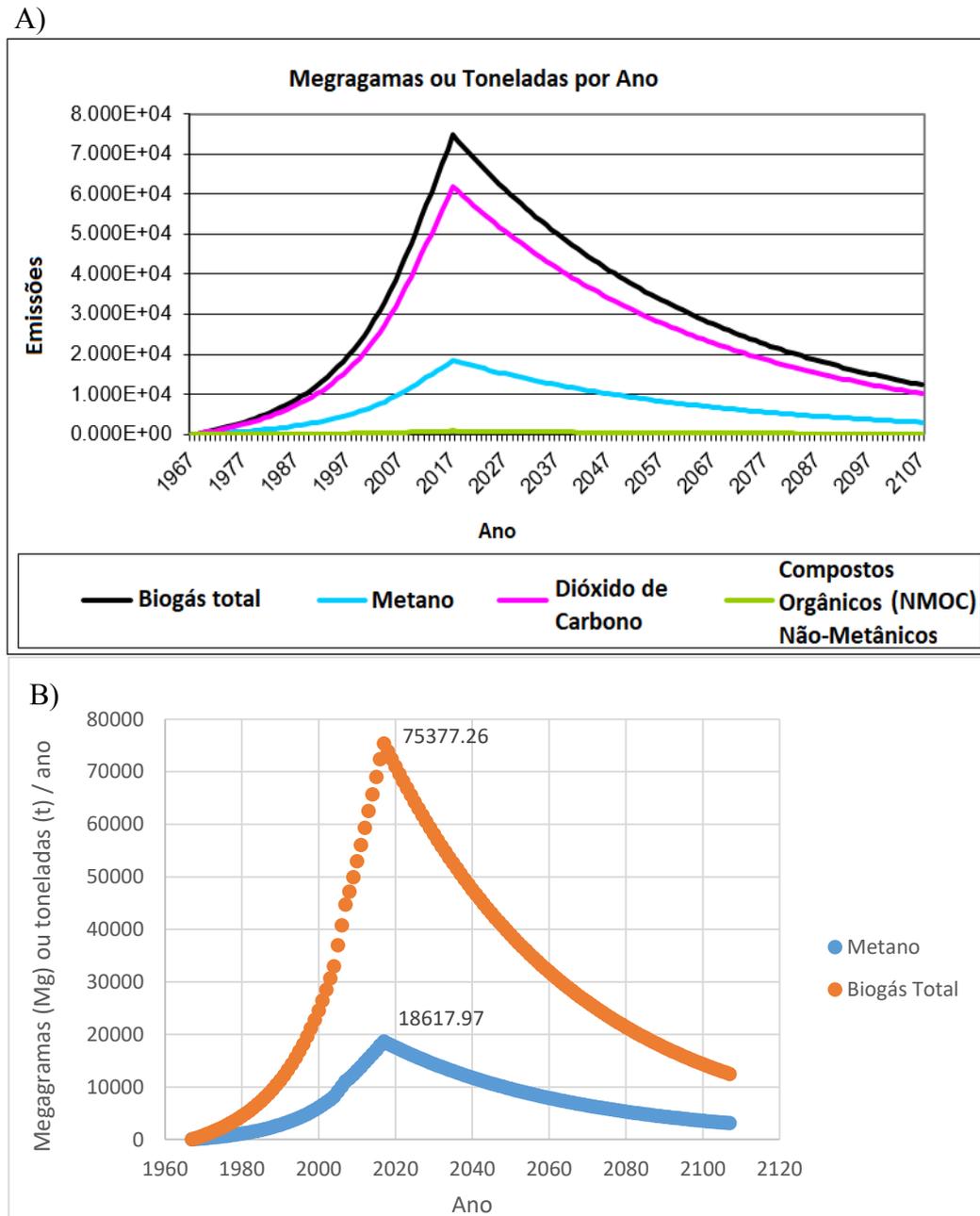


Figura 40 - A) Resultado gráfico do comportamento das emissões ao longo dos anos e B) Curvas isoladas do metano e do biogás total com os respectivos valores de pico para o Cenário 2B.

Percebe-se que para essa situação de LDRS árido (mostrada na Figura 40), após o valor de pico, dado no ano de 2017, ocorre um decaimento mais lento, ao longo dos anos, se comparado ao cenário 2A. O valor de pico de emissão é de aproximadamente 18,6 Gg para metano e 75,4 Gg para biogás total.

➤ **Cenário 2C – *Inventory Wet***

A Figura 41 apresenta o resultado das emissões do segundo subcenário C, que simula a condição de recirculação de lixiviado dentro do LDRS.

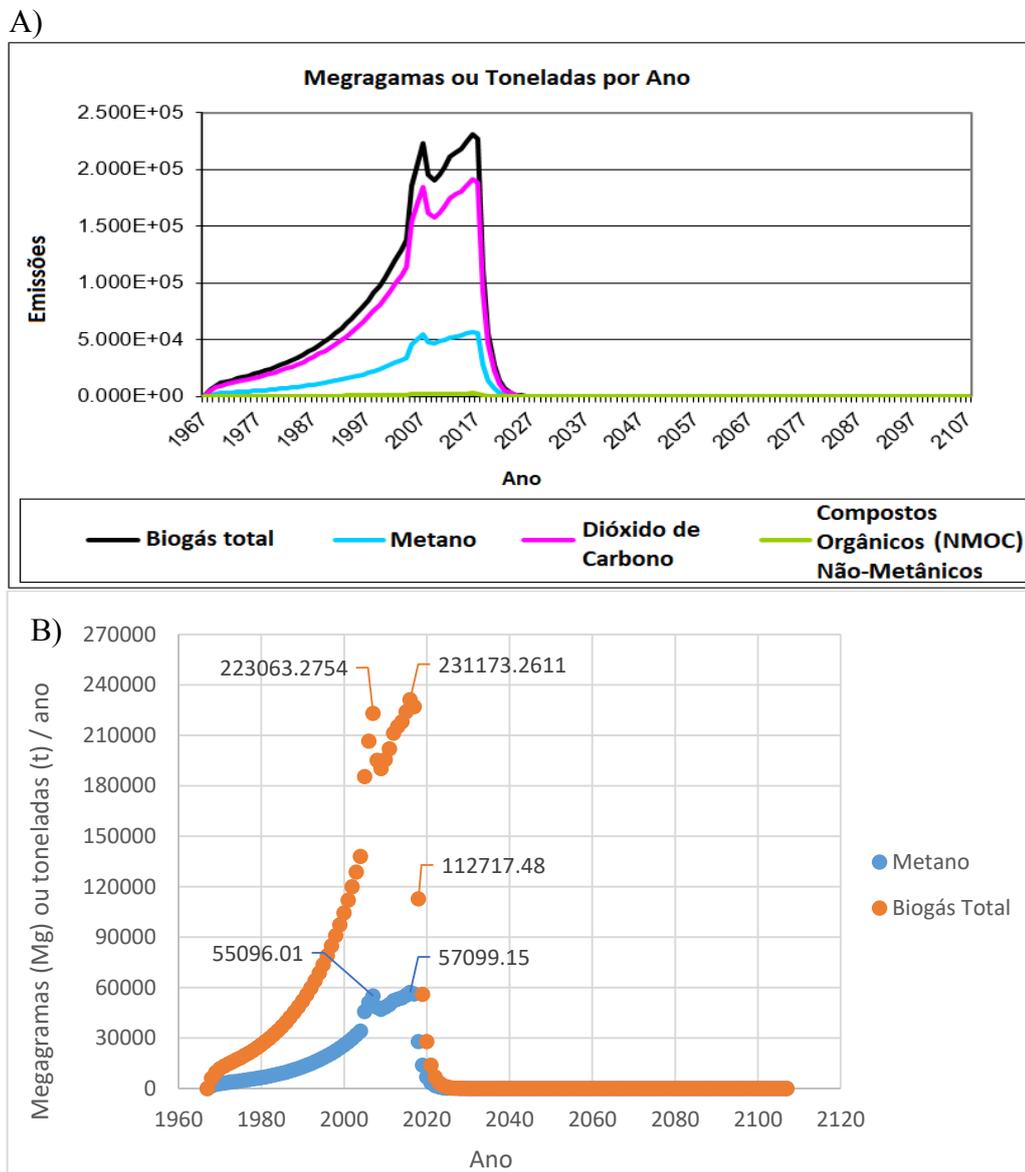


Figura 41 - A) Resultado gráfico do comportamento das emissões ao longo dos anos e B) Curvas isoladas do metano e do biogás total com os respectivos valores de pico para o Cenário 2C.

Assim como no Cenário 1C, o comportamento das emissões do Cenário 2C (*Inventory Wet*), da Figura 39, apresenta dois valores de pico, o primeiro atingido em 2007, com emissão aproximada de 55,1 Gg de metano e 223,1 Gg de biogás total. O segundo pico é atingido no ano 2016, com 57,1 Gg de metano e 231,2 Gg de biogás total. De 2017 para 2018, existe uma queda acentuada de 231,2 Gg para 112,3 Gg de biogás, que pode ser explicada pela brusca redução nos resíduos aterrados, dada pela desativação do ACJ em 2018.

➤ **Cenário 2D – Precipitação Anual Total > 1000 mm**

A Figura 42 apresenta as estimativas de metano e biogás total para o segundo subcenário D (Parâmetros para a precipitação anual > 1000 mm, segundo o Anexo A).

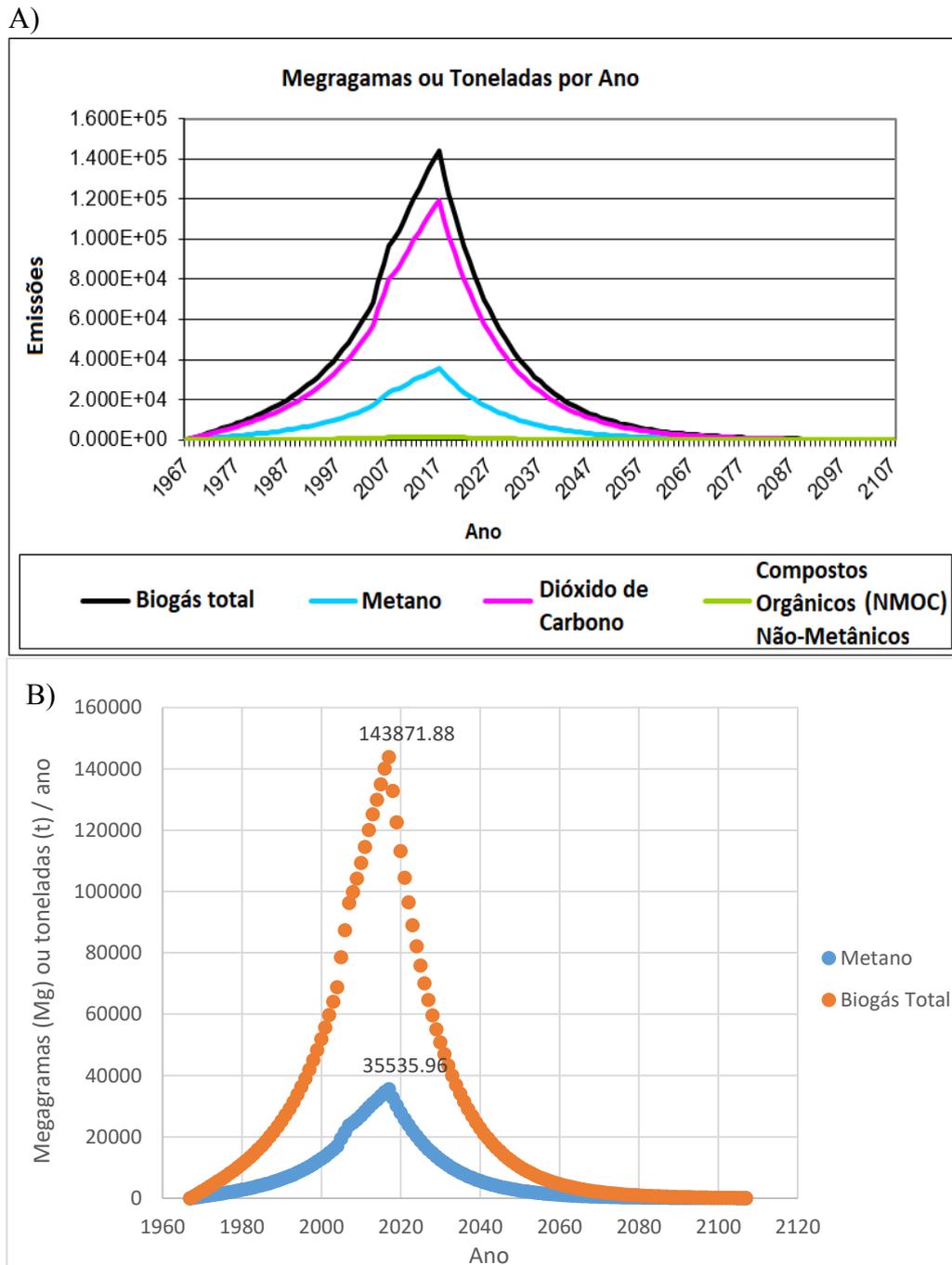


Figura 42 - A) Resultado gráfico do comportamento das emissões ao longo dos anos e B) Curvas isoladas do metano e do biogás total com os respectivos valores de pico para o Cenário 2D.

Para o Cenário 2D (Figura 40), observa-se valores de pico de emissão mais altos do que para os cenários 2A e 2B. Esses valores foram equivalentes a 35,5 Gg de metano e 143,9 Gg de biogás total, atingidos em 2017 (da mesma forma que os cenários 1D, 2A e 2B).

5.1.3. Resultados dos Cenários da Equação 2 do IPCC

As Figuras 43 e 44 apresentam um comparativo entre as emissões anuais apresentadas pela Equação 2 do IPCC e o Cenário 1C do LandGEM. Isso foi feito através da análise do comportamento da curva dado pela equação, que pressupõe que todo o CH₄ seria emitido imediatamente no ano em que os resíduos foram dispostos, que se assemelha ao subcenário C do LandGEM. Dessa forma, ambos os modelos foram dispostos juntos graficamente para fins comparativos. A Figura 43, a seguir, compara o Cenário 1C do LandGEM com o Cenário I-1 do IPCC.

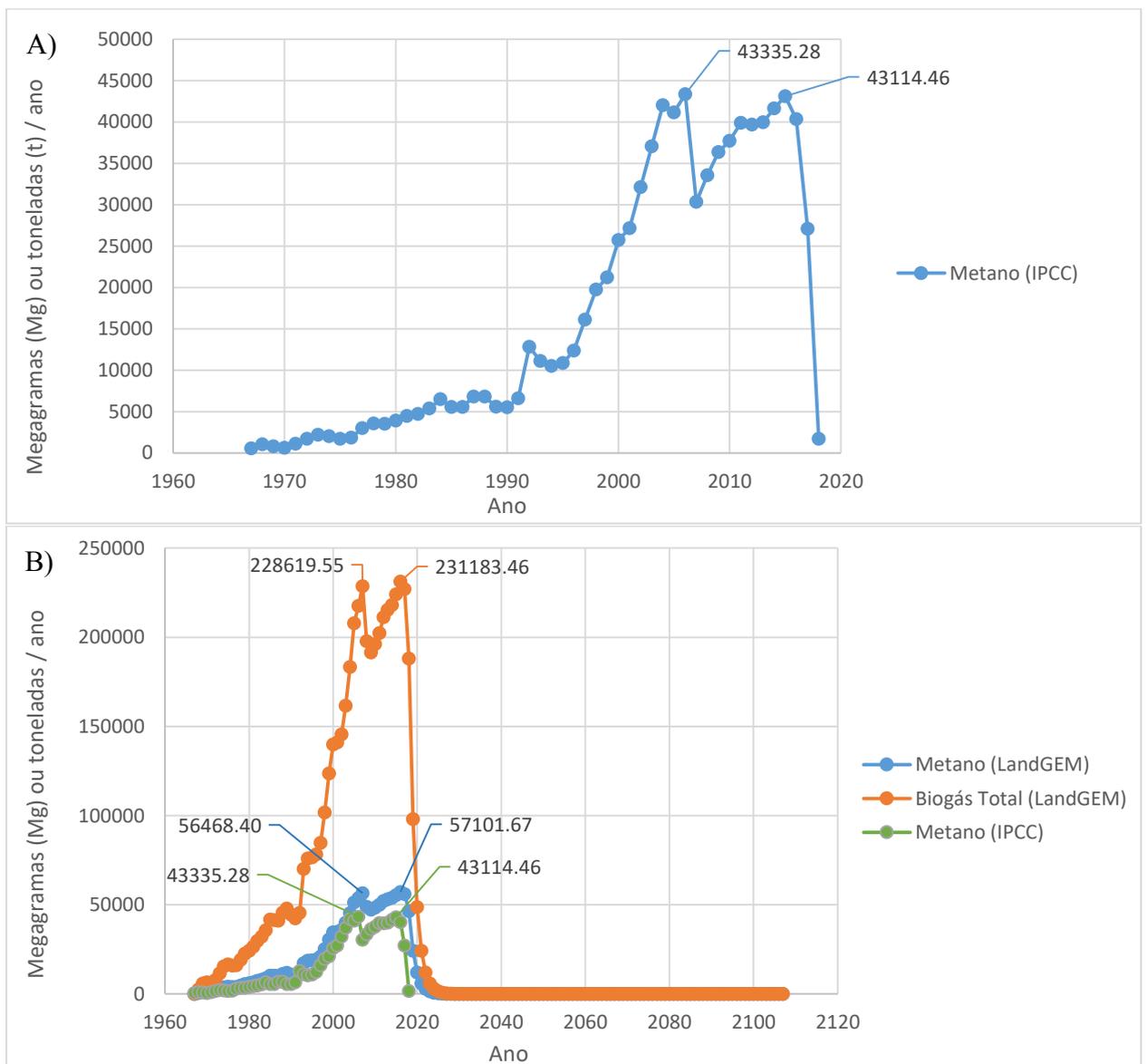


Figura 43 - A) Gráfico com os dados de emissão anual de metano obtidos pelo primeiro modelo do IPCC e B) Comparação gráfica do resultado do Cenário I-1 do IPCC com os resultados das emissões do Cenário 1C do LandGEM.

