



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**RENATO DE SOUSA SILVA**

**EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DE UM ATERRO NA AMAZÔNIA:  
SIMULAÇÃO DAS EMISSÕES DE METANO NO ATERRO DO AURÁ – REGIÃO  
METROPOLITANA DE BELÉM, PA.**

**BELÉM-PA  
2017**

**RENATO DE SOUSA SILVA**

**EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DE UM ATERRO NA AMAZÔNIA:  
SIMULAÇÃO DAS EMISSÕES DE METANO NO ATERRO DO AURÁ – REGIÃO  
METROPOLITANA DE BELÉM, PA.**

Dissertação de Mestrado apresentada para o Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará em convênio com o Museu Paraense Emílio Goeldi e a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Linha de Pesquisa: Interação Clima, Sociedade e Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Breno Cesar de Oliveira Imbiriba

**BELÉM-PA  
2017**

Dados Internacionais de Catalogação de Publicação (CIP)  
Biblioteca do Instituto de Geociências/SIBI/UFPA

---

Silva, Renato de Sousa, 1991-

Emissões de gases de efeito estufa de um aterro na Amazônia: simulação das emissões de metano no aterro do Aurá – Região Metropolitana de Belém, PA / Renato de Sousa Silva. – 2017.

54 f. : il. ; 30 cm

Inclui bibliografias

Orientadora: Breno Cesar de Oliveira Imbiriba

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Belém, 2017.

1. Biodegradação. 2. Aterros – Belém, Região Metropolitana de (PA). 3. Resíduos sólidos. 4. Metano – Belém, Região Metropolitana de (PA). I. Título.

CDD 22. ed. 620.11223

---

**RENATO DE SOUSA SILVA**

**EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DE UM ATERRO NA AMAZÔNIA:  
SIMULAÇÃO DAS EMISSÕES DE METANO NO ATERRO DO AURÁ – REGIÃO  
METROPOLITANA DE BELÉM, PA**

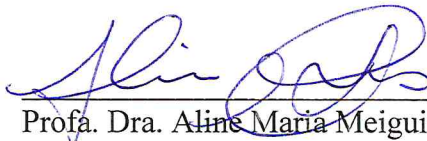
Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Ciências Ambientais, Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará em parceria com o Museu Paraense Emílio Goeldi e a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária da Amazônia Oriental, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais. Área em Clima e Dinâmica Socioambiental na Amazônia.

Data de aprovação: 31/ 08 / 2017

Banca Examinadora:



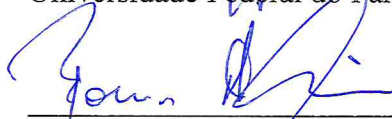
Prof. Dr. Breno César de Oliveira Imbiriba - Orientador  
Doutor em Física  
Universidade Federal do Pará



Prof.ª. Dra. Aline Maria Meiguins de Lima - Membro  
Doutora em Desenvolvimento Sustentável do Trópico  
Úmido  
Universidade Federal do Pará



Prof. Dr. José Henrique Cattanio - Membro  
Doutor em Agronomia  
Universidade Federal do Pará



Prof. Dr. Thomas Adalbert Mitschein - Membro  
Doutor em Sociologia, História da Economia e Ciência  
Política  
Universidade Federal do Pará

## AGRADECIMENTOS

À minha família, que sempre foi meu refúgio e sempre tem me apoiado nas decisões e nos meus estudos.

Ao meu orientador professor Breno Imbiriba, por me lançar o desafio de entrar num campo novo de estudo para ambos e me dar todo suporte que precisei no desenvolvimento da pesquisa.

À minha parceira de pesquisa Jade, sem a qual não conseguiria dar nem o primeiro nem último passo nessa caminhada.

Aos trabalhadores e catadores de material reciclável do Aterro do Aurá, pela sua prestatividade e disposição durante nossas pesquisas de campo.

À minha companheira Bruna, por estar sempre ao meu lado nos momentos bons, ruins, difíceis e duvidosos, sempre dando força para que eu não desistisse.

Aos meus colegas e amigos que adquiri no decorrer desse curso, parcerias e amizades valiosas que levo para a vida toda.

À faculdade de meteorologia da UFPA, pelo apoio estrutural e fundamental na realização deste trabalho.

Ao programa Trópico em Movimento, pelo apoio institucional e financeiro, que foram de fundamental importância para o andamento desta pesquisa.

Agradeço ao Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais e todos seus profissionais, pelas vivências e aprendizados adquiridos nesse período curto, porém muito rico de conhecimentos.

## RESUMO

Resíduos sólidos urbanos em aterros e lixões representam uma importante fonte antropogênica de Gases de Efeito Estufa, principalmente o Metano ( $\text{CH}_4$ ), que possui alta capacidade de reter calor na Atmosfera. Essa emissão é influenciada por fatores como composição dos resíduos, teor de umidade e idade dos resíduos, além de fatores específicos do local como o clima regional e o modo de gerenciamento do aterro. Na literatura há poucos estudos que estimam as emissões de gases estufa de aterros com enfoque na Região Amazônica e suas características climáticas. Deste modo, este trabalho tem como objetivo descrever a dinâmica de emissão do gás Metano no Aterro do Aurá, local onde, por décadas, foram depositados os resíduos sólidos urbanos da Região Metropolitana de Belém, estado do Pará, e que se encontra desativado por exigências na legislação ambiental. Para tal foram realizadas simulações utilizando modelos de 1ª ordem de emissão de biogás propostos pelo IPCC e pela USEPA (LandGEM 3.02). Os modelos foram comparados e as variações nos seus principais parâmetros foi avaliada, assim como a influência das condições climáticas e características dos resíduos nas emissões de Metano. Devido à alta precipitação e umidade da Região Amazônica, foi observado que os resíduos degradam rapidamente, sendo necessário se tomar decisões imediatas no sentido de aplicar métodos de controle de emissões em aterros para se evitar que os gases escapem para a Atmosfera.

**Palavras Chave:** Biodegradação. Aterro controlado. Metano. Modelos de 1ª ordem.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1– Fases da biodegradação de resíduos em aterros.....	15
Figura 2- Aterro controlado do Aurá em 2015 (visão de satélite).....	21
Figura 3- Estimativas da geração de resíduos na Região Metropolitana de Belém no período de 1991 a 2016 comparado aos dados da SESAN e PMB.....	39
Figura 4 - Estimativas de emissões de CH <sub>4</sub> no Aurá realizadas pelas 5 simulações do software do IPCC. ....	41
Figura 5 - Estimativas de emissões de CH <sub>4</sub> no aterro do Aurá realizadas pelas 7 simulações do software LandGEM. ....	44
Figura 6- Emissões totais de CH <sub>4</sub> estimadas pelas simulações do LandGEM e IPCC no aterro do Aurá no período de 1990 a 2070. ....	45
Figura 7 - Estimativas de emissões de CH <sub>4</sub> no Aurá realizadas pelas simulações do IPCC e LandGem e a partir de emissões preditas pela empresa Conestoga-Rovers no período de 1990 a 2019. ....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Distribuição percentual típica de Gases de Aterros durante os primeiros 48 meses. ....	17
Tabela 2 - Constituintes típicos encontrados no gás de Aterro. ....	17
Tabela 3 - Principais fatores influenciando a geração de gases. ....	19
Tabela 4 - Faixas de valores sugeridos para a constante k em função de faixas de precipitação anual.....	28
Tabela 5 - Valores do Potencial de Geração de Metano (L0) adotados pela USEPA.....	28
Tabela 6 - Faixas de valores de Carbono Orgânico Degradável (DOC) para as frações de resíduos sólidos urbanos.....	30
Tabela 7- Valores padrão para o Fator de Correção de Metano (MCF) segundo o tipo de local de deposição de resíduos sólidos urbanos. ....	31
Tabela 8 - Valores padrão para o Fator de Oxidação do Metano (OX) para os resíduos sólidos urbanos segundo o tipo de local de deposição.....	31
Tabela 9 - Valores padrão da Constante de Geração de Metano (k) de acordo com os tipos de resíduo e condições climáticas da região: Temperatura Média Anual (MAT), Precipitação média anual (MAP) e Potencial de Evapotranspiração (PET). ....	32
Tabela 10 - Composição dos Resíduos Sólidos Urbanos do município de Belém.....	34
Tabela 11- Estimativas da população e geração de resíduos na Região Metropolitana de Belém no período de 1990 a 2016.....	38
Tabela 12– Valores do teor de Carbono Orgânico Degradável (DOC) para as frações dos resíduos da Região Metropolitana de Belém.....	43
Tabela 13 - Emissão total de CH <sub>4</sub> no Aurá estimada pelas simulações do IPCC e do LandGEM no período de 1990 a 2070, discriminando as estimativas em 4 classes de simulação.....	46