A Figura 44 apresenta o Cenário II-1 do IPCC, que utiliza os valores discretizados de COD contidos no Anexo G.

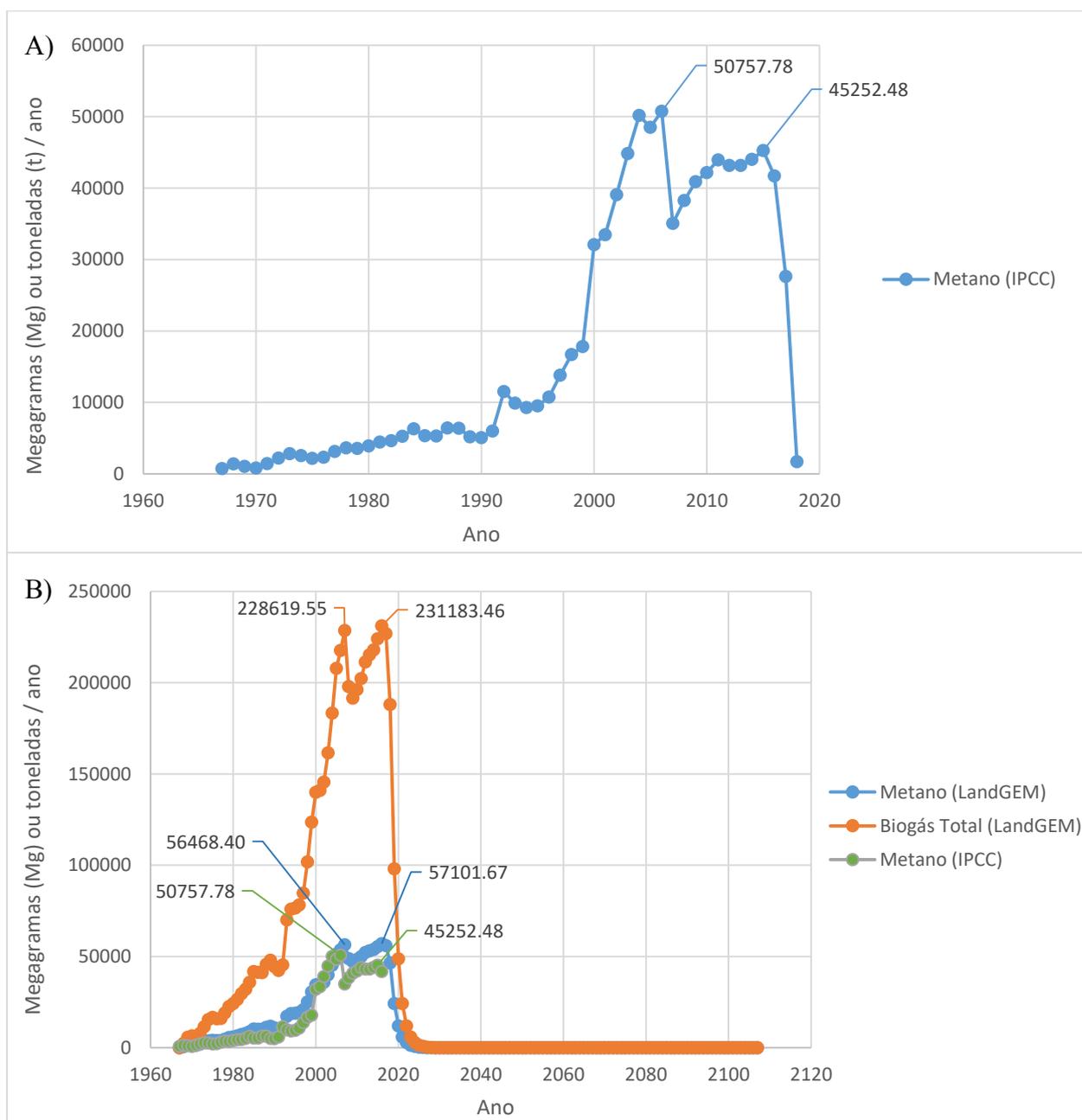


Figura 44 - A) Gráfico com os dados de emissão anual de metano obtidos pelo primeiro modelo do IPCC e B) Comparação gráfica do resultado do Cenário II-1 do IPCC com os resultados das emissões do Cenário 1C do LandGEM.

Os gráficos do IPCC apresentam crescimento acentuado na geração metano em dois momentos observados na curva. O valor mais alto de emissão de CH₄ para o Cenário I-1 do IPCC (Figura 43) foi de 43,3 Gg, atingido no ano de maior deposição de resíduos (2006), segundo o Anexo C. Em relação ao cenário II-1 do IPCC (Figura 44), o maior valor foi de 50,8 Gg.

5.1.4. Resultados dos Cenários da Equação 6 do IPCC (Modelo de Decaimento)

A Figura 45 mostra o resultado do valor de pico de emissão de metano para o Cenário I-2 do Modelo de Decaimento do IPCC. A Figura 45, logo abaixo, apresenta esse valor referente ao Cenário II-2.

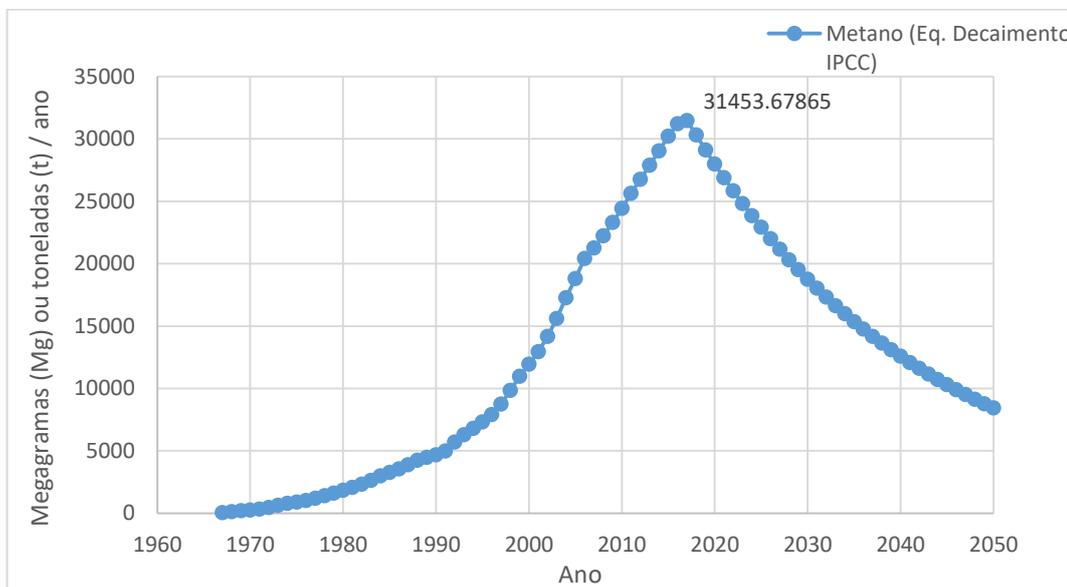


Figura 45 - Resultado das emissões com o valor de pico de metano para o Cenário I-2 do Modelo de Decaimento do IPCC.

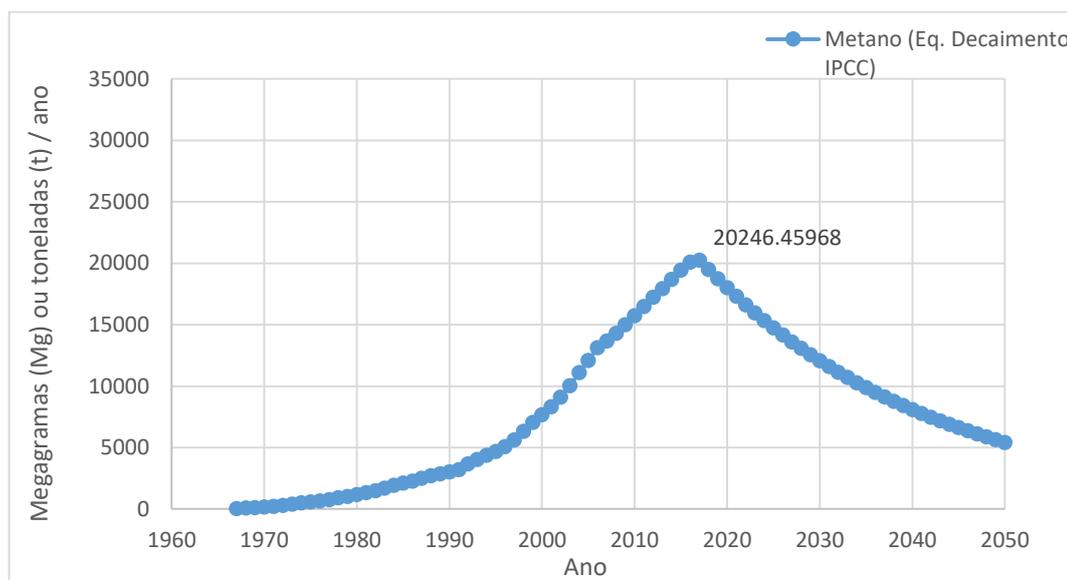


Figura 46 - Resultado das emissões com o valor de pico de metano para o Cenário II-2 do Modelo de Decaimento do IPCC.

O Cenário I-2 (Figura 45) teve valor de pico de geração equivalente a 31,5 Gg de metano. O Cenário II-2 (Figura 46), por sua vez, teve valor de pico menos expressivo e equivalente a 20,3 Gg de metano. Ambos os valores de pico foram atingidos no ano 2017.

5.1.5. Resultados das Interpolações IDW para os Dados de Fluxo

A área final – referente à demarcação discutida na seção 4.2.2.1 – é equivalente a 43050,81 m². Dentro dessa área, para os pontos com medições de fluxo, dadas em [m³/h], foi feita uma interpolação IDW, conforme é apresentado na Figura 47.

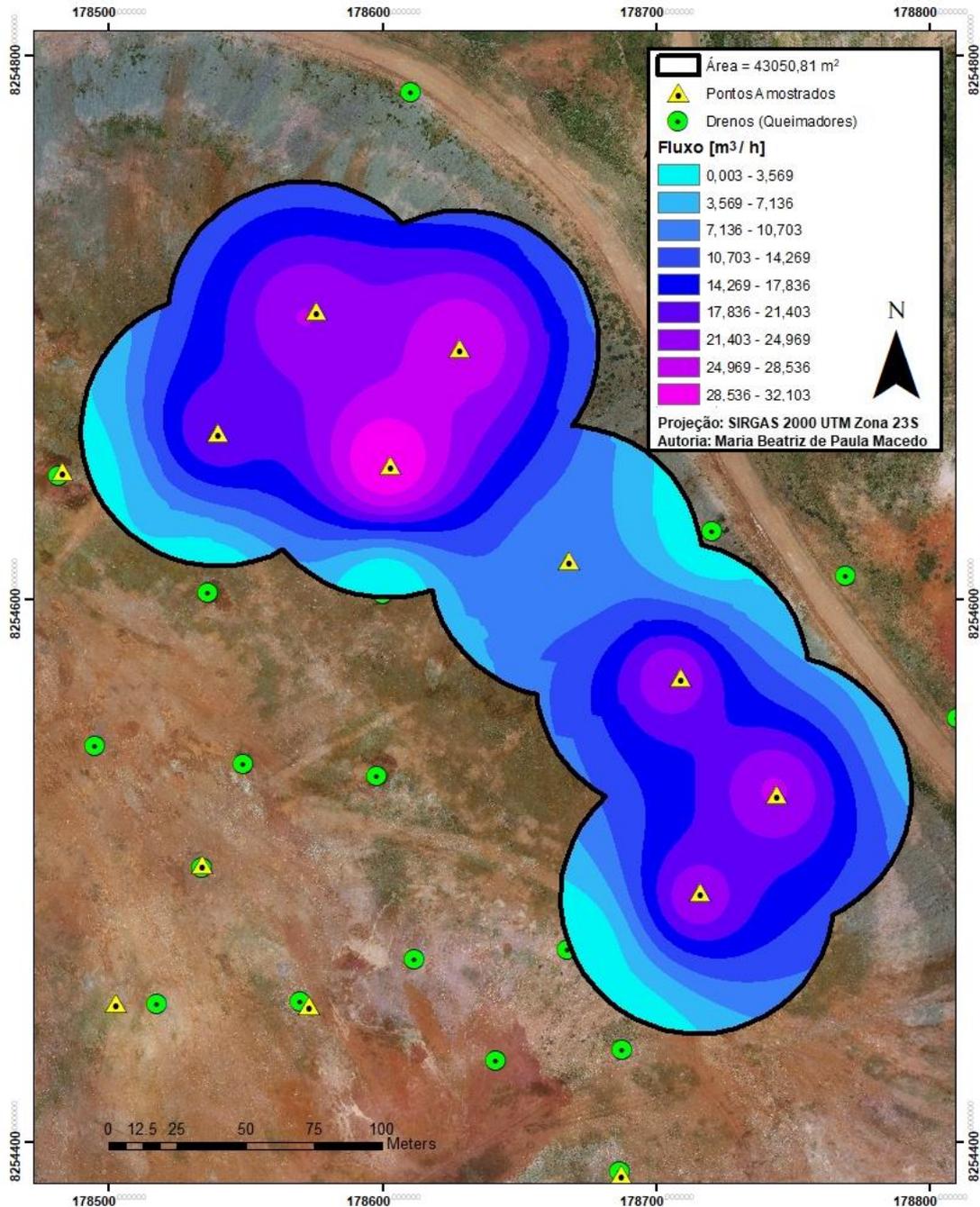


Figura 47 - Resultado da interpolação IDW para os pontos amostrados em relação ao fluxo de biogás. A interpolação mostrada na Figura 47 apresenta o comportamento dos intervalos de fluxo gerados pela interpolação, somente para a área mais representativa (que compreende os pontos amostrados), cujo maior valor de fluxo amostrado é equivalente a 32,1 m³/h.

A média dos dados de fluxo em [m³/h] na Tabela 9 (seção 4.1.3.5), é de 22,79 m³/h. O dado mais baixo obtido em campo é igual a 7,99 m³/h. O dado mais alto medido foi de 32,11 m³/h. A interpolação prevê valores para as regiões sem medições. Isso pode afastar as estimativas dos valores reais, que podem ser mais altos ou mais baixos. A Tabela 12 mostra o fluxo por metro quadrado de área de contribuição para cada um dos intervalos de classes obtidos por meio da interpolação.

Tabela 15 - Tabela de fluxos por área de contribuição.

Classes (Intervalos)	Média da classe [m ³ /h] por área de contribuição [m ²]
28,54 a 32,1	0,0867
24,97 a 28,54	0,0358
21,4 a 24,97	0,0088
17,84 a 21,4	0,0027
14,27 a 17,84	0,0019
10,7 a 14,27	0,0268
7,14 a 10,7	0,0011
3,57 a 7,14	0,0012
0 a 3,57	0,0011
Média Final [m³/h/m²]	0,0185

Ao final, multiplicando-se a média final obtida (Tabela 12) para fluxo por área pela área total do ACJ, é possível obter o fluxo médio para toda a extensão do objeto de estudo. Todas as etapas realizadas se tratam de uma média ponderada, cujas ponderações consistem em 1/área. Para fins comparativos, utilizou-se a densidade do CH₄ do LandGEM para a aproximação do resultado de fluxo de biogás para o caso hipotético onde 100% do biogás fosse composto por metano. Isso foi feito para 1 (um) ano, como é possível observar na Tabela 13.

Tabela 16 - Estimativa de fluxo de biogás em tonelada por ano para o ACJ [t/ano].

Resultado de Fluxo [m ³ /h]	
36.909,34	
Resultado de Fluxo [m ³ /ano]	
323.325.846,54	
Densidade CH ₄ [t/m ³] (LandGEM)	Caso 100% do fluxo fosse de CH ₄
0,000667	215.706,84
Densidade do Biogás [t/m ³] (LandGEM)	Resultado de Fluxo de Metano [t/ano]
0,0012	387.991,02

Os fluxos em [t/ano] obtido, por meio dessa análise, podem ser analisados comparativamente com os fluxos de metano para os cenários do modelo do LandGEM gerados.

5.1.6. Resultados das Interpolações IDW para os Dados de Concentração de CH₄

A média dos valores de concentração de metano, obtidos por meio das medições em campo, foi de 45,6 % de metano no biogás. O valor mínimo para a concentração de metano, medido em campo, foi de 1,9% e o máximo foi de 57,9%. Nos dados das medições *in situ* (Anexo H), observa-se que apenas 6 (seis), dos 48 (quarenta e oito) pontos amostrados, apresentaram concentrações de metano inferiores a 20%. A Figura 48 destaca o resultado da interpolação, considerando o limite do ACJ para a geração dos intervalos de valores estimados.

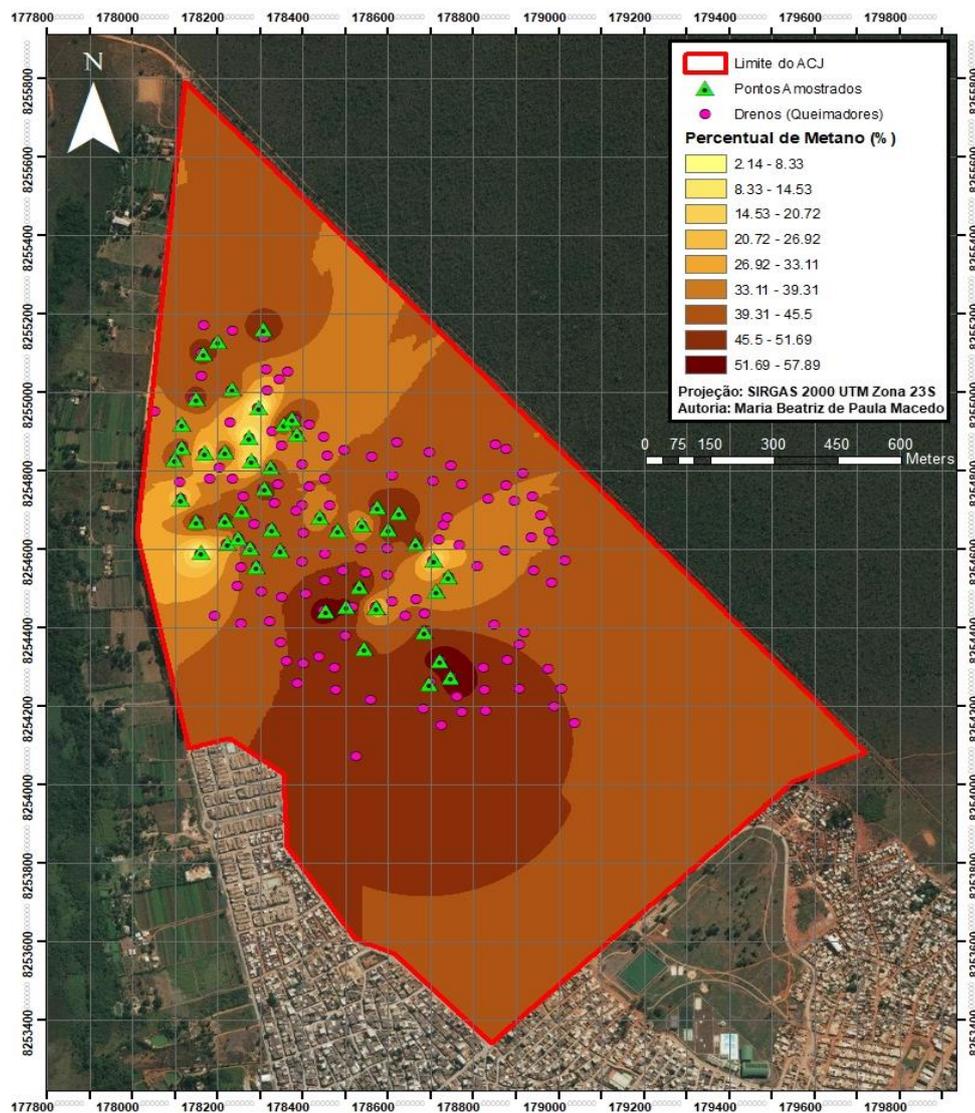


Figura 48 - Interpolação IDW da concentração de metano no biogás com expansão dos resultados para o limite do ACJ.

A Figura 48 apresenta o resultado da interpolação IDW (método de classificação: *Equal Interval*) dentro do limite do ACJ. A faixa de valores varia de 2,14 a 57,89%. Nessa interpolação, quanto mais se afasta dos pontos amostrados (pontos verdes), menos precisos são os resultados da interpolação.

A Figura 49 nos mostra o resultado do teste de validação realizado através da interpolação IDW (utilizando o método de classificação *Equal Interval*). Foram utilizados 30 pontos aleatórios para a execução da interpolação e posterior validação dos intervalos encontrados com os 18 pontos amostrados restantes.

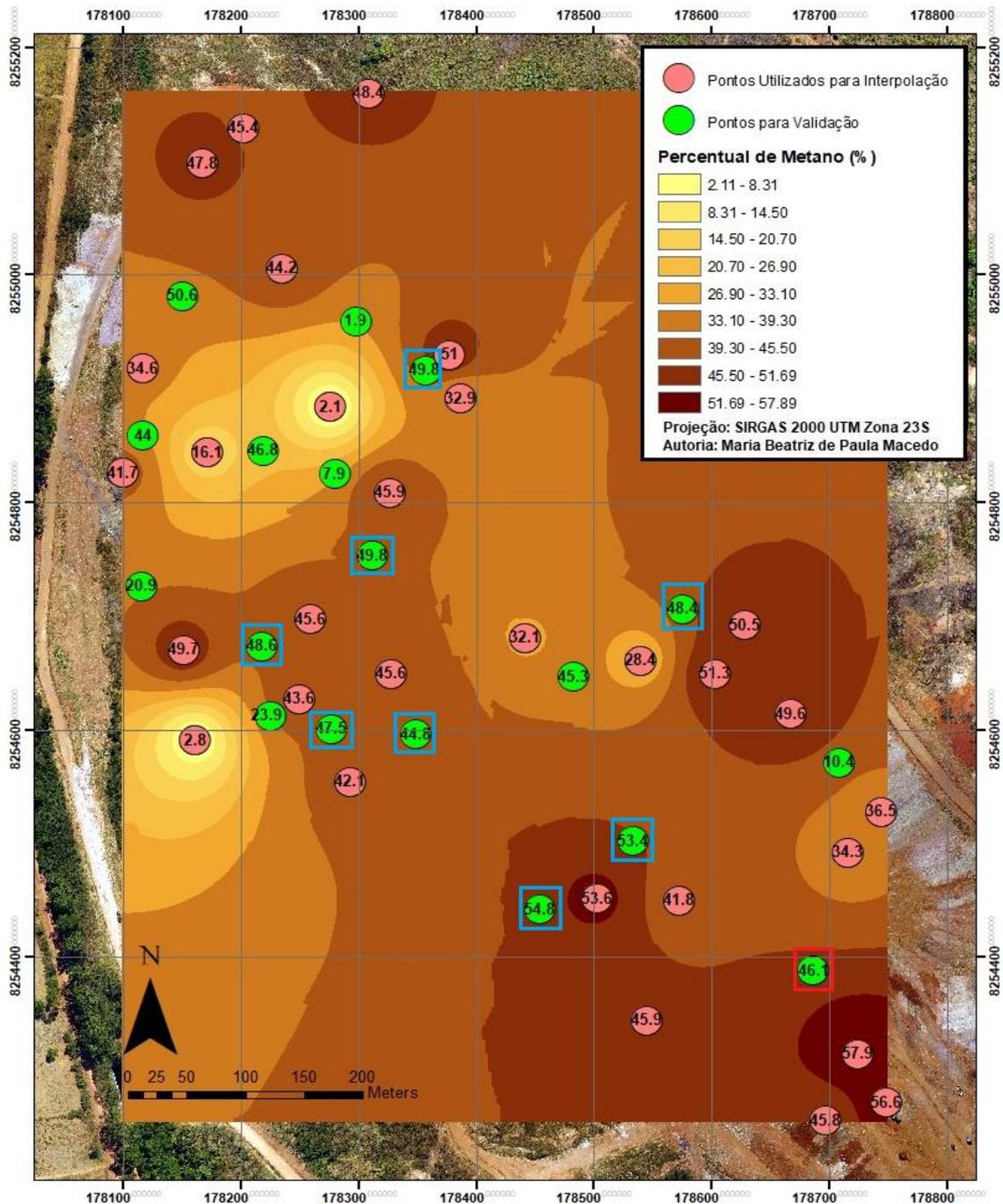


Figura 49 - Teste de validação da interpolação IDW com os pontos amostrados.

A Figura 49 nos mostra, que 8 (oito) dos pontos de validação, demarcados em azul, se encontram em um intervalo próximo ao valor real medido em campo, e apenas 1 (um) deles, demarcado em vermelho, se encontra no intervalo correspondente ao valor real.

6. DISCUSSÕES

Nessa seção, serão discutidos todos os resultados obtidos, no âmbito de magnitude dos valores, de comportamentos e de distribuição espacial dos resultados. Abaixo, existe uma tabela comparativa (Tabela 12) dos principais resultados obtidos pelos diferentes cenários de ambos os modelos teóricos LFG através da tabela comparativa.

Tabela 17 - Comparação dos valores de pico de metano e biogás em Gg, com o ano em que foram atingidos, em relação aos dois modelos e aos diferentes cenários.

Estimativas Teóricas	Modelo	Fonte dos Dados de Resíduos	Cenário	Valor(es) de Pico de Metano [Gg] (Ano)	Valor(es) de Pico de Biogás [Gg] (Ano)	
	LandGEM	Cenário 1		1A - <i>Inventory Conventional</i>	31,4 (2018)	127,2
				1B - <i>Inventory Arid Area</i>	19,7 (2018)	79,9
				1C - <i>Inventory Wet</i>	56,5 (2007) e 57,1 (2016)	228,6 (2007) e 231,2 (2016)
				1D - Precipitação > 1000 mm	36,7 (2017)	148,4 (2017)
		Cenário 2		2A - <i>Inventory Conventional</i>	29,9 (2017)	121,4 (2017)
				2B - <i>Inventory Arid Area</i>	18,6 (2017)	75,4 (2017)
				2C - <i>Inventory Wet</i>	55,1 (2007) e 57,1 (2016)	223,1 (2007) e 231,2 (2016)
				2D - Precipitação maior que 1000 mm	35,5 (2017)	143,9 (2017)
	Eq. 6 IPCC (Decaimento)	Cenário 1		I-2	31,5 (2017)	//////////
II-2				20,2 (2017)	//////////	
Eq. 2 IPCC	Cenário 1		I-1	43,3 (2006) e 43,1 (2015)	//////////	
			II-1	50,8 (2006) e 45,3 (2015)	//////////	

A Tabela 12 apresenta, comparativamente, todos os cenários analisados para ambos os modelos, mostrando qual é o modelo utilizado, qual a fonte de dados de resíduos utilizada e quais foram os resultados obtidos para cada um deles.

Antes de analisar todos os cenários apresentados, é importante frisar que o cenário 2, que apresenta um total de 18.399.516 t de resíduos aterrados, foi baseado na regressão de um maior número de dados catalogados, sendo mais atual e tendo, dessa forma, maior nível de confiabilidade que o cenário 1, que apresenta total de 19.292.304 t de resíduos aterrados. Mesmo apresentando quantidade superior de resíduos aterrados, apenas 29% dos anos do cenário 1 apresentam quantidade de resíduos aterrados, em toneladas, maior que o cenário 2.

Os resultados obtidos para o modelo LandGEM se baseiam na situação dos resíduos aterrados e nos parâmetros atribuídos aos modelos. Segundo a EPA (2012), os valores-padrão k e Lo são utilizados para modelar a geração de biogás em aterros sanitários dos EUA, caracterizados pelas condições em que tais parâmetros foram determinados. O modelo pressupõe que o LDRS que está sendo modelado é um aterro sanitário projetado. Dessa forma, a estimativa para locais de despejo não gerenciados – caso do ACJ – em que a composição de resíduos, a cobertura limitada do solo, a pobre compactação dos resíduos e outras condições (i.e., condições climáticas) podem limitar a geração de biogás (EPA, 2012). Além disso, existem pesquisas, em andamento, com a finalidade de obter dados para fatores de emissão em aterros onde há a recirculação de lixiviados e outros líquidos para acelerar a decomposição de resíduos (Alexander, Burklin e Singleton, 2005). Dessa forma, as estimativas desse trabalho consistem em extrapolações.

Os modelos teóricos são passíveis de erros e baseados em adoções de valores da literatura. A exemplo disso, tem-se o fator de oxidação (OX), utilizado na metodologia do IPCC e influenciado pelo potencial oxidante da camada de cobertura. Este é indicado como sendo zero pelo IPCC (2006), caso não seja justificado o uso de outro valor. Isso se deve ao fato de, até hoje, não existir embasamento acerca deste parâmetro. Essa e outras questões fazem com que os modelos sejam limitados para as estimativas das emissões em campo, sendo necessária a adoção de muitos parâmetros e indicação de sua aplicabilidade nas diferentes situações.

O Cenário 1A (*Inventory Conventional*), referente ao modelo LandGEM, apresentou um valor de pico de 31,4 Gg (ou 31420 toneladas) para metano, atingido no ano de 2018. Esse resultado é muito próximo ao valor de pico obtido no Cenário I-2 do IPCC, equivalente a 31,5 Gg, atingido no ano de 2017. Ambos os modelos de decaimento (LandGEM e IPCC) são bastante similares, fazendo com que o uso de parâmetros iguais também culmine em resultados próximos. Tais resultados também se aproximam do valor de pico encontrado no trabalho de Filho (2018), equivalente a 32 Gg de CH_4 atingidos no ano de 2017. O autor utilizou os mesmos parâmetros do *Inventory Conventional* ($k = 0,04 \text{ ano}^{-1}$ e $Lo = 100 \text{ m}^3/\text{t}$) que se referem ao decaimento padrão e uma aproximação dos dados do trabalho de Carneiro (2002) para o levantamento dos resíduos aterrados. Todavia, o período analisado no presente trabalho foi de 1967 a 2018 e, no trabalho do autor, de 1966 a 2016.

O Cenário 2A (LandGEM) apresentou valores de pico mais baixos (29,9 Gg para o metano gerado e 121,4 Gg para o biogás total). Isso se deve ao fato de o cenário 1 apresentar o valor total (em toneladas aterradas) maior que o cenário 2 para o mesmo período analisado.

O ano em que se atinge o valor de pico, no LandGEM, para taxas de geração (k) que não sejam enquadradas como rápidas (Tabela 5 da seção 3.7.1.6), depende do intervalo de tempo pré-determinado pelo usuário. Se considerarmos que, em 2018 (ano da desativação do ACJ), a quantidade de resíduos, utilizada como *input* no LandGEM, foi insignificante, se comparada às quantidades apresentadas em todos os outros anos, o intervalo seria mais próximo de 1967 a 2017. Dessa forma, o valor de pico no trabalho de Filho (2018) é dado 1 (um) ano após o último ano teórico de deposição de resíduos – 2017 – e o mesmo ocorre para os valores de pico dos Cenários 1A e 1B: dados no ano de 2018.

Os Cenários 1B e 2B (*Inventory Arid Area*) apresentaram valores de pico menos expressivos – 19,7 Gg para metano e 79,9 Gg para biogás total para o primeiro e 18,6 Gg de metano e 75,4 Gg de biogás total para o segundo – em comparação com os resultados dos valores de pico de metano e biogás total dos Cenário 1A e 2A (*Inventory Conventional*). Por outro lado, a taxa de geração de 0,02 (*Inventory Arid Area*), permite prolongamento do caldal da curva de decaimento e geração de biogás por um tempo maior.

Condições mais áridas no aterro, bem como resíduos que se degradam mais lentamente (a exemplo da madeira), permitem que a degradação da matéria orgânica, com posterior geração de biogás, ocorra por mais tempo e não “de uma só vez”. Os valores mais baixos, relativos ao subcenário B, também se aproximam do resultado obtido no Cenário II-2 do IPCC, que se deu pelo baixo valor de L_0 médio obtido dos cálculos. O subcenário B se configura como o cenário de mínima geração de metano e biogás e se aplicaria para a situação árida no LDRS.