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>11</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo Geral .....</b>	<b>11</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos Específicos.....</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>O PROBLEMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.....</b>	<b>12</b>
<b>4</b>	<b>A DINÂMICA DOS ATERROS SANITÁRIOS .....</b>	<b>15</b>
<b>4.1</b>	<b>Geração de Gases em Aterros .....</b>	<b>15</b>
<b>4.2</b>	<b>Fatores que afetam a Produção do Biogás em Aterros .....</b>	<b>18</b>
<b>4.3</b>	<b>O Aterro controlado do Aurá.....</b>	<b>20</b>
<b>5</b>	<b>ESTIMANDO A GERAÇÃO DE GASES EM ATERROS.....</b>	<b>23</b>
<b>5.1</b>	<b>Modelos de Ordem Zero .....</b>	<b>24</b>
<b>5.2</b>	<b>Modelos de Primeira Ordem .....</b>	<b>25</b>
<b>5.2.1</b>	<b>Modelo LandGEM 3.02 .....</b>	<b>27</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Modelo do IPCC.....</b>	<b>29</b>
<b>6</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>34</b>
<b>6.1</b>	<b>Características dos RSU da Região Metropolitana de Belém .....</b>	<b>34</b>
<b>6.2</b>	<b>Modelagem das emissões de CH<sub>4</sub> do Aurá .....</b>	<b>34</b>
<b>6.3</b>	<b>Diretrizes para aplicação do modelo IPCC.....</b>	<b>35</b>
<b>6.4</b>	<b>Diretrizes para aplicação do modelo LandGEM 3.02.....</b>	<b>36</b>
<b>7</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>38</b>
<b>7.1</b>	<b>Estimativa da Geração de resíduos na RMB .....</b>	<b>38</b>
<b>7.2</b>	<b>Simulações do IPCC .....</b>	<b>40</b>
<b>7.3</b>	<b>Simulações do LandGEM 3.02 .....</b>	<b>42</b>
<b>7.4</b>	<b>Comparação entre os modelos.....</b>	<b>45</b>
<b>7.4.1</b>	<b>Simulações da empresa <i>Conestoga-Rovers</i>.....</b>	<b>47</b>
<b>8</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>50</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>51</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As preocupações com os impactos ambientais dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), principalmente no que diz respeito à destinação final ambientalmente adequada, têm ganhado grande notoriedade atualmente devido principalmente sua relação com impactos globais da emissão de Gases de Efeito Estufa, com destaque para o Metano (CH<sub>4</sub>), por este apresentar alta capacidade de reter calor na Atmosfera, cerca de, 21 vezes maior que o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (TALYAN et al., 2007; WANGYAO et al., 2010; HOUGHTON; IPCC, 2001).

A Lei nº, 12.305 de, 2010 (Política Nacional de Resíduos Sólidos) considera que a disposição final ambientalmente adequada dos resíduos deve prever sua distribuição ordenada em aterros, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública, à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos (BRASIL, 2010).

Os aterros controlados e lixões, que são a principal destinação de RSU nas cidades brasileiras, representam importantes fontes de Metano que em nível mundial contribuem para o aquecimento global (BANCO MUNDIAL, 2004; DI BELLA, DI TRAPANI; VIVIANI, 2011). Estima-se que esta fonte representa entre 5% e, 20% das emissões antropogênicas de CH<sub>4</sub> em todo o mundo (IPCC, 1996). Quando não são gerenciados de forma adequada, estes locais geram vários problemas em nível local, principalmente por compostos tóxicos presentes nos resíduos, que contaminam lençóis freáticos e mananciais superficiais, causam odores desagradáveis, além dos impactos sociais e à saúde pública como as péssimas condições de trabalhos dos catadores e proliferação de vetores de doenças (VAN ELK, 2007).

A dinâmica das emissões nos locais de depósito de RSU depende de vários fatores que afetam a produção de gases como composição dos resíduos, teor de umidade do resíduo, idade dos resíduos, temperatura do aterro, pH do aterro, quantidade e qualidade dos nutrientes, além dos fatores ambientais externos ao aterro relacionados ao clima local, como temperatura e precipitação, e a forma de gerenciamento e operação do aterro (USEPA, 1991; BANCO MUNDIAL, 2004; IPCC, 2006).

Os principais métodos de descrição desta dinâmica são os modelos de geração de biogás em aterros, que fornecem uma estimativa de gás de aterro gerado ao longo do tempo a partir de um determinado volume de resíduos, parametrizando processos físicos e químicos relevantes durante a decomposição dos resíduos (MACHADO et al., 2009; MENDES; MAGALHÃES SOBRINHO, 2005; DI BELLA, DI TRAPANI; VIVIANI, 2011).

Os modelos mais conhecidos e aplicados são os propostos pelo Banco Mundial, pela

Agência de Proteção Ambiental Americana (USEPA) e pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC). As equações apresentadas por todos esses modelos têm em comum o fato de seguirem a cinética de primeira ordem e considerarem os mesmos parâmetros de entrada: a) a massa de resíduos depositada no aterro anualmente; b) o tempo de atividade do aterro e/ou após o fechamento, c) a taxa de geração de metano ( $k$ ); d) o potencial de geração de metano ( $L_0$ ) (BANCO MUNDIAL, 2004; USEPA, 2005b; IPCC, 2006). As variações entre os modelos ocorrem basicamente pela adoção de fatores de conversão de unidades de seus parâmetros (MACIEL, 2009).

O objetivo deste trabalho é descrever a dinâmica de Emissão de Gases Estufa no Aterro do Aurá, na Região Metropolitana de Belém através de simulações realizadas por modelos matemáticos de 1ª ordem. Este local foi por muitos anos a principal destinação dos RSU dessa região. O Aterro é mais conhecido como “Lixão do Aurá” devido os resíduos terem sido por muitos anos depositados diretamente sobre o solo, sem qualquer técnica de controle ambiental (BELÉM, 1997; MORALES, 2002; MATOS et al., 2011).

Para isso, foram aplicados os principais modelos de primeira ordem encontrados na literatura, propostos pelo IPCC e pela USEPA. Estes modelos são comumente utilizados em estudos de emissão de gases de aterro no Brasil e em vários outros países no mundo (CHIEMCHAI SRI; VISVANATHAN, 2008; MACIEL, 2009; MENDES; MAGALÃES SOBRINHO, 2005; BANCO MUNDIAL, 2004; MACHADO et al., 2009; WANGYAO et al., 2010; DI BELLA; DI TRAPANI; VIVIANI, 2011; ALDIBERT; FERNANDES, 2012).