Os Cenários 1C e 2C (*Inventory Wet*), ao contrário dos demais cenários, apresentaram dois picos de geração bem evidentes. Uma explicação para esse comportamento estaria no fato da geração acontecer de forma mais rápida, traduzindo melhor a situação de deposição de resíduos ao longo dos anos. Isso pode ser comprovado pelo comportamento similar das emissões produzidas pelo modelo do IPCC, baseado na suposição de que todo o metano seria emitido imediatamente no ano em que os resíduos foram dispostos. Essa semelhança de comportamentos pode ser observada nas figuras 38 e 39. Nos anos 2007 e 2016 ocorre uma brusca redução nos resíduos aterrados, dessa forma, a continuidade da curva é interrompida, ocasionando em dois picos de geração em momentos diferentes.

Observa-se que os anos em que os valores de pico foram atingidos coincidiram com os apresentados na Figura 26 da seção 4.1.3.2 (2007 e 2016), que apresentaram menor precipitação anual total em relação aos outros anos no período compreendido entre 2004 a 2018.

O subcenário C se configura como o cenário de máxima geração de metano e biogás e se aplicaria à condição de intensa recirculação de lixiviado no LDRS. Tendo como referência o Anexo A, os cenários 1C e 2C (*Inventory Wet*) possuem o valor do parâmetro “k” mais alto e que mais se distancia das indicações dos autores. Por outro lado, os autores não mencionam a possibilidade de consideração de situações em que há a recirculação de lixiviado dentro do LDRS, fator que possibilitaria aumento no valor referente à taxa de geração e a possibilidade de utilização do valor *default* alto ($k = 0,7$) apresentado no LandGEM. De acordo com análises de campo desenvolvidas pela equipe P&D Raeesa (2019), notou-se afloramento de lixiviado na cota 1130 do ACJ, indicando possível zona saturada e ponto de recirculação do lixiviado proveniente da piscina. Assim, camadas imediatamente acima da zona saturada do ACJ teoricamente apresentariam valores mais altos para a taxa de geração (k).

Os Cenários 1D e 2D foram gerados utilizando o mesmo critério do modelo mexicano, segundo Urrego-Martínez e Rodrigues-Miranda (2016). As diferenças notadas entre o modelo LandGEM (descrito matematicamente pela equação 7 da seção 3.7.3) e o modelo mexicano (mostrado na equação 10 da seção 3.7.4), para o presente trabalho, são a de que o primeiro mostra a geração apenas de metano (também aceita o uso de meses ou ano decimal), enquanto o segundo, multiplicado pelo fator 2 (que considera 50% do metano no biogás) determina a geração de biogás total em sua formulação. Todavia, os parâmetros k e L_0 para os dois modelos são dados nas mesmas unidades. Dessa forma, foram usados, da maneira como são indicados, para compor o subcenário D. O valor de k igual a $0,08 \text{ ano}^{-1}$, utilizado nesse cenário, pode ser adequado a situações de LDRS que receba muitos resíduos, compostos principalmente por restos de alimentos, que se degradam de forma mais rápida.

O subcenário D apresentou valores mais altos que os subcenários A e B. Isso indica que o aumento na taxa de geração (k), não só influencia a velocidade dos processos, como também influencia a magnitude dos resultados. O potencial de geração (L_0) é diretamente proporcional à quantidade de metano produzida. Dessa forma, é possível dizer que os parâmetros k e L_0 têm influência conjunta sobre os resultados. Com a mudança dos parâmetros, obteve-se 36,7 Gg para o pico de geração de metano e 148,4 Gg para o de biogás (relativos ao cenário 1D) e 35,5 Gg de metano e 143,9 Gg de biogás (relativos ao cenário 2D).

O Cenário II-1 do IPCC (valores de COD discretizados apresentados no Anexo G) apresentou grande parte dos resultados de emissão mais altos que o Cenário I-1 (cujo COD foi calculado com base nos Anexos E, F e G de composição gravimétrica). Tendo em vista que o COD calculado para 77 foi admitido para os anos seguintes, até 2000, pode-se inferir que esse valor foi subestimado para os anos que se seguem. O valor máximo alcançado no Cenário II-1 foi de 50,8 Gg *versus* 43,3 Gg de metano estimados para o Cenário I-1. Dessa forma, o Cenário II-1 se demonstra mais adequado nos critérios de representatividade do carbono orgânico degradável (COD) para as mudanças da composição gravimétrica que aconteceram com o passar do tempo. Mesmo assim, os resultados provenientes da Equação 2 do IPCC, ainda sim, são uma superestimação do valor real, principalmente, por não considerar as parcelas relativas ao decaimento. Isso é comprovado pelos resultados mais baixos do modelo de decaimento do IPCC, iguais a 31,5 Gg (Cenário I-2) e 20,2 Gg (Cenário II-2) para o valor de pico de metano.

Através do Anexo H, observa-se que o dia 09/04 foi o que apresentou os valores mais baixos para a concentração de metano no biogás e, conseqüentemente, provocou a menor média para o percentual de CH₄. Também é possível observar que dia 09/04, dentre os três dias amostrados (04/04, 08/04 e 09/04), apresentou maior valor de lâmina d'água para precipitação. Se comparado a todo o mês de abril, esse valor não foi alto, mas é possível supor que esse dia possa ter tido mais interferência das condições meteorológicas, dado que a umidade anterior à precipitação e a própria precipitação, podem afetar a geração do biogás, aumentando a saturação dentro do maciço do LDRS e a lavagem e eliminação de carbono orgânico respectivamente.

Foram feitas estimativas do fluxo por área de contribuição, através do resultado da interpolação apresentado na Figura 47, resultando em um valor médio de 0,0185 m³/h.m². Através desse resultado, foi possível fazer uma extrapolação da geração de biogás no ACJ. Como resultado para a estimativa de geração anual, dentro do limite do ACJ, encontrou-se um valor aproximado de 323325846,54 m³/ano. Utilizando a densidade do biogás total (LFG), deduzida da ferramenta LandGEM (equivalente a 0,0012 t/m³), obtém-se 387991 t/ano de biogás. O valor de 215706,84 t/ano, atingido para a situação ideal em que 100% do fluxo medido seria composta por CH₄, têm magnitude próxima aos cenários 1C e 2C (*Inventory Wet*) para emissão de biogás total.

A delimitação da área, ao redor dos 8 (oito) queimadores amostrados, não representa as condições reais da área de influência do fluxo de gás em cada queimador. Entretanto, esta é a estimativa que, com os dados obtidos, reflete o resultado que mais se aproximaria da emissão para a área real do ACJ. Infere-se que o valor real de fluxo (m³/ano) seria inferior ao estimado,

pois a área delimitada para a interpolação não reflete a real dinâmica da emissão de gases ao longo do LDRS, não bastando, dessa forma, multiplicar o valor de fluxo/área encontrado para um limite pequeno para toda a extensão do ACJ.

Ao longo deste trabalho, foi mostrado que a fração de metano geralmente varia na faixa de 40 a 60% no biogás. Do teste de validação da interpolação feita para os pontos com medições de concentração de metano do biogás, obteve-se como resultado a Figura 49. Pode-se discutir que, o único ponto que se encontra dentro do intervalo representativo de seu valor amostrado, está rodeado por um maior número de pontos conhecidos (utilizados na interpolação) e o mesmo se diz daqueles que se encontram em intervalos próximos ao seu valor real. Quanto mais pontos conhecidos ao redor do ponto de validação, maiores são as chances de previsão e acerto do intervalo de possíveis resultados para aquele ponto.

7. CONCLUSÃO

Nesse trabalho, fez-se o levantamento qualitativo e quantitativo de dados dos resíduos no ACJ, executou-se o mapeamento dos queimadores existentes no ACJ e a geração de dados de coordenadas através do *software* ArcGIS. Foi feita uma análise comparativa entre cenários de emissão para os modelos de decaimento LandGEM e IPCC, através da variação dos parâmetros k e L_0 . Também foi feito o uso da equação do IPCC, que considera que toda a geração de metano aconteça no ano de deposição do resíduo, com a variação na forma de obtenção do COD. Em relação aos resultados empíricos, gerou-se mapas de interpolação de fluxo de biogás, por meio de dados de 8 (oito) queimadores, e concentração percentual de metano (CH_4) no biogás, por meio de dados de 48 (quarenta e oito) queimadores, obtidos nas medições *in situ* realizadas nos queimadores existentes no ACJ com auxílio de equipamento adquirido. Estimou-se uma emissão anual aproximada para o ACJ. Por fim, foi feito um teste de validação para a interpolação de pontos com dados de concentração de CH_4 .

Os resultados obtidos em relação a todos os cenários analisados para ambos os modelos, variam em um intervalo 18,6 Gg/ano (mínimo) a 57,1 Gg/ano (máximo) de metano e, em relação ao biogás total, de 75,4 Gg/ano (mínimo) a 231,2 Gg/ano (máximo) para o período de 1967 a 2018.

A utilização de cenários, para a estimativa de metano e biogás produzido, é insuficiente para indicar quais dos parâmetros são os mais adequados para as condições reais do ACJ. Os modelos LFG (*Landfill Gas Formation*) se mostram limitados para descrever a variedade de

processos advindos de uma disposição final de resíduos, que teve início de forma não planejada, em meados de 60, atingindo uma área imprevisível de aproximadamente 2 km².

Os modelos de decaimento de primeira ordem, do LandGEM (EPA) e do IPCC, são baseados principalmente nos parâmetros k e L_0 . A taxa de geração de biogás (k) está associada à velocidade com que os resíduos vão se degradar completamente ou vão ter grande parte de sua porção orgânica convertida em biogás. Taxas de geração mais baixas, como $k = 0,02 \text{ ano}^{-1}$, permitem prolongamento do caldal da curva geração de biogás por um tempo maior, associadas a condições áridas no aterro. Por outro lado, taxas de geração mais altas, como $k = 0,7 \text{ ano}^{-1}$, normalmente provocam a degradação da maior parte dos resíduos, em grande quantidade, nos próprios anos de deposição. Essas taxas normalmente estão associadas à recirculação de lixiviado no maciço do LDRS com a finalidade de aumento substancial da umidade. O potencial de geração (L_0) está diretamente relacionado à quantidade de geração de gás gerado.

É possível atestar que os modelos teóricos preveem a geração de biogás para períodos futuros, enquanto a interpolação, dos dados medidos em campo, estima a geração atual de biogás para regiões adjacentes desconhecidas. Os próprios resultados empíricos, obtidos das medições *in situ*, já não representam a mesma dinâmica interna daqueles medidos em outros dias, como pode ser observado pelos dados obtidos no último dia de medição. Mesmo os resultados obtidos, no mesmo dia, apresentam diferenças que se relacionam à variabilidade espacial ao longo do ACJ. Isso se deve ao fato do biogás ser influenciado por inúmeros fatores que vão desde as condições climáticas e metereológicas até o grau de gerenciamento do LDRS.

Obteve-se $0,0185 \text{ m}^3/\text{h m}^2$ para fluxo médio por área, através do resultado da interpolação de fluxo. Como resultado para a estimativa anual, dentro do limite do ACJ, encontrou-se um valor aproximado de 323 milhões de metros cúbicos por ano. Em toneladas, tem-se 387991 t/ano de biogás, utilizando a densidade do biogás total (LFG) equivalente a $0,0012 \text{ t/m}^3$ – deduzida da ferramenta LandGEM para a conversão das unidades internas. Para a validação dos dados de concentração de metano, percebeu-se que quanto maior for o número de pontos conhecidos ao redor dos pontos de validação, maiores são as chances de previsão e acerto do provável valor real.

Toda estimativa efetuada não terá tamanha significância caso feita em local onde não há aproveitamento energético do biogás. O fato do ACJ não ser um aterro sanitário inviabiliza a captação e o aproveitamento do biogás por meio de sistemas de drenagem, pois se trata de uma

área instável, de produção descentralizada de bolsões de biogás e lixiviado. Ainda sim, atividades como a extração do biogás remanescente, através de drenos/manilhas superficiais (dado que a instalação de drenos profundos, condição ideal, é de enorme risco) e o uso do metano, devidamente tratado para posterior utilização como gás de cozinha, seria uma alternativa, a curto prazo, para o auxílio de algumas famílias e redução de sua emissão na atmosfera. Os queimadores no ACJ precisam existir e estar em funcionamento para que o metano possa ser devidamente drenado, evitando risco de vazamentos e explosões e queimado, para a redução de seu potencial poluidor. Nada impede que pesquisadores se reúnam para estudar alternativas *Waste to Energy* (WtE) para o Aterro Controlado do Jóquei de Brasília/DF.

8. POSSÍVEIS TRABALHOS FUTUROS

- 1) Validação dos Dados de Fluxo por Meio de Queimadores Amostrados: Não foi possível fazer o teste de validação, feito para a interpolação com os dados de concentração de metano, pela pouca quantidade de dados de fluxo. Através de mais medições *in situ*, será possível utilizar queimadores espalhados para a interpolação e o restante para a validação dos resultados obtidos por meio da interpolação.
- 2) Validação dos Dados de Fluxo por Meio de Placas de Fluxo: Os dados de fluxo obtidos nos queimadores também podem ser validados através da medição feita por meio de placas de fluxo entre os queimadores amostrados para a avaliação de emissões fugitivas.
- 3) Ensaio BMP: A realização de ensaios de potencial bioquímico de metano em laboratório é importante para a determinação de L_0 . Na existência de resultados obtidos em campo, a realização das estimativas pelos modelos pode ser feita especificamente para o LDRS de estudo. Muitos autores utilizam parâmetros padronizados pela ausência de informações obtidas através das análises de campo.
- 4) Realização de Cromatografia Bidimensional Gasosa (GC x GC): Que identifica percentualmente a presença de um número grande de gases existentes na composição do biogás de aterro e já se mostrou ser mais precisa que a cromatografia gasosa comum.
- 5) Mapeamento de emissões de CH_4 através da técnica de interpolação de dados, utilizando o software *Surfer*® 8, como foi feito pelos autores Mariano e Jucá (2010).

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1992). **NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**. ABNT.

ABRELPE. (2013). **Atlas Brasileiro de Emissões de GEE e Potencial Energético na Destinação de Resíduos Sólidos, 172**. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/arquivos/atlas_portugues_2013.pdf>. Acessado em 8 de setembro de 2018.

ABREU, Fábio Viana. (2009). **Análise de Viabilidade Técnica e Econômica para Geração da Energia Através do Biogás de Lixo em Aterros Sanitários**. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

ALCÂNTARA, P. B. (2007). **Avaliação da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife.

ALEXANDER, A., Burklin, C. E., & Singleton, A. (2005). **Landfill gas emissions model (LandGEM) version 3.02 user's guide**. US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development.

ALVES, J. W. S. (2000). **Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos**. 2000. 165f. Dissertação de Mestrado em Energia. Universidade de São Paulo (USP), São Paulo.

ANP. (2018). Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Gás Natural**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/gas-natural>>. Acessado em 4 de setembro de 2018.

ARAÚJO, T. T., & Ritter, E. (2016). **Avaliação De Emissões De Biogás Em Camadas De Cobertura De Um Aterro Sanitário**. *Exatas & Engenharia*, 6(16).

ARCADIS Tetraplan. (2010). **Estudo sobre o Potencial de Geração de Energia a partir de Resíduos de Saneamento (lixo, esgoto), visando incrementar o uso de biogás como fonte alternativa de energia renovável**. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/164/_publicacao/164_publicacao10012011033201.pdf>. Acesso em 15 jun.2012.

ASSIS, L. (2009). **Estimativa da Produção De Biogás Pelo Lixo Urbano De Corumbá, Ladário-Brasil, Puerto Quijarro e Arroyo Concepción-Bolívia**. Dissertação de mestrado em Estudos Fronteiriços. UFMS. Corumbá, 2009.

AZEVEDO, J. L. (2015). **A Economia Circular Aplicada no Brasil: uma análise a partir dos instrumentos legais existentes para a logística reversa**. In Anais... Congresso Nacional de Excelência em Gestão (Vol. 11).

BADUREK C. A. (2018). **Biogas**. Encyclopædia Britannica, Inc. Britannica Academic.

BARBOSA, A. M., & Coutinho, R. G. (2011). **Os tipos de ligações químicas do ponto de vista energético e estrutural**. Rede São Paulo de Formação Docente: Cursos de Especialização para o quadro do Magistério da SEESP Ensino Fundamental II e Ensino Médio. *São Paulo: Unesp/Redefor*.

BEZERRA, J. D. S., Cavalcante, R. S., Claudino, G. O., Figueiredo, B. L., Jaco, R. O. (2015). **Estimativa Teórica da Produção de Biogás no Aterro Controlado de Quixadá – CE**. Congresso Científico de Engenharia e da Agronomia CONTECC. Fortaleza, CE.

BORBA, S. M. P. (2006). **Análise de modelos de geração de gases em aterros sanitários: estudo de caso**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Rio de Janeiro. 134 p. UFRJ-Universidade Federal do Rio de Janeiro.

BRASIL. (2016). **Instrução Normativa nº 89 de 23 de setembro de 2016**. Regulamenta procedimentos no âmbito do SLU do DF e dispõe sobre as normas a serem observadas pelos grandes geradores de resíduos sólidos e prestadores de serviços de transporte e coleta, bem como pelos responsáveis pela realização de eventos em áreas, vias e logradouros públicos. SINJ-DF. Brasília, 23 set. 2016. Seção 2, Art. 21. Disponível em: <http://www.tc.df.gov.br/sinj/Norma/efcbf09c15af42ab92c0d5d26241bbe9/Instru_o_Normativa_89_23_09_2016.html>. Acesso em: 10 de outubro de 2018.

BRASIL. (2010). **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS. Altera a lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em: 9 de outubro de 2018.

BRASIL (2017). **Decreto N° 9.082, de 26 de junho de 2017**. Institui o Fórum Brasileiro de Mudança do Clima. Presidência da República. Casa Civil. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/decreto/d9082.htm>. Acesso em: 15 de novembro de 2018.

BRITTO, M. (2006). **Taxa de emissão de biogás e parâmetros de biodegradação de resíduos sólidos urbanos no Aterro Metropolitano Centro**. 185 p. Dissertação de Mestrado Profissional em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo. Departamento de Engenharia Ambiental. UFBA, Salvador.

CANDIANI, G., de Freitas, F. S. N., & Silva, T. N. (2013). **Avaliação das emissões superficiais do gás de aterros sanitários de grande porte**. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 95-104.

CANDIANI, G.; VIANA, E. (2017). Emissões fugitivas de metano em aterros sanitários. **Geosp – Espaço e Tempo** (Online), v. 21, n. 3, p. 845-857, dez. 2017. ISSN 2179-0892.

CARDOSO, M. R. D., Marcuzzo, F. F. N., & Barros, J. R. (2015). **Classificação climática de Köppen-Geiger para o Estado de Goiás e o Distrito Federal**. *Acta Geográfica*, 8(16), 40-55.

CARNEIRO, C. D. R. & da Silva, F. G. (2012). **Geotecnologias como recurso didático no ensino de geografia: experiência com o Google Earth**. *Caminhos de Geografia*, 13(41).

CAVALCANTI, M. M. (2013). **Aplicação de métodos geométricos no delineamento da pluma de contaminação nos limites do Aterro Controlado do Jokey Clube de Brasília – DF**. 2013. 111p. Dissertação de Mestrado – instituto de Geociências, Geofísica Aplicada, Universidade de Brasília – UnB. Brasília, DF. 2013.

CETESB (2006). **Biogás: Projetos e Pesquisas no Brasil**. Secretaria do Meio Ambiente. São Paulo: SMA, 2006.

COELHO, S. T., Velázquez, S. M. S. G., & Silva, O. C. D. (2004). **Programa de uso racional de energia e fontes alternativas: PUREFA**. *Proceedings of the 5th Encontro de Energia no Meio Rural*.

COELHO, S. T., Velázquez, S. M. S. G., & Silva, O. C. D. (2006). **Geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de esgoto**. *Proceedings of the 6. Encontro de Energia no Meio Rural*.

COLTRO, L., Mourad, A. L., Garcia, E. E. C., Queiroz, G. C., Gatti, J. B., & Jaime, S. B. M. (2007). **Avaliação do ciclo de vida como instrumento de gestão**. *Campinas: Cetea/Ital*, 75.

COOPS, O., Luning, L., Oonk, H., Weenk, A. (1995). **Validation of Landfill Gas Formation Models**. In: Proceedings from Sardinia 95, Fifth International Landfill Symposium, CISA, S. Margherita di Paula, Calgiari, Italy, 2–6 October 1995.

DE LIMA Bezerra, M. D. C. (2013). **Oportunidades do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo para solução do Destino Final de Resíduos Sólidos Urbanos – O caso do Distrito Federal**. Paranoá: cadernos de arquitetura e urbanismo.

DESSLER, A. (2015). *Introduction to modern climate change*. Cambridge University Press.

DI TRAPANI, D., D., Di Bella, G., & Viviani, G. (2011). **Evaluation of methane emissions from Palermo municipal landfill: Comparison between field measurements and models**. *Waste management*, 31(8), 1820-1826.

DI TRAPANI, D., Mannina, G., Nicosia, S., & Viviani, G. (2018). **Biogas from municipal solid waste landfills: a simplified mathematical model**. *Water Science and Technology*, 77(10), 2426-2435.

DINIZ, M.S; Nisiyama, F. L.; Battaglini, N. M. C. L. G; Camargo, F. R. T; Lacerda, G. V.C; Fleury, F. B. C.; Silva, L. S.; Silva Jr, E. E. A; Cavalcante, A.L.B. (2019). **Estudo da Acurácia Posicional de Dados Geoespaciais Obtidos com RPA Mediante a Metodologia Proposta para Verificação do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC)**. In: ANAIS DO XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2019, Santos. Anais eletrônicos... Campinas, GALOÁ, 2019. Disponível em: <<https://proceedings.science/sbsr-2019/papers/estudo-da-acuracia-posicional-de-dados-geoespaciais-obtidos-com-rpa-mediante-a-metodologia-proposta-para-verificacao-do->> Acesso em: 07 jun. 2019.

DINIZ, M. S. (2019, *In Press*). Modelagem Regional do Fluxo de Contaminantes Inorgânicos sob as Condições Não Saturada e Transiente aplicada ao Aterro Controlado do Jóquei Clube

(ACJC). Dissertação de Mestrado submetida ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília.

EIA (2018). Energy and the Environment Explained. **Greenhouse Gases**. Disponível em: <https://www.eia.gov/energyexplained/index.php?page=environment_about_ghg>. Acesso em 13 de outubro de 2018.

EPA (1995). **Compilation of Air Pollutant Emission Factors (AP-42), Volume 1: Stationary Point and Area Sources, 5th ed., Chapter 2.4: Municipal Solid Waste Landfills**. EPA, Office of Air Quality Planning and Standards. Research Triangle Park, NC.

EPA (2012). **International Best Practices Guide for LFGE Projects**. Global Methane Initiative. 89p.

EPA (2017¹). United States Environmental Protection Agency. **Learn About Biogas Recovery**. Disponível em: <<https://www.epa.gov/agstar/learn-about-biogas-recovery>>. Acesso em 16 de novembro de 2018.

EPA (2017). United States Environmental Protection Agency. **LFG Energy Project Development Handbook**. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-11/documents/pdh_full.pdf>. Acesso em 6 de setembro de 2018.

ESRI. (2006). 9, **What is ArcGIS 9.2**. Redlands, California, EUA.

ESRI (2019). **ArcGis Pro. Data Classification Methods**. Disponível em: <<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/help/mapping/layer-properties/data-classification-methods.htm>> Acesso em 24 de junho de 2019.

FEI, X., Zekkos, D., & Raskin, L. (2016). **Quantification of parameters influencing methane generation due to biodegradation of municipal solid waste in landfills and laboratory experiments**. *Waste management*, 55, 276-287.

FELIPETTO, A. V. M. Conceito, planejamento e oportunidades. Rio de Janeiro: IBAM. (2007).

GELLERT Paris, A., & Satoshi Miyamaru Seo, E. (2007). **Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL): percepção de um segmento de empresas brasileiras**. Revista Ibero Americana de Estratégia, 6.

FILHO, A. M. (2018). **Hibridização de gás confinado em depósitos de resíduo sólido urbano com heliotérmica para geração de energia – o caso do Lixão da Estrutural no DF.** Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Publicação ENM.DM - 272/2018, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 105p.

FLORENZANO, T. G. (2007). **Iniciação em sensoriamento remoto.** Oficina de Textos.

FORSTER, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Berntsen, T., Betts, R., Fahey, D. W... & Nganga, J. (2007). **Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing.** Chapter 2. In *Climate Change 2007. The Physical Science Basis.*

GANDARA, R., Liguori, F. A., Casazza, F., Rodegher, M. G., Maisonnave, P. P., & Bermann, C. (2015). **C. Aproveitamento energético do hidrato de metano.** *10º Congresso sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural.*

GAS Encyclopedia (2019). **CH₄ Properties.** By Air Liquide. Creative Oxigen. Disponível em: <<https://encyclopedia.airliquide.com/methane?GasID=41#>>. Acesso em 14 de junho de 2019.

GENOVESE, A. L., Udaeta, M. E. M., & Galvao, L. C. R. (2006). **Aspectos energéticos da biomassa como recurso no Brasil e no mundo.** *Proceedings of the 6. Encontro de Energia no Meio Rural.*

GELLERT Paris, A., & Satoshi Miyamaru Seo, E. (2007). **Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL): percepção de um segmento de empresas brasileiras.** *Revista Ibero Americana de Estratégia, 6(2).*

GIMENES, E. e Hising, E. G1 PR (2017). CETESB. **Aterros sanitários, aterros controlados e lixões: entenda o destino do lixo no Paraná.** Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/biogas/2017/08/01/aterros-sanitarios-aterros-controlados-e-lixoes-entenda-o-destino-do-lixo-no-parana/>>. Acesso em 22 de setembro de 2018.

HILAIRE, F., Basset, E., Bayard, R.,... & Vial, J. (2017). **Comprehensive two-dimensional gas chromatography for biogas and biomethane analysis.** *Journal of Chromatography. A, 1524, 222-232.* <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2017.09.071>.

SLU-IBRAM (1978). **As Características Físicas e Químicas do Lixo no Distrito Federal**. Amorim, V.; Aguiar, M. Gerência de Programação e Organização do Serviço Autônomo de Limpeza Urbana - DF. 31p.

ICLEI (2009). Governos Locais pela Sustentabilidade. **Manual para Aproveitamento do Biogás: Volume 1 - Aterros Sanitários**. Secretariado para América Latina e Caribe, Escritório de projetos no Brasil, São Paulo, 2009.

IEE USP (2010). Instituto de Energia e Ambiente Universidade de São Paulo. **Produção Municipal de Metano a partir de Biogás do Aterro – Metodologia IPCC/CETESB**. Disponível em: <http://143.107.4.241/download/tabelasbiomassa/metano_aterro.pdf>. Acesso em 3 de setembro de 2018.

INMET (2019). **Séries Históricas**. Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP). Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em 24 de junho de 2019.

IPCC (1995). **Second Assessment Climate Change**. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *United Nations Environment Programme*.

IPCC (2006). Pipatti, R., Svardal, P., Alves, J. W. S., Gao, Q., Cabrera, C. L., Mareckova, K., Oonk, H., Scheehle, E., Sharma, C., Smith, A. Yamada, M. **Solid Waste Disposal**. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Chapter 3.

JAKOB, A. A. E.; Young, A. F. (2016). **O uso de métodos de interpolação espacial de dados nas análises sociodemográficas**. Anais, p. 1-22, 2016.

JOHNSTON, K., Ver Hoef, J. M., Krivoruchko, K., & Lucas, N. (2001). *Using ArcGIS geostatistical analyst (Vol. 380)*. Redlands: Esri.

JUCÁ, J. F. T., Maciel, F. J. & Neto, A. C. (2011). **Avaliação do Projeto Piloto de Recuperação do Biogás no Aterro da Muribeca/PE**. In VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, Anais, Fortaleza, Ce (p. 1).

KALANTARIFARD, A., & Yang, G. S. (2012). **Estimation of methane production by LANDGEM simulation model from Tanjung Langsat municipal solid waste landfill, Malaysia**. *International Journal of Science and Technology*, 1(9), 481-487.

KAWAKUBO, F. S. (...). **Teoria e Método em Geoprocessamento**. Disciplina. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3338001/mod_resource/content/1/TMG_4.pdf> Acesso em: 18 de novembro de 2018.

LANDO, A. T., Nakayama, H., & Shimaoka, T. (2017). **Application of portable gas detector in point and scanning method to estimate spatial distribution of methane emission in landfill**. *Waste management*, 59, 255-266.

LANDTEC (2019). **GEM5000 Operating Manual - Geotech Environmental Equipment**. QED Environmental Systems, Inc. 2355 Bishop Circle West. *Website*: www.landtecnica.com.

LIMA, R. M. et al. Spatially distributed potential of landfill biogas production and electric power generation in Brazil. **Waste Management**, v. 74, p. 323–334, 2018.

LUDWIG, V. **User 's Manual Central America Landfill Gas Model**. n. March, 2007.

MACIEL, F. J. (2003). **Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca/PE**.

ADASA (2018). **Manual da drenagem e manejo de águas pluviais urbanas do Distrito Federal**. Editores: Luiz Fernando Orsini Yazaki, Marcos Helano Fernandes Montenegro, Jeferson da Costa. - Brasília, DF: Adasa, Unesco. 2018. 329 p.: il.

MACEDO, M. B. P. & Lemos, M. (2019, *In Press*). **Abordagens *in situ* para o Estudo do Potencial de Geração de Biogás: Modelos do tipo WtE pautados na utilização de ensaios em campo e em diferentes metodologias**. Documentação interna do Projeto RAEESA.

MARIANO, M. O. H., Jucá, J. F. T. (2010). **Ensaio de campo para determinação de emissões de biogás em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos**. Engenharia Sanitária Ambiental, Rio de Janeiro, v. 15, n. 3, p. 223-228, 2010.

MEEROFF, D. E., & Sethi, R. (2018). **DRAFT: Beneficial Reuse Solutions for Landfill Operations and Management Final Report**. Relatório.

MMA. (2011). **Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Versão Preliminar para Consulta Pública**. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/253/_publicacao/253_publicacao02022012041757.pdf>. Acesso em: 21 de outubro de 2018.

MMA (2018). **Efeito Estufa e Aquecimento Global**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/informma/item/195-efeito-estufa-e-aquecimento-global>>. Acesso em 13 de outubro de 2018.

MCTI (2013). **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. São Paulo.

MCTI (2006). **Primeiro inventário brasileiro de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa**. São Paulo - SP.

MOREIRA, J. C. & Sisino, C. L. (1996). **Avaliação da contaminação e poluição ambiental na área de influência do aterro controlado do Morro do Céu, Niterói, Brasil**. *Cadernos de Saúde Pública*, 12, 515-523.

NECKER, H. S., & da Rosa, A. L. D. (2013). **Estimativa teórica da geração de biogás do futuro aterro sanitário de Ji-Paraná-RO**. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, 17(17), 3416-3424.

NISYAMA, F. L. (2019). **Ferramenta Computacional para Avaliação de Risco a Saúde Humana em Áreas Contaminadas - Caso de Estudo: Aterro Controlado do Jôquei Clube de Brasília/DF**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Publicação G.DM 328/2019, Universidade de Brasília, Brasília, 202p.

OLIVEIRA, A. D., & Ramalho, J. (2006). **Plano Nacional de Agroenergia: 2006-2011**. rev. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica.

OONK, H., & Boom, T. (1995). **Validation of landfill gas formation models**. In *Studies in Environmental Science* (Vol. 65, pp. 597-602). Elsevier.

PALMISANO, A. C., & Barlaz, M. A. (1996). **Microbiology of solid waste (Vol. 3)**. CRC Press.

PAUSTIAN, K.; Ravindranath, N.; Amstel, A. van. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. [S.l.], 2006.

PEDOTT, J. G. J., & Aguiar, A. O. (2014). **Biogás Em Aterros Sanitários: Comparando a Geração Estimada Com a Quantidade Validada Em Projetos De Mecanismo De Desenvolvimento Limpo**. *HOLOS*, 4, 195-211.

- PEER, R. L., Thorneloe, S. A., & Epperson, D. L. (1993). **A comparison of methods for estimating global methane emissions from landfills**. *Chemosphere*, 26(1-4), 387-400.
- PEREIRA, R. R. (2015). **O lixão de Brasília**. *Retrato do Brasil*. Ed, 98.
- PEREIRA, I. O., Santos, I. F. S., & Santos, R. E. (2018). **Estudo Energético e Econômico do Aproveitamento do Biogás de um Aterro Sanitário em uma Turbina a Gás de 5, 4 MW**. *Engevista*, 20(4), 523-536.
- PIÑAS, J. A. V., Venturini, O. J., Lora, E. E. S., Oliveira, M. A. D., & Roalcaba, O. D. C. (2016). **Aterros sanitários para geração de energia elétrica a partir da produção de biogás no Brasil: comparação dos modelos LandGEM (EPA) e Biogás (Cetesb)**. *Revista Brasileira de Estudos de População*, 33(1), 175-188.
- PIPATTI, R., Sharma, C., Yamada, M., Alves, J. W. S., Gao, Q., Guendehou, G. H. S., ... & Scheehle, E. (2006). **Waste generation, composition and management data**. *Eggleston, S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K.(Eds.)*. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- PROGEA. (2005). **Plano de encerramento do Aterro Controlado do Jóquei**. Belacap. 2005.
- REGATTIERI, C. R. (2009). **Quantificação da emissão de biogás em aterro sanitário: estudo de caso do aterro sanitário de São Carlos**. (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).
- RIBEIRO, R. J. (2006). **Simulação de espectros de absorção para determinação de temperaturas em chamas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Combustão e Propulsão). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Ca São José dos Campos: INPE. 144p. (INPE-14660-TDI/1216).
- RODRIGUES, R. P., Rodrigues, D. P., Klepacz-Smolka, A., Martins, R. C., & Quina, M. J. (2018). **Comparative analysis of methods and models for predicting biochemical methane potential of various organic substrates**. *Science of the Total Environment*. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.08.270

ROMANEL, C., & Santos, M. M., van Elk, A. G. H. P. (2017). **Análise da eficiência de modelos de decaimento de primeira ordem na previsão da emissão de gás de efeito estufa em aterros sanitários brasileiros.** *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 22(6).