Na literatura técnica há poucos estudos que fazem uma abordagem de estimativa de emissão e de parâmetros em regiões de clima tropical. Como as condições climáticas influenciam nos parâmetros dos modelos e, conseqüentemente, nos resultados, as regiões de clima tropical, por possuírem alta temperatura e alta umidade, tendem a possuir significativa diferença de regiões com clima não tropical no processo de biodegradação da matéria orgânica presente nos resíduos, o que afeta a geração do biogás (BANCO MUNDIAL, 2004; WANGYAO et al., 2010; MACHADO et al., 2009).

No Brasil, os atuais estudos de emissão de biogás em aterros são realizados com base em critérios e experiências internacionais, com parâmetros técnicos desenvolvidos para aterros de países desenvolvidos, onde as características de projeto, operacionais, dos resíduos e as condições climáticas são bem distintas dos aterros existentes no Brasil, além do que poucos projetos e principais pesquisas que envolvem biogás no Brasil estão localizados no eixo sul-sudeste (MACIEL, 2009). Notou-se, na literatura, a quase inexistência de estudos de

emissão em aterros ou lixões na Amazônia, o que expressa a necessidade compreender melhor as especificidades das emissões de biogás nessa Região.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

- Descrever a Dinâmica de Emissão do Gás Estufa Metano no Aterro do Aurá, na Região Metropolitana de Belém, PA.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Simular a Emissão de Metano produzido no Lixão do Aurá através de modelos de primeira ordem;
- Avaliar a influência das condições climáticas da Região Amazônica nas emissões de Metano do aterro do Aurá;
- Avaliar como as características dos resíduos depositados no aterro do Aurá influenciam nas emissões de Metano.

### 3 O PROBLEMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

De acordo com a NBR nº, 10.004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas, resíduos sólidos

são resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT, 2004).

Dados da Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) mostram, em um estudo realizado em, 2014, que a geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no Brasil está estimada em cerca de, 195 mil toneladas por dia. A geração diária de resíduos por habitante é 0,963 kg. A região Norte coleta cerca de, 12,5 toneladas diárias, o que corresponde a 6,4% dos resíduos coletados no País. O estado do Pará produziu cerca de 6,9 mil toneladas de resíduo (42% da Região Norte) por dia no ano de 2014, das quais foram coletadas 5,3 mil toneladas, o que corresponde a 0,65 kg/hab./dia (ABRELPE, 2014).

Preocupações dos governos com os impactos ambientais dos RSU levaram a criação da Política Nacional de Resíduos sólidos, que prevê que os resíduos devem ter uma destinação ambientalmente adequada, sendo pelo processo de reciclagem, compostagem, recuperação, aproveitamento energético ou outras destinações, de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos. Esta lei apresenta metas e instrumentos de planejamento para eliminação e tratamento dos resíduos em nível nacional, estadual, microrregional, intermunicipal e metropolitano e municipal (BRASIL, 2010).

Em geral, define-se três tipos de destinação para os RSU: lixão, aterro controlado e aterro sanitário. Apesar da legislação, cerca de 41,6% dos resíduos coletados no Brasil não possuem destinação adequada, ou seja, são despejadas em lixões (17,4%) ou em aterros controlados (24,2%). Os outros 58,4% são destinados a aterros sanitários, locais considerados ambientalmente adequados (ABRELPE, 2014).

*Lixão* é o nome dado ao local onde a disposição de resíduos sólidos é feita sobre o

solo, sem medidas de proteção ao meio ambiente ou a saúde pública (JARDIM et al., 1995). É uma forma inadequada de se dispor os RSU porque provoca uma série de impactos ambientais negativos, como vetores de doenças (mosquitos, ratos, baratas), maus odores, poluição do solo, das águas superficiais e do lençol freático (SANTOS FILHO, 2013). Os lixões são recuperados geralmente através da remoção completa de todo o lixo depositado, colocando-o num aterro sanitário e recuperando a área escavada com solo natural da região (MONTEIRO; MANSURY, 2006).

No *Aterro controlado* os resíduos sólidos são cobertos com uma camada de material inerte na conclusão de cada jornada de trabalho (JARDIM et al., 1995). Neste local não há requisitos técnicos tão rigorosos no tratamento dos RSU, pois permite a eliminação de resíduos diretamente no solo, devidamente isolada e revestida, para que atenda aos requisitos mínimos de controle de saúde, sendo recomendado para municípios com capacidade de investimento limitada, que coletam até 50 t/dia de RSU, para garantir sua eliminação a curto prazo, com baixo custo, e em uma área com características naturais que minimizem o risco de impactos negativos sobre o meio ambiente (MONTEIRO; MANSURY, 2006).

No *Aterro sanitário* a disposição dos resíduos sólidos no solo não causa danos à saúde e à segurança pública, minimizando os impactos ambientais, pois os resíduos sólidos são confinados na menor área possível e reduzidos ao menor volume permissível, sendo cobertos com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou em intervalos menores, se necessário (ABNT, 1983). Sua implementação leva em consideração a melhor localização para atender a necessidades dos municípios atendidos, além de parâmetros técnicos das normas e diretrizes federais, estaduais e municipais (MONTEIRO; MANSURY, 2006). É considerada a solução tecnicamente mais indicada para a disposição final dos RSU, pois também dá um tratamento adequado aos líquidos e gases gerados pela decomposição (MONTEIRO; MANSURY, 2006).

Aterros controlados e lixões são inadequados por não terem qualquer controle sobre a contaminação causada pelos resíduos. O lixão é ainda mais grave, porque além de não possuir impermeabilização do solo ou sistema de drenagem do chorume - líquido produzido na decomposição de resíduos orgânicos - não recebe nenhuma camada de cobertura (ABRELPE, 2014).

Em nível global o principal impacto gerado pela destinação inadequada dos RSU é a liberação de gases de efeito estufa (GEE) para a atmosfera, principalmente o Metano (CH<sub>4</sub>). Junto com o Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), eles constituem cerca de 99 % do Biogás - Gás

gerado nos locais de deposição de Resíduos através da decomposição microbiana (O'LEARY; TCHOBANOGLOUS, 2002). O biogás é composto por aproximadamente 40% de CO<sub>2</sub> e 60% de CH<sub>4</sub>. Apesar do CO<sub>2</sub> ser o gás estufa antropogênico mais relevante, a preocupação aqui é o CH<sub>4</sub>, por ser cerca de 21 vezes mais potente que o CO<sub>2</sub> na capacidade de reter calor na atmosfera (HOUGHTON e IPCC, 2001). Assim, aterros e lixões representam importantes fontes de Metano em nível mundial e contribuem para o aquecimento global (BANCO MUNDIAL, 2004; DI BELLA; DI TRAPANI; VIVIANI, 2011). Estima-se que esta fonte representa entre 5% e, 20% das emissões antropogênicas de CH<sub>4</sub> em todo o mundo (USEPA, 1996).

Em nível local, entre os problemas principais estão a contaminação do solo principalmente por compostos tóxicos presentes nos resíduos, contaminação de lençóis freáticos e mananciais superficiais pelo chorume e outros elementos tóxicos (MORALES; 2002; MONTEIRO; MANSURY, 2006; BAHIA; FENZL; MORALES, 2006; SIQUEIRA; APRILE, 2013). Além disso, há impactos sociais e à saúde pública como as péssimas condições de trabalhos dos catadores e proliferação de vetores de doenças (MONTEIRO; MANSURY, 2006; VAN ELK, 2007).