SALGADO, G. S. M. (2016). Ano 2, n. 9, ago. 2016. **Análise da situação atual do lixão da Estrutural.** *Textos para discussão/Assessoria Legislativa da Câmara Legislativa do Distrito Federal*, 2(9).

SANTOS, Á. C., Machado, S. L., de Fátima Carvalho, M., & do Nascimento, J. C. F (2012). **Estimativa da geração de metano em aterro sanitário utilizando a composição de Resíduos Sólidos Urbanos e ensaios de BMP.** Centro de ciências exatas e tecnologias/UFRB, Cruz das Almas, Bahia, Brasil.

SANTOS, I. F., Barros, R. N., Filho, G. L. T. (2015). **Uma avaliação energética, econômica e ambiental das opções de aproveitamento energético do biogás de um aterro sanitário no Brasil.** *Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas – UFSM Santa Maria Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental e-ISSN 2236 1170 - V. 19, n.21, mai-ago. 2015, p. 1344-1356*

SILVA, S. D. A., Souza Lima, J. S. D., Souza, G. S. D., & Oliveira, R. B. D. (2008). **Avaliação de interpoladores estatísticos e determinísticos na estimativa de atributos do solo em agricultura de precisão.** *Idesia (Arica)*, 26(2), 75-81.

SLU (2013). Machado, A. L. Conselheira Relatora. **Auditoria Operacional no Serviço de Limpeza Urbana do Distrito Federal.** Sumário Executivo.

SLU (2015). **Relatório da Análise Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos no Distrito Federal.** Serviço de Limpeza Urbana – 2015.

SLU (2016). **Construindo um novo modelo de gestão dos resíduos sólidos no DF.** Relatório de Atividades do SLU – 2016.

SLU (2017). **Um ano de operação do Aterro Sanitário e tudo pronto para fechar o lixão.** Relatório de Atividades do SLU – 2017.

SLU (2018). **Lixão fechado e URE em operação.** Relatório de Atividades do SLU – 1º Trimestre de 2018.

SLU (2019). **Despacho SEI-GDF**. Assinado eletronicamente por Cecilia de Faria Sampaio em 20/02/2019, conforme Art. 6º do Decreto no 36.756. Disponível em: <https://sei.df.gov.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&acao_origem=documento_conferir&lang=pt_BR&id_orgao_acesso_externo=0>. Acesso em: março de 2019.

SUN, Y., Yue, D., Li, R., Yang, T., & Liu, S. (2015). **Assessing the performance of gas collection systems in select Chinese landfills according to the LandGEM model: drawbacks and potential direction**. *Environmental technology*, 36(23), 2912-2918.

TANDA, G., Migliazzi, M., Chiarabini, V., & Cinquetti, P. (2017, January). **Application of close-range aerial infrared thermography to detect landfill gas emissions: a case study**. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 796, No. 1, p. 012016). IOP Publishing.

TAPAHUASCO, W. F. C. (2009). **Análise do comportamento de maciços sanitários e proposta de um modelo de previsão de recalques considerando a parcela da biodegradação**.

TARAZONA, C. F. (2010). **Estimativa de produção de gás em aterros de resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro.

TCHOBANOGLIOUS, G., Thessen, H., & Vigil, S. A. (1994). **Composicion y características, generacion, movimiento y control de los gases de vertedoro**. *Gestión integral de residuos sólidos, 1*.

TCHOBANOGLIOUS, G., Theisen, H., & Vigil, S. A. (1993). **Integrated solid waste management: engineering principles and management issues**. New York, New York, USA.

THEMELIS, N. J., & Ulloa, P. A. (2007). **Methane generation in landfills**. *Renewable Energy*, 32(7), 1243-1257.

THOMAS, D., & DELVAL, P. (1987). **Utilisation du biogaz dans les moteurs thermiques**. *Informations chimie*, (283), 147-149.

UNFCCC. (2018). United Nations, Framework Convention on Climate Change. **Large-scale consolidated methodology. Flaring or use of landfill gas**. Version 18.0. Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/methodologies/index.html> >. Acesso em: 06 de novembro de 2018.

URREGO-Martínez E, Rodríguez-Miranda JP (2016). **Aplicación de las metodologías EPA, mexicano e IPCC para la estimación de biogás, caso de estudio relleno sanitario doña Juana**, Bogotá-Colombia. *Rev Univ. Salud.* 2016;18(2):338-344.

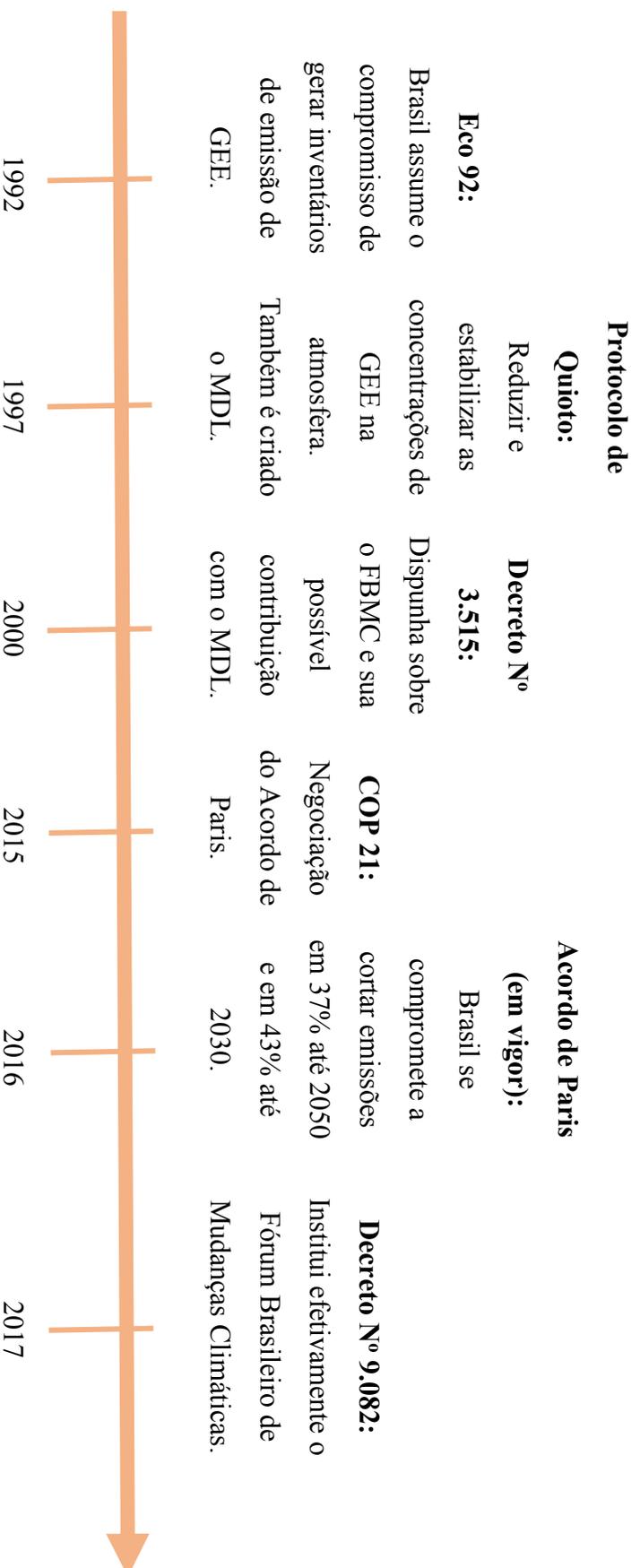
VALOR AMBIENTAL (2019). **Marcos Superficiais do Mapa de Queimadores**. Disponibilizado, como documento interno, para auxiliar o Projeto RAEESA.

VINDIS, P., Mursec, B., Janzekovic, M., & Cus, F. (2009). **The impact of mesophilic and thermophilic anaerobic digestion on biogas production**. *Journal of achievements in materials and manufacturing Engineering*, 36(2), 192-198.

ZULAUF, M. (2004). **Geração com biogás de aterros de lixo**. *O Brasil Quer Energias Renováveis*, 36.

APÊNDICES

APÊNDICE A: LINHA DO TEMPO DO CONTEXTO INTERNACIONAL



(Fluxograma construído a partir da consulta às obras de Alves, 2000; De Lima Bezerra, 2013; ICLEI, 2009; Romanel, Santos e van Elk, 2018; Assis, 2009 e Decreto Nº 9.082, 2017).

APÊNDICE B: RESULTADOS DAS GEÓGRAFICAS PARA OS QUEIMADORES DO ACJ NA ZONA 22S

FID	Planialtimétricas		Degrees, Minutes, Seconds (DMS)	
	Longitude	Latitude	Longitude	Latitude
0	821424.49	8254647	48° 0' 1.577"" W	15° 45' 58.041"" S
1	821410.3	8254714.1	48° 0' 2.086"" W	15° 45' 55.865"" S
2	821384.61	8254684.3	48° 0' 2.934"" W	15° 45' 56.847"" S
3	821398.85	8254781	48° 0' 2.502"" W	15° 45' 53.696"" S
4	821361.67	8254762.3	48° 0' 3.741"" W	15° 45' 54.323"" S
5	821348.4	8254819.4	48° 0' 4.214"" W	15° 45' 52.473"" S
6	821301.82	8254867.1	48° 0' 5.800"" W	15° 45' 50.942"" S
7	821274.75	8254811.8	48° 0' 6.682"" W	15° 45' 52.755"" S
8	821288.08	8254769.3	48° 0' 6.214"" W	15° 45' 54.127"" S
9	821228	8254830	48° 0' 8.260"" W	15° 45' 52.184"" S
10	821224.72	8254890.6	48° 0' 8.399"" W	15° 45' 50.216"" S
11	821345.58	8254491.1	48° 0' 4.151"" W	15° 46' 3.145"" S
12	821394.76	8254589.7	48° 0' 2.548"" W	15° 45' 59.917"" S
13	821339.36	8254570.2	48° 0' 4.398"" W	15° 46' 0.575"" S
14	821344.92	8254714.5	48° 0' 4.280"" W	15° 45' 55.882"" S
15	821329.59	8254702.7	48° 0' 4.789"" W	15° 45' 56.273"" S
16	821291.55	8254601.4	48° 0' 6.018"" W	15° 45' 59.584"" S
17	821232.44	8254562.4	48° 0' 7.983"" W	15° 46' 0.879"" S
18	821218.44	8254611.5	48° 0' 8.476"" W	15° 45' 59.289"" S
19	821387.89	8254445.2	48° 0' 2.709"" W	15° 46' 4.617"" S
20	821335	8254312	48° 0' 4.421"" W	15° 46' 8.970"" S
21	821206.95	8254740.3	48° 0' 8.923"" W	15° 45' 55.109"" S
22	821162.69	8254621.5	48° 0' 10.352"" W	15° 45' 58.989"" S
23	821192.13	8254634.9	48° 0' 9.370"" W	15° 45' 58.542"" S
24	821270.25	8254657.3	48° 0' 6.759"" W	15° 45' 57.776"" S
25	821254.33	8254758.6	48° 0' 7.342"" W	15° 45' 54.493"" S
26	821279.68	8254722.9	48° 0' 6.474"" W	15° 45' 55.641"" S
27	821204.25	8254704	48° 0' 8.996"" W	15° 45' 56.289"" S
28	821182.88	8254786.5	48° 0' 9.753"" W	15° 45' 53.617"" S
29	821152.9	8254816.1	48° 0' 10.773"" W	15° 45' 52.670"" S
30	821166.05	8254852.8	48° 0' 10.350"" W	15° 45' 51.472"" S
31	821181.31	8254929.9	48° 0' 9.874"" W	15° 45' 48.957"" S
32	821247.79	8254967.1	48° 0' 7.661"" W	15° 45' 47.719"" S
33	821270.08	8255011.1	48° 0' 6.934"" W	15° 45' 46.278"" S
34	821300.56	8255036.8	48° 0' 5.923"" W	15° 45' 45.428"" S
35	821270.33	8255064.2	48° 0' 6.951"" W	15° 45' 44.553"" S
36	821156.93	8255134.9	48° 0' 10.790"" W	15° 45' 42.308"" S
37	821119.16	8255109	48° 0' 12.046"" W	15° 45' 43.165"" S
38	821118.45	8255050.8	48° 0' 12.042"" W	15° 45' 45.059"" S

APÊNDICE B [CONTINUAÇÃO...]: RESULTADOS DAS GEÓGRAFICAS PARA OS QUEIMADORES DO ACJ NA ZONA 22S

FID	Planialtimétricas		Degrees, Minutes, Seconds (DMS)	
	Longitude	Latitude	Longitude	Latitude
39	821099	8254993	48° 0' 12.669''' W	15° 45' 46.954''' S
40	821048	8254840	48° 0' 14.292''' W	15° 45' 51.951''' S
41	821160	8254681	48° 0' 10.462''' W	15° 45' 57.053''' S
42	821195	8254562	48° 0' 9.237''' W	15° 46' 0.919''' S
43	821187	8254515	48° 0' 9.477''' W	15° 46' 2.450''' S
44	821241	8254498	48° 0' 7.663''' W	15° 46' 2.969''' S
45	821290	8254484	48° 0' 6.012''' W	15° 46' 3.399''' S
46	821284	8254367	48° 0' 6.169''' W	15° 46' 7.192''' S
47	821297	8254320	48° 0' 5.687''' W	15° 46' 8.728''' S
48	821321	8254264	48° 0' 4.855''' W	15° 46' 10.551''' S
49	821409	8254244	48° 0' 1.894''' W	15° 46' 11.144''' S
50	821059	8254783	48° 0' 13.898''' W	15° 45' 53.776''' S
51	821066	8254928	48° 0' 13.751''' W	15° 45' 49.066''' S
52	821126	8255180	48° 0' 11.843''' W	15° 45' 40.846''' S
53	821192	8255165	48° 0' 9.621''' W	15° 45' 41.297''' S
54	821319	8255055	48° 0' 5.312''' W	15° 45' 44.814''' S
55	821399	8254889	48° 0' 2.554''' W	15° 45' 50.196''' S
56	821407	8254841	48° 0' 2.252''' W	15° 45' 51.735''' S
57	821279	8254907	48° 0' 6.569''' W	15° 45' 49.653''' S
58	821409	8254300	48° 0' 1.945''' W	15° 46' 9.313''' S
59	821192	8254418	48° 0' 9.256''' W	15° 46' 5.592''' S
60	821129	8254438	48° 0' 11.387''' W	15° 46' 4.956''' S
61	821101	8254599	48° 0' 12.416''' W	15° 45' 59.736''' S
62	821344	8254643	48° 0' 4.275''' W	15° 45' 58.193''' S
63	821097	8254681	48° 0' 12.591''' W	15° 45' 57.101''' S
64	821372	8254328	48° 0' 3.197''' W	15° 46' 8.419''' S
65	821187	8255012	48° 0' 9.726''' W	15° 45' 46.294''' S
66	821260	8254422	48° 0' 7.006''' W	15° 46' 5.431''' S
67	821368	8254921	48° 0' 3.604''' W	15° 45' 49.149''' S
68	821231	8254670	48° 0' 8.073''' W	15° 45' 57.396''' S
69	821128	8254790	48° 0' 11.582''' W	15° 45' 53.540''' S
70	821118	8254854	48° 0' 11.964''' W	15° 45' 51.451''' S
71	821061	8254740	48° 0' 13.822''' W	15° 45' 55.179''' S
72	821391	8254523	48° 0' 2.634''' W	15° 46' 2.072''' S
73	821067	8254873	48° 0' 13.684''' W	48° 0' 13.684''' W
74	821005	8254964	48° 0' 15.800''' W	48° 0' 15.800''' W
75	821266	8255147	48° 0' 7.146''' W	15° 45' 41.875''' S
76	821333	8254936	48° 0' 4.770''' W	15° 45' 48.701''' S
77	821339	8254894	48° 0' 4.556''' W	15° 45' 50.042''' S