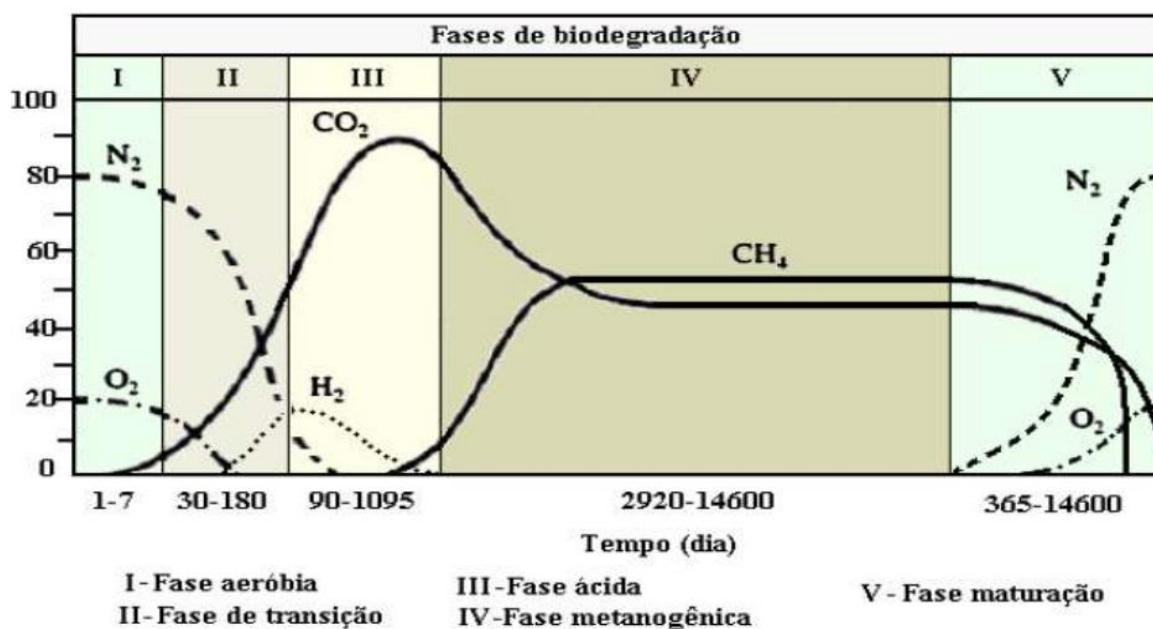


## 4 A DINÂMICA DOS ATERROS SANITÁRIOS

### 4.1 Geração de Gases em Aterros

A geração de gases nos aterros é decorrente da decomposição microbiana dos materiais biodegradáveis presentes nos RSU, que envolve processos aeróbios e anaeróbios.

Figura 1– Fases da biodegradação de resíduos em aterros.



Fonte: Alcântara (2007).

A Figura 1 mostra o gráfico estimando a duração de cada fase, assim como a variação volumétrica dos gases em termos percentuais. Segundo O'Leary e Tchobanoglous (2002) a geração dos principais gases nos aterros ocorre em cinco fases mais ou menos sequenciais. Esta descrição é retomada e complementada por vários outros Autores (MENDES; MAGALHÃES SOBRINHO, 2005; ALCÂNTARA, 2007; MACIEL, 2009; FIRMO, 2013). As fases são descritas a seguir:

*Fase I - Ajuste inicial ou fase aeróbica.* É o momento logo após a deposição dos resíduos em que os componentes orgânicos biodegradáveis começam a sofrer uma decomposição bacteriana. Nessa etapa, a biodegradação ocorre basicamente em condições aeróbicas devido haver certa quantidade de ar nos espaços vazios entre os resíduos. Essa fase é caracterizada por um aumento considerável na temperatura em consequência de reações aeróbicas exotérmicas.

*Fase II - Transição.* Esta fase ocorre quando os níveis de oxigênio decrescem e começam a se desenvolver condições anaeróbicas. A matéria orgânica passa a ser convertida em ácidos orgânicos e outros produtos. O dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) tem sua produção intensificada, fazendo com que reduza o pH do chorume no aterro, e no final desta etapa, são bem reduzidas as concentrações de oxigênio e nitrogênio que havia na fase inicial. Também ocorre nessa etapa uma rápida geração de gás hidrogênio ( $\text{H}_2$ ).

*Fase III – Ácida.* A atividade de bactérias iniciada na fase II é acelerada com a produção de quantidades significativas de ácidos orgânicos. Durante a fase ácida, ocorre a quebra dos compostos de maior massa molecular (lipídios, polímeros orgânicos e proteínas), resultando em compostos intermediários que serão utilizados como fonte de energia pelos microrganismos e convertidos em compostos mais simples, principalmente ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ). Alguns dos gases produzidos são:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$  (amônia),  $\text{H}_2$  e Compostos Orgânicos Voláteis (VOC). Esta fase é caracterizada pelo baixo pH do chorume, em torno de 5 ou menos, devido à presença de ácidos orgânicos e elevadas concentrações de  $\text{CO}_2$ , sendo este o principal gás gerado, atingindo seu pico de produção nesta fase.

*Fase IV - Metanogênica.* É a mais longa do processo e ocorre em condições anaeróbicas. Neste momento, a produção de ácidos orgânicos diminui e o ácido acético e o gás hidrogênio são convertidos em  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  principalmente por bactérias estritamente anaeróbicas chamadas Bactérias Metanogênicas, fazendo com que eleve o pH, até atingir valores próximos ao neutro. Nesta fase, ocorre o decréscimo na produção de  $\text{CO}_2$  até estabilizar numa faixa de 35-50% do biogás. Por sua vez o  $\text{CH}_4$  que no início da fase IV aumenta consideravelmente, também estabiliza em torno de 50-60% do biogás.

*Fase V - Maturação.* Trata-se da etapa final da decomposição dos resíduos. A matéria biodegradável disponível já foi consumida e convertida em  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  nas fases anteriores, reduzindo a disponibilidade de nutrientes para as bactérias, restando apenas aqueles resíduos de lenta decomposição. Dessa forma, a geração de biogás começa a declinar até cessar. Com a diminuição da pressão interna devido à pouca atividade microbiana e pouca produção de gases, o  $\text{O}_2$  e  $\text{N}_2$  tornam a ocupar os espaços nos resíduos, voltando as condições atmosféricas no local.

A duração de cada fase pode mudar de acordo com condições específicas do aterro. Algumas variáveis envolvidas nesse processo são: composição da matéria orgânica, disponibilidade de nutrientes, teor de umidade dos resíduos, escoamento de umidade através do material residual e grau de compactação inicial (USEPA, 1991).

A composição dos gases varia em função da idade do aterro ou da fase de decomposição dos RSU (USEPA, 1991; O'LEARY; TCHOBANOGLIOUS, 2002; MACIEL, 2009). Na Tabela 1 está expressa a distribuição percentual típica dos gases principais encontrados em um aterro em função do tempo nos primeiros dois anos de funcionamento.

Tabela 1- Distribuição percentual típica de Gases de Aterros durante os primeiros 48 meses.

Intervalo de tempo desde a conclusão da célula (mês)	Percentual médio em volume		
	Nitrogênio (N <sub>2</sub> )	Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	Metano (CH <sub>4</sub> )
0-3	5,2	88	5
3-6	3,8	76	21
6-12	0,4	65	29
12-18	1,1	52	40
18-24	0,4	53	47
24-30	0,2	52	48
30-36	1,3	46	51
36-42	0,9	50	47
42-48	0,4	51	48

Fonte: O'leary e Tchobanoglous (2002)

Tipicamente, os constituintes principais são o CH<sub>4</sub> e o CO<sub>2</sub>, abrangendo cerca de 99% do biogás. A tabela 2 expressa a composição típica do Biogás durante a fase metanogênica.

Tabela 2 - Constituintes típicos encontrados no gás de Aterro.

Componente	Percentual (base seca)
Metano	45 - 60
Dióxido de Carbono	40 - 60
Nitrogênio	2 - 5
Oxigênio	0,1 - 1,0
Amônia	0,1 - 1,0
Sulfuretos, dissulfuretos, mercaptanos etc.	0 - 1,0
Hidrogênio	0 - 0,2
Monóxido de Carbono	0 - 0,2

## 4.2 Fatores que afetam a Produção do Biogás em Aterros

Segundo a Agência Americana de Proteção Ambiental (USEPA, 1991) a taxa de geração de biogás nos aterros ocorre em função dos seguintes fatores: Composição dos resíduos, teor de umidade do resíduo, idade dos resíduos, temperatura do aterro, pH do aterro e disponibilidade de nutrientes.

*Composição dos resíduos* - afeta diretamente a produção do biogás. Altos percentuais de materiais biodegradáveis no resíduo (papel, restos de alimentos e de jardim, papel e madeira) significam mais substrato para os microrganismos, e conseqüentemente maior taxa de geração de biogás (USEPA, 1991; IPCC, 2006). É o caso, por exemplo dos resíduos em áreas tropicais que possuem maiores porcentagens de resíduos de jardim (BANCO MUNDIAL, 2004; MACHADO et al., 2009). Por outro lado, substâncias tóxicas presentes podem afetar as bactérias e reduzir a geração de biogás (USEPA, 1991).

*Umidade dos resíduos* - Altos teores de umidade nos resíduos também servem para aumentar a taxa de geração de gás. Como a maioria das reações bioquímicas ocorre em meio fluido, alta umidade favorece a homogeneização do meio de biodegradação, distribuindo melhor os microrganismos no local, otimizando a produção de gás (ALDIBERT, 2011). Neste sentido, cabe inferir que em regiões onde há altos índices pluviométricos e ocorre a infiltração de água para as camadas mais profundas dos aterros, o teor de umidade tende a ser mais elevado.

*Idade dos resíduos* - está relacionado com as fases de biodegradação da matéria orgânica dos resíduos. Resíduos mais novos tendem a ter maior potencial de gerar biogás, pois resíduos mais antigos, mesmo estando nas mesmas condições ambientais, já estão passando pelo processo de degradação há mais tempo e apresentam menor disponibilidade de substrato para os microrganismos (USEPA, 1991).

*Temperatura do aterro* - a produção de biogás também é sensível a variações na temperatura do aterro. A melhor temperatura para as condições anaeróbias se encontra na faixa de, 29°C a 38°C em operações mesofílicas (microrganismos operando em temperaturas mais amenas), e 49°C a 57°C em operações termofílicas (microrganismos operando em temperaturas mais elevadas). Temperaturas abaixo de, 10°C são altamente prejudiciais à

geração de biogás (USEPA, 1991).

*pH do aterro* – O pH ideal para a fermentação de Metano vai do neutro para o ligeiramente alcalino (7,0 – 7,2) (USEPA, 1991). O pH tem influência direta quando altera a estrutura proteica de enzimas e outros compostos, e indireta, quando afeta o grau de toxicidade de alguns compostos e pode inibir o processo anaeróbio, já que algumas bactérias são susceptíveis a variações no pH (ALDIBERT, 2011).

*Disponibilidade de nutrientes* - O desenvolvimento da população de microrganismos necessita de alguns nutrientes como Carbono e Nitrogênio em quantidades elevadas, na proporção de C:N=16:1. Quando esses nutrientes se encontram em baixas quantidades podem retardar o processo de biodegradação (ALDIBERT, 2011; CROVADOR, 2014).

*Estrutura do aterro* - Alguns outros fatores também são apontados na literatura como importantes na geração do biogás, tais como as *condições físicas e operacionais do aterro* como profundidade e grau de compactação dos resíduos. Aterros com altura elevada e boa impermeabilização favorecem a atividade anaeróbia, e conseqüentemente a formação de metano, assim como a compactação aumenta a densidade da massa de resíduos, o que encurta a fase aeróbia (VAN ELK, 2007). Resíduos depositados em locais a céu aberto se decompõem em geral de maneira aeróbia, produzindo pouco CH<sub>4</sub> e as emissões diminuem mais rapidamente do que em aterros em condições anaeróbias (IPCC, 2006).

*Fatores externos ao aterro* - Condições ambientais externas ao aterro relacionadas principalmente ao clima local, como temperatura e precipitação interferem na produção de biogás (EL-FADEL; FINDIKAKIS; LECKIE, 1997). Os resíduos na América Latina e Caribe, por exemplo, possuem mais matéria orgânica e teor de umidade do que na Europa e América do Norte, o que permite supor que gerem biogás em maiores taxas (BANCO MUNDIAL, 2004). Maciel (2009) classifica os fatores de geração de gases segundo exposto na Tabela 3.

Tabela 3 - Principais fatores influenciando a geração de gases.

Geometria e operação do aterro	Características dos resíduos	Ambiente interno	Ambiente externo
--------------------------------	------------------------------	------------------	------------------

- Dimensão do aterro; - Impermeabilização do aterro; - Compactação do lixo; - Tipo de cobertura	- Composição do lixo; - Umidade do lixo; - Peso específico	- Umidade da massa na degradação; - pH nas células; - Temperatura; - Disponibilidade de nutrientes/bactérias;	-Precipitação e infiltração; - Variação da pressão atmosférica; - Temperatura;
--	--	--	--

Fonte: Maciel (2009)

### 4.3 O Aterro controlado do Aurá

Belém é uma das maiores metrópoles da Região Amazônica, possuindo uma população de aproximadamente, 1.393.399 habitantes pelo último censo, e uma área de, 1.059,458 km<sup>2</sup> (IBGE, 2010). A Região Metropolitana de Belém (RMB) é composta por cinco municípios (Belém, Ananindeua, Marituba, Benevides e Santa Bárbara).

Os resíduos produzidos na RMB, por muitos anos, eram destinados ao Aterro controlado do Aurá (figura 2), conhecido popularmente como “Lixão do Aurá”, devido os resíduos terem sido depositados diretamente sobre o solo, sem qualquer técnica de controle ambiental.

Se for contar toda a Região Metropolitana de Belém, cerca de 1.200 toneladas de resíduos foram despejadas diariamente no local, além de rejeitos de fossas sépticas (MATOS et al., 2011). Com isso, o aterro se tornou único meio de sobrevivência para aproximadamente 1500 catadores por vários anos, que trabalhavam sob condições precárias de subsistência e de riscos diversos devido o contato direto com os resíduos, além do elevado índice de violência na área (MATOS et al., 2011; GOMES, 2010).

Ocupando uma área de aproximadamente 160 hectares (BELÉM, 1997), o Aurá foi fundado em 1987, com características de lixão, na localidade denominada Santana do Aurá, distante, 13 km do centro da cidade de Belém e 4 km da Rodovia BR-316. A área se localiza ao lado esquerda do rio Aurá, que por sua vez é afluente do Rio Guamá formando uma microbacia com drenagens de pequeno porte e pouca extensão. A Oeste da área, situados a apenas 1,4km de distância, localizam-se os mananciais Bolonha e Água Preta que abastecem o município de Belém (MORALES, 2002; BAHIA; FENZL; MORALES, 2006).