**APÊNDICE C: RESULTADOS DAS GEÓGRAFICAS PARA OS QUEIMADORES DO
ACJ NA ZONA 23S**

FID	Planialtimétricas		Degrees, Minutes, Seconds (DMS)	
	Longitude	Latitude	Longitude	Latitude
78	178598.1716	8254535.063	47° 59' 57.715"" W	15° 46' 1.689"" S
79	178714.889	8254490.074	47° 59' 53.820"" W	15° 46' 3.205"" S
80	178705.6223	8254570.908	47° 59' 54.092"" W	15° 46' 0.574"" S
81	178743.0703	8254529.218	47° 59' 52.855"" W	15° 46' 1.946"" S
82	178641.5106	8254430.084	47° 59' 56.311"" W	15° 46' 5.121"" S
83	178600.3701	8254602.038	47° 59' 57.610"" W	15° 45' 59.513"" S
84	178536.2032	8254602.231	47° 59' 59.763"" W	15° 45' 59.477"" S
85	178601.5164	8254650.602	47° 59' 57.548"" W	15° 45' 57.935"" S
86	178666.6641	8254613.788	47° 59' 55.379"" W	15° 45' 59.162"" S
87	178539.6987	8254662.173	47° 59' 59.617"" W	15° 45' 57.531"" S
88	178571.3708	8254703.528	47° 59' 58.534"" W	15° 45' 56.201"" S
89	178628.6924	8254692.958	47° 59' 56.616"" W	15° 45' 56.571"" S
90	178495.0717	8254546.203	48° 0' 1.170"" W	15° 46' 1.279"" S
91	178549.0705	8254539.54	47° 59' 59.361"" W	15° 46' 1.521"" S
92	178542.2196	8254342.923	47° 59' 59.685"" W	15° 46' 7.908"" S
93	178534.0811	8254501.302	47° 59' 59.883"" W	15° 46' 2.756"" S
94	178517.4918	8254451.095	48° 0' 0.463"" W	15° 46' 4.381"" S
95	178824.8739	8254297.651	47° 59' 50.220"" W	15° 46' 9.510"" S
96	178701.9747	8254260.638	47° 59' 54.363"" W	15° 46' 10.656"" S
97	178748.1826	8254274.104	47° 59' 52.805"" W	15° 46' 10.240"" S
98	178762.2047	8254224.965	47° 59' 52.358"" W	15° 46' 11.843"" S
99	178773.9347	8254186.231	47° 59' 51.983"" W	15° 46' 13.108"" S
100	178827.6495	8254242.501	47° 59' 50.153"" W	15° 46' 11.304"" S
101	178829.8104	8254187.501	47° 59' 50.107"" W	15° 46' 13.092"" S
102	178682.4155	8254193.151	47° 59' 55.051"" W	15° 46' 12.840"" S
103	178989.8226	8254199.107	47° 59' 44.731"" W	15° 46' 12.789"" S
104	179006.1918	8254243.302	47° 59' 44.160"" W	15° 46' 11.360"" S
105	179039.1185	8254156.953	47° 59' 43.097"" W	15° 46' 14.182"" S
106	178977.6222	8254294.621	47° 59' 45.095"" W	15° 46' 9.679"" S
107	178731.9541	8254659.678	47° 59' 53.166"" W	15° 45' 57.701"" S
108	178741.2465	8254681.053	47° 59' 52.844"" W	15° 45' 57.010"" S
109	178722.5251	8254316.354	47° 59' 53.646"" W	15° 46' 8.855"" S
110	178907.7058	8254242.804	47° 59' 47.466"" W	15° 46' 11.331"" S
111	178909.0409	8254355.979	47° 59' 47.367"" W	15° 46' 7.653"" S
112	178610.5739	8254786.394	47° 59' 57.179"" W	15° 45' 53.526"" S
113	178497.1741	8254853.168	48° 0' 0.953"" W	15° 45' 51.303"" S
114	178563.1126	8254834.872	47° 59' 58.749"" W	15° 45' 51.928"" S
115	178501.069	8254378.286	48° 0' 1.049"" W	15° 46' 6.739"" S
116	178727.1202	8254150.292	47° 59' 53.571"" W	15° 46' 14.254"" S

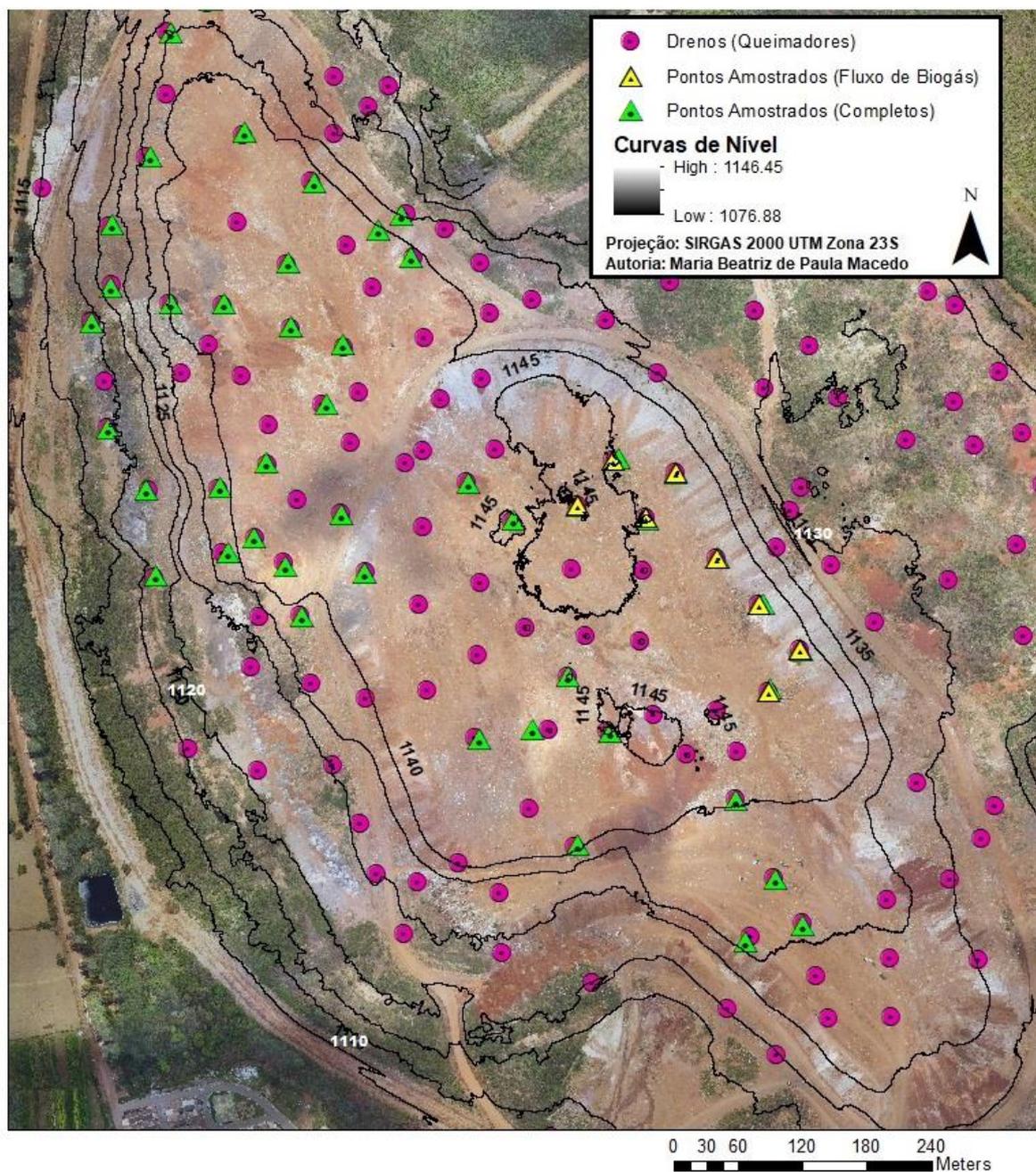
APÊNDICE C [CONTINUAÇÃO...]: RESULTADOS DAS GEÓGRAFICAS PARA OS QUEIMADORES DO ACJ NA ZONA 23S

FID	Planialtimétricas		Degrees, Minutes, Seconds (DMS)	
	Longitude	Latitude	Longitude	Latitude
117	178810.3213	8254556.02	47° 59' 50.585"" W	15° 46' 1.106"" S
118	178769.3937	8254608.787	47° 59' 51.934"" W	15° 45' 59.372"" S
119	178569.9165	8254451.704	47° 59' 58.704"" W	15° 46' 4.385"" S
120	178747.4365	8254813.089	47° 59' 52.573"" W	15° 45' 52.722"" S
121	178773.9722	8254765.524	47° 59' 51.705"" W	15° 45' 54.280"" S
122	178707.0255	8254773.233	47° 59' 53.948"" W	15° 45' 53.998"" S
123	178835.8974	8254727.037	47° 59' 49.645"" W	15° 45' 55.559"" S
124	178875.9403	8254596.09	47° 59' 48.364"" W	15° 45' 59.834"" S
125	178944.1803	8254545.536	47° 59' 46.097"" W	15° 46' 1.508"" S
126	178985.2905	8254513.777	47° 59' 44.733"" W	15° 46' 2.560"" S
127	179015.1493	8254570.571	47° 59' 43.704"" W	15° 46' 0.728"" S
128	178987.4719	8254621.472	47° 59' 44.608"" W	15° 45' 59.060"" S
129	178936.6292	8254630.959	47° 59' 46.310"" W	15° 45' 58.729"" S
130	178979.8538	8254643.776	47° 59' 44.853"" W	15° 45' 58.332"" S
131	178959.1528	8254687.246	47° 59' 45.527"" W	15° 45' 56.910"" S
132	178897.3808	8254723.177	47° 59' 47.583"" W	15° 45' 55.713"" S
133	178940.1818	8254735.086	47° 59' 46.141"" W	15° 45' 55.346"" S
134	178878.4172	8254762.777	47° 59' 48.201"" W	15° 45' 54.417"" S
135	178918.292	8254792.111	47° 59' 46.849"" W	15° 45' 53.482"" S
136	178878.8884	8254853.943	47° 59' 48.142"" W	15° 45' 51.455"" S
137	178853.6401	8254865.503	47° 59' 48.983"" W	15° 45' 51.067"" S
138	178720.2937	8254625.138	47° 59' 53.574"" W	15° 45' 58.818"" S
139	178560.0137	8254215.844	47° 59' 59.149"" W	15° 46' 12.046"" S
140	178881.5831	8254317.513	47° 59' 48.307"" W	15° 46' 8.891"" S
141	178921.2263	8254386.769	47° 59' 46.944"" W	15° 46' 6.658"" S
142	178667.8448	8254470.983	47° 59' 55.408"" W	15° 46' 3.804"" S
143	178611.5508	8254467.596	47° 59' 57.299"" W	15° 46' 3.888"" S
144	178697.5771	8254845.397	47° 59' 54.231"" W	15° 45' 51.649"" S
145	178687.4324	8254434.326	47° 59' 54.768"" W	15° 46' 5.004"" S
146	178850.7731	8254406.792	47° 59' 49.299"" W	15° 46' 5.975"" S
147	178620.392	8254870.653	47° 59' 56.809"" W	15° 45' 50.792"" S
148	178686.6388	8254389.357	47° 59' 54.816"" W	15° 46' 6.465"" S
149	178525.1726	8254071.385	48° 0' 0.387"" W	15° 46' 16.725"" S

APÊNDICE D: MÉDIA DOS RESULTADOS DE RESÍDUOS ATERRADOS DO GRÁFICO DE CARNEIRO (2002) OBTIDA ATRAVÉS DO WEBPLOT DIGITIZER E DOS RESULTADOS OBTIDOS POR OUTROS DOIS AUTORES.

Diferença Diniz (2019, <i>In Press</i>) e Nisiyama (2019)	Diferença Dados Obtidos no WebPlot Digitizer com Diniz (2019, <i>In Press</i>)	Diferença Dados Obtidos no WebPlot Digitizer com Nisiyama (2019)	Média entre as estimativas mais próximas de Resíduos Aterrados (Mg ou toneladas aterradas)
2.98	1.1055	1.87440	18232
5.59	2.2101	3.37569	34254
1.29	2.8298	-1.54025	26427
0.65	0.6080	0.03834	20138
1.26	3.8676	-2.61090	36388
1.19	0.0000	1.19088	56311
1.80	7.1827	-5.38144	72580
1.16	2.9398	-1.78185	66272
1.19	4.0141	-2.82320	56311
-1.48	4.9730	-6.45379	60961
1.77	6.0774	-4.30909	82541
-0.94	8.2881	-9.22433	97153
1.06	6.0781	-5.01880	96155
-0.97	4.9728	-5.94198	107114
1.64	3.8674	-2.23069	122386
2.28	6.0783	-3.79828	128694
-1.10	4.9728	-6.07358	146959
-3.19	3.8681	-7.06306	177841
1.54	4.9727	-3.43464	152270
1.54	7.1827	-5.64464	152270
-1.23	2.7628	-3.99518	186804
-1.23	2.6759	-3.90818	186804
1.54	0.5527	0.98536	152762
1.54	2.8707	-1.33264	150834
-1.88	4.9730	-6.84859	180496
-1.12	0.5527	-1.66817	351657
-3.62	2.7629	-6.38551	304143
-4.23	1.6583	-5.89127	288121
-2.27	2.7630	-5.03339	297514
-4.40	-1.6570	-2.74052	339503
-1.41	-0.5515	-0.86002	441712
-3.74	-0.5520	-3.18405	541160
-3.87	-1.0910	-2.77665	581208
-5.02	-2.7617	-2.26087	529005
-1.13	-1.6574	0.52724	558852

APÊNDICE E: MAPA DOS PONTOS AMOSTRADOS DOS QUEIMADORES COM A TOPOGRAFIA DO TERRENO.



*Pontos Amostrados (Completos): Compreendem medições de concentração de metano no biogás.

** As curvas de nível demonstram a elevação dos pontos amostrados.

**APÊNDICE F: RESULTADO PARCIAL DA PLANILHA ELETRÔNICA CRIADA PARA O MODELO DE DECAIMENTO DO
IPCC PARA O PERÍODO DE 1967 A 2018**

Parcela e^{(-k(T-x))}	Rx*k*Parcela*Lo (1967)	Rx*k*Parcela*Lo (1968)	Rx*k*Parcela*Lo (1969)	Rx*k*Parcela*Lo (1970)	Rx*k*Parcela*Lo (1971)
1	47.840768	0	0	0	0
0.960789439	45.96490466	89.882496	0	0	0
0.923116346	44.16259496	86.35815292	69.344448	0	0
0.886920437	42.43095485	82.97200131	66.6254133	52.842112	0
0.852143789	40.76721331	79.71862261	64.01299348	50.77014315	95.482112
0.818730753	39.16870801	76.5928107	61.5030081	48.77941736	91.73820484
0.786627861	37.632881	73.58956364	59.09144066	46.86674905	88.14109837
0.755783741	36.15727463	70.70407558	56.77443213	45.02907754	84.68503647
0.726149037	34.73952762	67.93172912	54.54827481	43.26346215	81.3644887
0.697676326	33.37737125	65.26808792	52.40940636	41.56707754	78.17414146
0.670320046	32.06862581	62.70888959	50.35440414	39.93720911	75.10888953
0.644036421	30.811197	60.25003886	48.37997971	38.37124875	72.16382785
0.618783392	29.60307269	57.88760104	46.48297358	36.86669056	69.33424369
0.594520548	28.44231961	55.61779574	44.66035011	35.42112695	66.61560911
0.571209064	27.3270803	53.43699077	42.90919274	34.03224469	64.00357371
0.548811636	26.25557016	51.3416964	41.22669922	32.69782129	61.49395769
0.527292424	25.22607453	49.32855969	39.61017723	31.41572138	59.08274512
0.506616992	24.236946	47.39435919	38.05703996	30.18389333	56.76607755
0.486752256	23.28660175	45.53599979	36.56480208	29.00036594	54.54024781
0.467666427	22.37352104	43.7505077	35.13107568	27.86324533	52.4016941
0.449328964	21.49624273	42.03502576	33.7535665	26.77071185	50.34699429
0.431710523	20.65336299	40.38680882	32.43007023	25.72101723	48.37286041

ANEXOS

ANEXO A: Taxa de geração de metano de acordo com o tipo de resíduo e zona climática

Zona Climática (IPCC)											
Boreal e Temperado (Temperatura Anual Média < 20°C)					Tropical (Temperatura Anual Média > 20°C)						
Tipo de Resíduo	Padrão	Variação	Úmido		Seco		Padrão	Variação	Precipitação Anual (mm/ano)	k (ano ⁻¹)	Lo (m ³ /t)
			Padrão	Variação	Padrão	Variação					
¹ Resíduos de Papel	0,04	0,03 – 0,05	0,06	0,05 – 0,07	0,045	0,04 – 0,06	0,07	0,06 – 0,085	0 - 249	0,04	60
¹ Resíduos de Madeira	0,02	0,01 – 0,03	0,03	0,02 – 0,04	0,025	0,02 – 0,04	0,035	0,03 – 0,05	250 - 499	0,05	80
² Outros	0,05	0,04 – 0,06	0,1	0,06 – 0,1	0,065	0,05 – 0,08	0,17	0,15 – 0,2	500 - 999	0,065	84
³ Resíduos Alimentares	0,06	0,05 – 0,08	0,185	0,1 – 0,2	0,085	0,07 – 0,1	0,4	0,17 – 0,7	> 1000	0,08	84
RS a Granel	0,05	0,04 – 0,06	0,09	0,08 – 0,1	0,065	0,05 – 0,08	0,17	0,15 – 0,2	(Urrago-Martínez e Rodríguez-Miranda, 2016)		

¹ Resíduo lentamente degradante.