Em, 1997, com objetivo de transformar o Lixão em Aterro Controlado, e em seguida em Aterro Sanitário, foram implantados alguns projetos para minimizar os problemas ambientais no Aurá, com destaque para o projeto que previa a construção de estruturas para queima de gases, contenção e tratamento do chorume e aceleração da degradação dos resíduos

sem a contaminação direta da água, do solo e do ar. No entanto, com a mudança de prefeitura de Belém, alguns desses projetos foram paralisados, outros foram precarizados por falta de investimento (FREIRE, 2010).

Figura 2- Aterro controlado do Aurá em 2015 (visão de satélite)



Fonte: Google Earth (2015)

Apesar de ser denominado, às vezes como Aterro Sanitário e às vezes como Lixão, o Aurá possui características de Aterro Controlado, pois não há impermeabilização do solo antes da deposição dos RSU, não há cobertura frequente dos resíduos, além de outros requisitos necessários ao Aterro Sanitário. (JARDIM et al., 1995).

O que permaneceu no local foi o sistema de queima de biogás para dar uma destinação ao metano gerado. Parte do Metano produzido era drenado através das células por tubulações e depois queimado por uma usina localizada no centro do Aterro, além da incineração irregular e espontânea de resíduos, que lança na Atmosfera, poluentes orgânicos e inorgânicos prejudiciais à saúde humana e ao equilíbrio do ambiente (SANTOS, 2012).

Considerando a os riscos ambientais causados pelo Aurá, principalmente à bacia hidrográfica do rio Aurá, o perigo à saúde pública, o funcionamento sem licenciamento ambiental, a impossibilidade de elevar o nível das células de deposição, entres outros problemas, no ano de, 2013, foi assinado um Termo de Ajuste de Conduta instituído pelo Ministério público do Pará, no qual as prefeituras de Belém, Ananindeua e Marituba se comprometeram a aplicar um plano de transição na gestão integrada e compartilhada dos resíduos sólidos, e elaborassem um Plano Intermunicipal ou Regional de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos, que previsse tanto a inclusão produtiva do catadores de material reciclável, quanto a recuperação da área do Aurá (PARÁ, 2013).

Como resultado desse processo, o Aurá teve suas atividades oficialmente encerradas como destinação de RSU no ano de, 2015. Porém a emissão do Biogás continuará a ocorrer por várias décadas, o que exige atenção e mostra a importância de compreender a dinâmica das emissões de gases no local.



## 5 ESTIMANDO A GERAÇÃO DE GASES EM ATERROS

Os principais métodos de calcular a emissão de gases de aterros são os modelos de estimativa de geração de biogás em aterros - considerando aqui “Aterro” como qualquer local de deposição de RSU (Lixão, Aterro controlado e Aterro sanitário).

A função dos modelos é fornecer uma estimativa do metano ou do volume total de gás de aterro gerado ao longo do tempo a partir de uma determinada massa de resíduos, representando de forma simplificada as alterações complexas verificadas durante a decomposição dos resíduos, baseando-se no princípio da conservação da massa (ABRELPE, 2013).

Os modelos são usados para dimensionar sistemas de coleta de biogás, avaliar e elaborar projetos de reaproveitamento energético e para regulamentação de emissões (CROVADOR, 2014). Aterros são sistemas muito complexos onde ocorrem simultaneamente várias interações físicas, químicas e biológicas em função das peculiaridades locais e por isso os modelos nem sempre conseguem ser validados de uma forma mais ampla (MACIEL, 2009). O êxito de qualquer modelo depende do grau de certeza necessário, da confiabilidade dos dados de insumo, da experiência de quem analisa os dados e do grau de semelhança entre o local a ser estudado e outros locais que já foram modelados com sucesso (BANCO MUNDIAL, 2004).

De modo geral, a literatura classifica os modelos basicamente em quatro categorias distintas: ordem zero, primeira ordem, multifásicos e segunda ordem (BANCO MUNDIAL, 2004; USEPA, 2005a; IPCC, 2006; MACIEL, 2009; ALDIBERT, 2011; ABRELPE, 2013; FIRMO, 2013). Todos os modelos são aproximações válidas, porém com aplicações diferenciadas.

A cinética de *ordem zero* significa que a geração do biogás é constante ao longo do tempo, ou seja, acréscimo ou retirada de carbono do resíduo não influencia na taxa de decomposição de substrato ou na produção de biogás (MACIEL, 2009; ALDIBERT, 2011; CROVADOR, 2014). É utilizado para estimar as emissões em nível nacional e internacional, com o pressuposto de que não há nenhuma alteração significativa na composição dos resíduos ou na quantidade de material aterrado (ABRELPE, 2013). Vários fatores como idade dos resíduos e concentração de substrato não são considerados nesse modelo (MACIEL, 2009).

O modelo de *primeira ordem* apresenta variabilidade da produção de biogás a partir

de uma quantidade de resíduos que decai exponencialmente ao longo do tempo (IPCC, 2006). Na medida em que uma determinada massa de resíduo decai, também decai de forma exponencial a geração de biogás produzido na sua decomposição (USEPA, 2005a; MACHADO et al., 2009).

A lógica dos modelos *multifase* ou *multicomponentes* é a combinação de vários modelos de primeira ordem para expressar a geração de metano a partir de diferentes frações dos resíduos (CROVADOR, 2014; MACIEL, 2009; FIRMO, 2013). Este modelo considera a equação de decaimento de primeira ordem para a fração de carbono degradável em cada tipo de resíduo, cada um possuindo uma cinética diferenciada de degradação (IPCC, 2006). É o modelo que melhor descreve as emissões de biogás, de aterros, porém exige que se conheça características específicas dos resíduos nos locais de estudo, ou seja, as frações de resíduos, que são definidas pelo seu nível de degradabilidade: rapidamente degradáveis (alimentos); moderadamente degradáveis (papel, papelão, jardim/poda, lodos) e; dificilmente degradáveis (madeira, têxteis, borracha, couro, plástico) (MACIEL, 2009; FIRMO, 2013).

Os modelos de *segunda ordem* exigem que se conheça várias características específicas dos resíduos nos locais de estudo, pois foram propostos para prever emissões de metano com base em variáveis de procedência química e microbiológica complexas da síntese do metano, envolvendo um grande número de reações químicas, o que torna difícil sua aplicação (MACIEL, 2009; FIRMO, 2013; ABRELPE, 2013).

## 5.1 Modelos de Ordem Zero

Os modelos de ordem zero calculam a estimativa para emissão total de uma massa de resíduo. Cada tipo de resíduo tem um Potencial de Geração de Metano ( $L_0$ ), expresso em  $m^3CH_4/Mg_{RSU}$  ou  $kgCH_4/Mg_{RSU}$ , indicando quanto metano é gerado a partir de uma determinada massa de RSU. Dessa forma, o modelo de ordem zero é baseado na equação a seguir.

$$V_{CH_4} = L_0 M_{RSU} \quad (\text{Equação 1})$$

onde  $V_{CH_4}$  é o volume (ou massa) de  $CH_4$  gerado a partir de uma massa total de RSU  $M_{RSU}$ . Esse resultado é independente do tempo, pois passado tempo suficientemente longo, todo o RSU será decomposto. Alguns modelos estimam o fluxo, dividindo  $V_{CH_4}$  pelo tempo de vida do RSU. Porém, quando se fala em modelos, não se fala tanto nas equações quanto se fala nos seus parâmetros, pois elas são essencialmente as mesmas. Um modelo de ordem zero é na

verdade uma prescrição para escolha de  $L_0$  dado o tipo de resíduo e as condições climáticas, como será mostrado na seção seguinte.

## 5.2 Modelos de Primeira Ordem

Os modelos de decaimento de primeira ordem ou simplesmente modelo FOD (*First Order Decayment*) são os métodos mais aplicados para o cálculo das emissões de gases de aterros (ABRELPE, 2013).

Os modelos de primeira ordem mais conhecidos e aplicados são os propostos pela Agência de Proteção Ambiental Americana (USEPA) e pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC). As equações apresentadas por todos esses modelos têm em comum o fato de seguirem a cinética de primeira ordem e considerar os mesmos parâmetros de entrada (USEPA, 1991, 2005b; BANCO MUNDIAL, 2004; IPCC, 2006):

- a) Massa de resíduos depositada no aterro anualmente;
- b) Tempo de atividade do aterro e após seu fechamento;
- c) Taxa constante de geração de metano ( $k$ );
- d) Potencial de geração de metano ( $L_0$ ).

As variações entre os modelos ocorrem basicamente pela adoção de fatores de normalização e/ou de conversão de unidades (MACIEL, 2009; IPCC, 2006).

O Modelo FOD é considerado simples, de fácil aplicação e o mais empregado por agências reguladoras e por instituições financeiras que apoiam projetos de aproveitamento do biogás de aterros nas Américas do Norte e do Sul e no Caribe (BANCO MUNDIAL, 2004). A seguinte equação é a base para todos os modelos de primeira ordem

$$Q_{CH_4} = k \cdot L_0 \cdot m_i \cdot e^{-kt}$$

onde  $Q_{CH_4}$  é o metano produzido no ano  $i$  ( $m^3/ano$ );  $k$  é a taxa constante da geração de metano ( $ano^{-1}$ );  $L_0$  é o Potencial de Geração de Metano ( $m^3CH_4/MgRSU$ );  $m_i$  é massa de resíduo despejada no ano  $i$  ( $MgRSU$ ) e;  $t$  é o tempo (anos) de decomposição do resíduo.

A equação está em função da geração de  $CH_4$  por este ser considerado o principal gás gerado nos aterros. Considerando que o Metano representa cerca de 50% da composição do gás dos aterros, para obter a geração total de gases de um aterro, basta multiplicar o valor obtido por 2 (USEPA, 2005b; IPCC, 2006; DI BELLA; DI TRAPANI; VIVIANI, 2011).

A taxa constante de geração de metano ( $k$ ) representa a taxa de decomposição biológica de primeira ordem a qual o metano é gerado depois da colocação do resíduo. Esta

constante é influenciada pelo teor de umidade, pela disponibilidade de nutrientes, pelo pH e pela temperatura (USEPA, 1991; USEPA, 1991; USEPA, 2005b; IPCC, 2006; MACHADO et al., 2009).

O Potencial de Geração de Metano ( $L_0$ ) representa a produção total de Metano ( $m^3$  de  $CH_4$  por tonelada de resíduo -  $m^3CH_4/MgRSU$ ). O valor de  $L_0$  é estimado com base no teor de carbono no resíduo e na fração de carbono que se decompõe (USEPA, 1991; 2005b; IPCC, 2006; MACHADO et al., 2009).

Os valores de  $k$  e de  $L_0$  dependem das condições específicas do aterro em questão e sua localização geográfica. Quanto maior for o valor desses parâmetros, maior será a geração de biogás nos aterros (USEPA, 2005a).

Matematicamente, esses modelos calculam a taxa de geração de Metano quando este é gerado em cada intervalo de tempo, baseando-se na reação química de primeira ordem simplificada:  $C \rightarrow CH_4$ , onde “C” representa o Carbono nos compostos orgânicos em geral produzindo Metano. A equação da cinética de, 1ª ordem dessa reação é  $\frac{d[CH_4]}{dt} = k[C]$ , onde  $[CH_4]$  é a concentração de  $CH_4$  ( $g/ml$  ou  $ml/ml$ ) e  $[C]$  é a concentração de carbono orgânico. Esta variação de  $[CH_4]$  depende da concentração de carbono orgânico e da taxa de decaimento da matéria orgânica  $k$ .

Essa ideia é transplantada para a produção de metano a partir de uma massa  $M$  de RSU. Primeiro assumimos que a massa  $M$  de RSU é proporcional à massa de carbono orgânico degradável  $M_{cod}$ , assim, a taxa de produção de metano é proporcional à massa de RSU,  $\frac{dM_{CH_4}}{dt} \propto M$ . Considerando que a massa de  $CH_4$  gerada é proporcional à massa de carbono consumida,  $dM_{CH_4} \propto -dM$ , teremos então que

$$\frac{dM}{dt} = -kM$$

onde  $k$  é a “taxa de decaimento” efetiva.

Essa equação tem solução analítica simples:

$$\frac{dM}{dt} = -kM \rightarrow \frac{dM}{M} = -kdt \rightarrow M = M_0 e^{-kt}$$

que é o decaimento exponencial da massa de RSU, onde  $M_0$  é a massa de RSU inicial e  $t$  é o tempo decorrido.

Para saber a massa de  $CH_4$  emitida, veja que a massa degradada de RSU é  $M_{deg} = M_0 - M$ , e dessa massa, apenas  $L_0 M_{deg}$  se converte em  $CH_4$ , logo,

$$M_{CH_4}(t) = L_0 M_{deg} = L_0 (M_0 - M_0 e^{-kt}) = L_0 M_0 (1 - e^{-kt})$$

A partir dessa fórmula, massa total de metano gerada é

$$M_{CH_4}(\infty) = L_0 M_0$$

o que é essencialmente a predição dos modelos de ordem zero.

O fluxo instantâneo de metano, a massa de metano gerada por tempo, é dado pela derivada em relação ao tempo da massa gerada:

$$Q_{CH_4}(t) = \frac{dM_{CH_4}}{dt} = L_0 M_0 k e^{-kt}$$

A massa total gerada de metano também pode ser calculada integrando o fluxo desde do depósito do RSU,  $t = 0$ , até um futuro distante,  $t = \infty$ ,

$$\int_0^{\infty} Q_{CH_4}(t) dt = \frac{-k L_0 M_0}{k} e^{-kt} = L_0 M_0$$

Portanto, na medida em que a massa disponível de resíduo se degrada por completo a emissão de metano tende a zero.

### 5.2.1 Modelo LandGEM 3.02

Abreviação de *Landfill Gas Emissions Model*, o LandGEM é um software desenvolvido pela Agencia de Proteção Ambiental Americana - USEPA para quantificação das emissões de gás de aterro nos Estados Unidos, tendo como base a cinética de primeira ordem, sendo a versão 3.02 de, 2005 a mais atual (USEPA, 2005a). Trata-se de um software bastante empregado no Brasil e no mundo, onde tem sido utilizado pelo Ministério do Meio Ambiente em estudos para avaliar potencial de geração de energia nos municípios brasileiros (VAN ELK, 2007). A vantagem desse modelo é o fato de permitir o cálculo anual das emissões, e perceber a evolução das emissões de gás a partir dos diferentes fluxos anuais de resíduo (USEPA, 2008)

Para estimar a quantidade de gás gerado, o software LandGEM necessita dos seguintes parâmetros de entrada: 1) capacidade de projeto do aterro; 2) Quantidade de resíduos no local ou a taxa de aceitação anual; 3) A taxa constante de geração de metano  $k$ ; 4) O potencial de geração de metano  $L_0$  e; 5) O número de anos de deposição de resíduos (USEPA, 2005b; MACHADO et al., 2009; DI BELLA; DI TRAPANI; VIVIANI, 2011).