² Resíduo moderadamente degradante.

³ Resíduo rapidamente degradante.

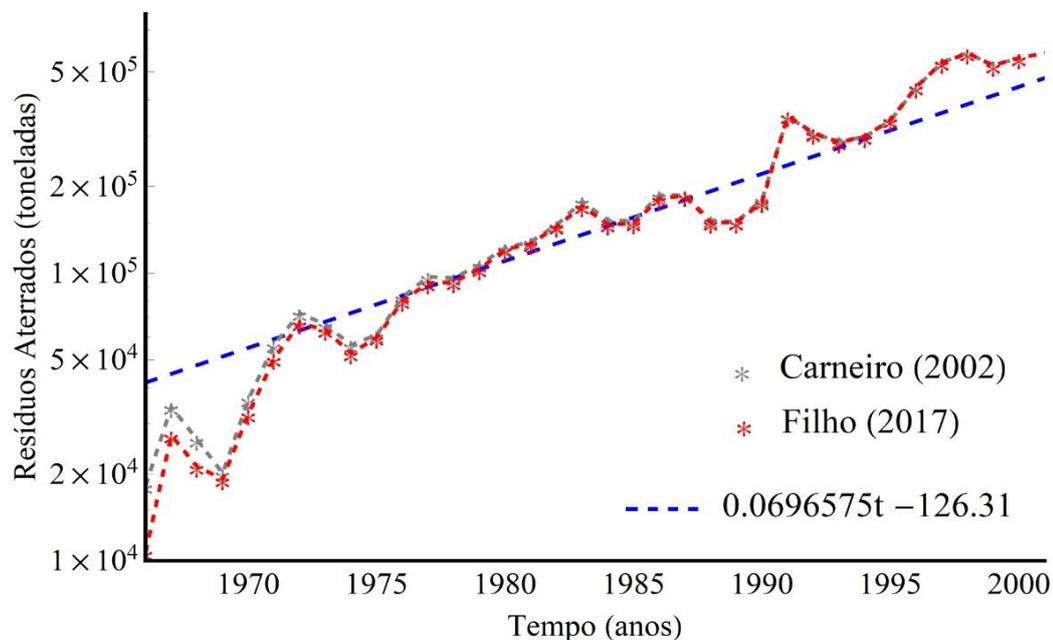
ANEXO B: Valores de taxa de geração (k) utilizados na obra de diferentes autores.

Aterro Estudado	Tipo de Modelagem	Valor usado para K (ano⁻¹)	Valor usado para Lo (m³/Mg)	Literatura/Referência
Ensenada, Mexico	IPCC (determinação dos parâmetros) e LandGEM (geração de biogás)	0,0482	94,457	(Aguilar-Virgen <i>et al.</i> , 2014)
Kahrizak, Irã	LandGEM	Não mencionado	Não mencionado	(Atabi, Ehyaei e Ahmadi, 2014)
Três Aterros Chineses	LandGEM e análises em campo	0,09 (China: valor padrão IPCC) e 0,3 (considera maior quantidade de resíduos de alimentos)	10	(Sun <i>et al.</i> , 2015)
Sete Regiões da China	IPCC	Não mencionado	Não mencionado	(Bo-feng <i>et al.</i> , 2014)
Marvdasht, Irã	LandGEM	0,05	170	(Talaiekhosani <i>et al.</i> , 2016)
Jahrom, Irã	LandGEM	0,05	170	(Talaiekhosani, Nasiri e 2016)
Seis cidades metropolitanas na Índia	TNO (modelo de primeira ordem), Afvalzorg (modelo multifásico), LandGEM e EPER Germany	0,04 (Bangalore) 0,06 (Chennai) 0,03 (Delhi) 0,04 (Hyderabad) 0,07 (Kolkata) 0,08 (Mumbai)	46,07 (Bangalore) 47,66 (Chennai) 33,72 (Delhi) 40,49 (Hyderabad) 44,23 (Kolkata) 44,3 (Mumbai)	(Das <i>et al.</i> , 2015)
Victoria, Canadá	CLEEN model (comparado com IPCC e LandGEM)	0,08	Não mencionado	(Karanjekar <i>et al.</i> , 2015)
Dinamarca	Afvalzorg, IPCC, LandGEM	0,013 a 0,19 (Parâmetros Experimentais)	8 a 107 ¹	(Mou, Scheutz e Kjeldsen, 2015)
Norte da Itália	LandGEM, método desenvolvido pelo autor e análises em campo	0,038	135	(Lucernoni, Capelli e Sironi, 2017)
La Gabarre França	LandGEM e medidas em campo	0,06	100	(Plocoste, 2016)
Bogotá, Colômbia	EPA, mexicano e IPCC	0,05	170	(Urrego-martínez; Rodríguez-miranda, 2016)
Santa Cruz e La Paz, Bolívia	LandGEM (FOD model)	0,05 (Santa Cruz) 0,04 (La Paz)	100 100	(Vargas bautista e Calvimontes, 2017)
Regina e Sakatoon no Canadá	LandGEM, Afvalzorg Simple, and IPCC e medidas em campo	Valor padrão	Valor Padrão	(Vu <i>et al.</i> , 2017)
Shahrekord, Irã	LandGEM	0,7	96	(Talaiekhosani, Nematzadeh e Eskandari, 2017)
ACJ, Brasília, Brasil	IPCC e LandGEM	0,15 (IPCC) 0,04 (LandGEM)	Calculado para os diferentes anos (IPCC) 100 (LandGEM)	(Filho, 2018)

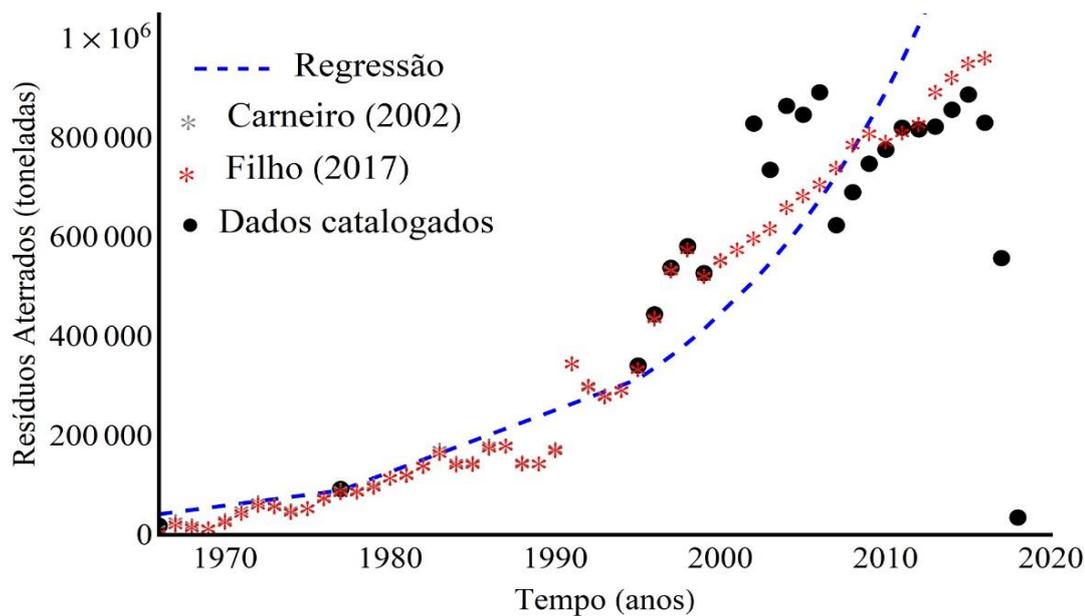
(Macedo e Lemos, 2019, *In Press*).

ANEXO C: Regressões para a estimativa dos resíduos aterrados para os anos sem dados

A) Regressão, em escala logarítmica, realizada por Diniz (2019, *In Press*)



B) Regressão, com o uso dos dados catalogados, realizada por Diniz (2019, *In Press*)



ANEXO D: Composição Gravimétrica Média em 71

Composição Gravimétrica dos Resíduos no Distrito Federal (1971)			
Composição do Lixo (Tipologia)	Plano Piloto (%)	Cidades Satélites (%)	* Distrito Federal (%)
² Papel	25.77	18.73	23.04
² Papelão	3.67	4.8	4.13
⁶ Madeira	2.65	2.27	2.5
⁵ Trapo e Estopa	3.4	3.99	3.61
⁷ Couro	0.23	0.55	0.35
⁷ Borracha	0.2	0.3	0.24
Plástico Duro	0.57	0.32	0.48
Plástico Mole	1.89	1.93	1.89
Latas	3.27	2.35	2.89
Ferro	0.26	0.06	0.18
Vidro	2.91	2.68	2.83
Louça	0.32	0.11	0.24
Alumínio	0.01	0.02	0.01
Outros Metais	0.09	0.19	0.12
Ossos	0.61	0.32	0.5
⁴ Verduras e Frutas	16.06	12.52	14.57
³ Folhagem e Flores	2.09	7.12	4.19
⁴ Resto de Alimentos	1.14	0.74	0.98
Outros Materiais	0.13	0.01	0.09
Diversos e Terra	30.12	38.49	33.37
Perda por Umidade e Fermentação	4.61	2.5	3.7

(SLU-IBRAM, 1978)

¹ Os dados de gravimetria do DF foram usados para os cálculos de COD neste trabalho.

² Papel e papelão foram tomados juntos para o cálculo de COD (categoria A)

³ O percentual de folhagem e flores foi tomado para o cálculo de COD (categoria B)

⁴ Verduras e frutas e resto de alimentos foram tomados juntos para o cálculo de COD (categoria C)

⁵ O percentual de trapo e estopa foi tomado para o cálculo de COD (categoria D)

⁶ O percentual de madeira foi tomado para o cálculo de COD (categoria E)

⁷ O percentual de borracha e couro foi tomado para o cálculo de COD (categoria F)

ANEXO E: Composição Gravimétrica Média em 77

Composição Gravimétrica dos Resíduos no Distrito Federal (1977)			
Composição do Lixo	Brasília (%)	Cidades Satélites (%)	¹ Média (%)
² Papel	29.81	22.42	26.115
² Papelão	8.15	6.29	7.22
⁶ Madeira	0.74	2.1	1.42
⁵ Trapo	2.85	3.01	2.93
Couro	0.59	1.16	0.875
Borracha	0.32	0.44	0.38
Plástico Mole	4.47	3.69	4.08
Plástico Duro	2.43	2.65	2.54
Latas	4.42	5.41	4.915
Metal Ferroso	0.15	0.65	0.4
Metal Não Ferroso	0.12	0.45	0.285
Vidro	3.51	2.56	3.035
Louça	0.91	0.94	0.925
Ossos	0.34	1.35	0.845
⁴ Verduras e Frutas	23.95	20.2	22.075
³ Folhas e Flores	2.04	6.44	4.24
⁴ Resto de Alimentos	1.78	1.96	1.87
Agregado Fino	6.71	11.8	9.255
Agregado Grosso	6.99	6.73	6.86

(SLU-IBRAM, 1978)

¹ A média, em porcentagem, foi calculada (para este trabalho) a partir das informações do IBRAM (1978) de forma a representar as características gravimétricas do DF.

² Papel e papelão foram tomados juntos para o cálculo de COD (categoria A)

³ O percentual de folhas e flores foi tomado para o cálculo de COD (categoria B)

⁴ Verduras e frutas e resto de alimentos foram tomados juntos para o cálculo de COD (categoria C)

⁵ O percentual de trapo foi tomado para o cálculo de COD (categoria D)

⁶ O percentual de madeira foi tomado para o cálculo de COD (categoria E)

ANEXO F: Composição Gravimétrica Média em 2015

Composição Gravimétrica dos Resíduos – ¹ Estrutural (Representativo) - Coleta Convencional	
Composição do Lixo	RA Estrutural (%)
² Papel	7.2
² Papelão	3.4
⁵ Vestuário	9.2
PET	1.6
Longa Vida	0.5
Plástico Filme	7.9
Plástico Mole	2.2
Plástico Duro	1.7
Alumínio	0.1
Latão	0.4
Outros Metais	0.4
Vidro	0.3
^{3 4} Orgânico	30
Rejeito	34.7

(SLU, 2015)

¹ A composição gravimétrica da coleta convencional realizada na Estrutural foi usada representativamente para obter o COD para os resíduos aterrados no ACJ a partir de 2015.

² Papel e papelão foram tomados juntos para o cálculo de COD (categoria A)

³ O percentual para o cálculo de COD da categoria B usou representativamente a parcela de orgânicos

⁴ O percentual para o cálculo de COD da categoria C usou representativamente a parcela de orgânicos

⁵ O percentual de vestuário foi tomado para o cálculo de COD (categoria D)

ANEXO G: TABELA DE VALORES DISCRETIZADOS DE CARBONO ORGÂNICO DEGRADÁVEL (COD)

Ano	COD	Ano	COD
1967	0,221	2004	0,157
1968	0,219	2005	0,155
1969	0,217	2006	0,154
1970	0,216	2007	0,152
1971	0,214	2008	0,15
1972	0,212	2009	0,148
1973	0,211	2010	0,147
1974	0,209	2011	0,145
1975	0,207	2012	0,143
1976	0,205	2013	0,142
1977	0,204	2014	0,139
1978	0,202	2015	0,138
1979	0,200	2016	0,136
1980	0,198		
1981	0,197		
1982	0,195		
1983	0,193		
1984	0,192		
1985	0,189		
1986	0,188		
1987	0,186		
1988	0,185		
1989	0,183		
1990	0,181		
1991	0,179		
1992	0,177		
1993	0,176		
1994	0,174		
1995	0,173		
1996	0,171		
1997	0,169		
1998	0,167		
1999	0,166		
2000	0,164		
2001	0,162		
2002	0,160		
2003	0,159		

ANEXO H: Dados das Medições de Percentual de CH₄ em Diferentes Drenos

WGS84	ZONA 23L	Serial N° G505925	
UTM-E	UTM-N	DATE	CH ₄ (%)
178709	8254571	04/04/2019 08:51	10,4
178716	8254492	04/04/2019 09:04	34,3
178744	8254528	04/04/2019 09:13	36,5
178668	8254614	04/04/2019 09:23	49,6
178628	8254692	04/04/2019 09:33	50,5
178603	8254649	04/04/2019 09:40	51,3
178576	8254706	04/04/2019 09:51	48,4
178540	8254661	04/04/2019 10:04	28,4
821426	8254648	04/04/2019 10:15	45,3
821386	8254683	04/04/2019 10:24	32,1
178545	8254344	08/04/2019 10:05	45,9
821440	8254452	08/04/2019 10:07	53,6
821392	8254444	08/04/2019 10:17	54,8
178534	8254502	08/04/2019 10:25	53,4
178573	8254450	08/04/2019 10:35	26
178573	8254450	08/04/2019 10:40	41,8
178687	8254388	08/04/2019 10:57	46,1
178724	8254315	08/04/2019 11:01	57,9
178749	8254272	08/04/2019 11:06	56,6
178697	8254256	08/04/2019 11:11	45,8
821337	8254895	09/04/2019 08:51	32,9
821308	8254921	09/04/2019 08:58	49,8
821329	8254934	09/04/2019 09:01	51
821267	8255166	09/04/2019 09:08	48,4
821159	8255138	09/04/2019 09:21	45,4
821123	8255108	09/04/2019 09:23	47,8
821188	8255014	09/04/2019 09:28	44,2
821250	8254966	09/04/2019 09:34	1,9
821226	8254891	09/04/2019 09:39	2,1
821168	8254854	09/04/2019 09:43	46,8
821228	8254832	09/04/2019 09:49	7,9
821274	8254814	09/04/2019 09:56	45,9
821258	8254759	09/04/2019 09:59	49,8
821120	8254854	09/04/2019 10:05	16,1
821068	8254929	09/04/2019 10:10	34,6
821103	8254992	09/04/2019 10:14	50,6
821066	8254870	09/04/2019 10:21	44
821048	8254838	09/04/2019 10:25	41,7
821061	8254738	09/04/2019 10:30	20,9
821095	8254681	09/04/2019 10:35	49,7
821103	8254601	09/04/2019 10:40	2,8
821168	8254621	09/04/2019 10:47	23,9
821192	8254635	09/04/2019 10:51	43,6
821162	8254682	09/04/2019 10:55	48,6
821204	8254705	09/04/2019 10:58	45,6
821219	8254608	09/04/2019 11:02	47,5
821233	8254561	09/04/2019 11:08	42,1
821291	8254601	09/04/2019 11:14	44,8
821271	8254655	09/04/2019 11:16	45,6

*Divisão em cores para mostrar as diferentes datas.

(P&D Raesa, 2019)