A equação que expressa o cálculo da geração de gases em aterros não controlados (lixões) pelo LandGEM é apresentada a seguir:

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^{0,9} k L_0 \left(\frac{M_i}{10}\right) e^{-kt_{ij}} \quad (\text{Equação 2})$$

onde,  $QCH_4$  é a geração anual de Metano no ano do cálculo ( $m^3/ano$ );  $i$  representa o ano, indo de  $i=1$  (ano de implementação) até  $i=n$ ;  $n$  é o ano do cálculo do inventário;  $j$  representa o tempo, em décimos de anos, possibilitando a subdivisão do ano em, 10 partes, e assume valores entre 0 (início do ano) e 0,9 (último décimo do ano), indo em incremento de 0,1;  $k$  é a taxa de geração de metano ( $ano^{-1}$ );  $L_0$  é o potencial de geração de metano ( $m^3CH_4/MgRSU$ );  $M_i$  é massa de RSU recebida no ano  $i$  ( $Mg$ ) e;  $t$  é a idade da seção  $j$  da massa  $M_i$  dos resíduos recebidos no ano  $i$  (anos com decimal, ex: 3,2 anos).

Os valores de  $k$  podem ser determinados experimentalmente, contudo também há valores pré-estabelecidos, propostos pelo Banco Mundial a partir de diretrizes da USEPA, que tomam com principal critério os índices de precipitação pluviométrica da região do aterro (BANCO MUNDIAL, 2004), mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Faixas de valores sugeridos para a constante k em função de faixas de precipitação anual

Precipitação Anual	Valores de k ( $ano^{-1}$ )		
	Relativamente inerte	Moderadamente degradável	Altamente degradável
<250 mm	0,01	0,02	0,03
>250 até <500 mm	0,01	0,03	0,05
>500 até <1000 mm	0,02	0,05	0,08
>1000 mm	0,02	0,06	0,09

Fonte: Banco Mundial (2004)

Valores padrão sugeridos pra  $L_0$  são mostrados na Tabela 5. O valor padrão para o que se chama de “aterro convencional” é  $170 m^3CH_4/MgRSU$ , por ser uma média entre os valores do resíduo considerado moderadamente degradável nos Estados Unidos (BANCO MUNDIAL, 2004; USEPA, 2005a, 2005b).

Tabela 5 - Valores do Potencial de Geração de Metano ( $L_0$ ) adotados pela USEPA.

Categorização do Lixo	Valor Mínimo para $L_0$ ( $m^3CH_4/MgRSU$ )	Valor Máximo para $L_0$ ( $m^3CH_4/MgRSU$ )
Relativamente inerte	5	25
Moderadamente degradável	140	200
Altamente degradável	225	300

Fonte: Banco Mundial (2004).

As diretrizes do modelo LandGEM e as orientações técnicas para uso do software são de domínio público. O programa pode ser baixado pelo endereço eletrônico: <https://www3.epa.gov/ttn/catc/products.html#software>.

### 5.2.2 Modelo do IPCC

O Modelo adotado pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas - IPCC (proposto inicialmente em, 1996, e atualizado em, 2006) também segue o princípio de cinética de primeira ordem, porém considera que os diferentes componentes dos resíduos (Papel e papelão, Têxtil, Alimentos, Madeira, Borra e Couro) possuem diferentes velocidades de degradação, sendo também chamado de modelo multicomponente (IPCC, 2006; MACIEL, 2009; DI BELLA; DI TRAPANI; VIVIANI, 2011; FIRMO, 2013).

As equações que descrevem  $L_0$  podem ser expressas de várias formas, assim como as equações que descrevem seus parâmetros principais. O formato a seguir foi utilizado pela ABRELPE (2013), na elaboração do Atlas Brasileiro de Emissões de Gases de Efeito Estufa e Potencial Energético na Destinação de Resíduos:

$$Q_{(t)} = \sum_x [(A \cdot k \cdot RSU_{(x)} \cdot L_{0(x)} \cdot e^{-k \cdot (t-x)}) - R_{(x)}] \cdot (1 - OX) \quad (\text{Equação 3})$$

onde,  $Q_{(t)}$  é a quantidade de metano gerado ao ano  $t$  ( $GgCH_4$  /ano), ou seja, o fluxo de metano neste ano;  $A$  é um Fator de normalização definido por  $A = \frac{1-e^{-k}}{k}$ ; onde  $k$  é taxa constante de geração de  $CH_4$  ( $ano^{-1}$ );  $x$  é a quantidade de anos os quais os dados foram considerados;  $t$  é o ano do inventário;  $RSU_{(x)}$  é a quantidade total de resíduos depositados no ano  $x$  ( $Gg$ );  $R(x)$  representa o Metano recuperado ( $GgCH_4$  /ano),  $OX$  é o Fator de oxidação do Metano (adimensional). O cálculo do potencial de geração de metano  $L_0$  ( $GgCH_4$  / $GgRSU$ ), parâmetro que está relacionado à composição do resíduo, especialmente com a matéria orgânica degradável, pode ser realizado pela seguinte equação (IPCC, 2006):

$$L_{0(t)} = MCF_{(t)} \cdot DOC_{(t)} \cdot DOC_f \cdot F \cdot \frac{16}{12} \quad (\text{Equação 4})$$

onde  $MCF_{(t)}$  é o fator de correção do metano (adimensional);  $DOC_{(t)}$  é o Carbono orgânico degradável ( $gC.gRSU^{-1}$ );  $DOC_f$  é a fração do  $DOC$  que se decompõe (adimensional);  $F$  representa a fração de Metano no Biogás (adimensional);,  $16/12$  expressa a razão de

conversão de Carbono em Metano (adimensional)<sup>1</sup>.

Os parâmetros de entrada desse modelo dependem de características climáticas (principalmente precipitação), quantidade de resíduo, composição do resíduo, qualidade de operação do aterro e quantidades de CH<sub>4</sub> recuperada e oxidada (ABRELPE, 2013). Caso não se conheça esses dados a partir de estatísticas locais ou regionais, o IPCC sugere valores padrão de alguns desses parâmetros e de outros que deles dependem, como a constante de degradação *k*, o teor de carbono orgânico degradável (relacionado ao *L<sub>0</sub>*), fator de correção e fator de oxidação. Estes valores padrão são sugeridos como base na localização geográfica da região onde se localiza o aterro ((BANCO MUNDIAL, 2004; IPCC, 2006; WANGYAO et al., 2010).

Com relação ao parâmetro DOC, seu valor é estimado com base na composição dos resíduos e pode ser calculado a partir de uma média ponderada do teor de carbono degradável dos vários tipos de resíduos (IPCC, 2006). A variável DOC pode ser definida da seguinte forma:

$$DOC_{(t)} = \sum_i f_i E_i, \quad \text{(Equação 5)}$$

onde *f<sub>i</sub>* é a fração do resíduo do tipo *i*, *E<sub>i</sub>* é o fator de emissão do resíduo do mesmo tipo, dado em gC/gRSU. Na Tabela 6, estão discriminados os tipos de resíduos e os respectivos fatores de emissão, segundo o IPCC.

Tabela 6 - Faixas de valores de Carbono Orgânico Degradável (DOC) para as frações de resíduos sólidos urbanos.

Fração do resíduo correspondente ( <i>f<sub>i</sub></i> )	Teor de DOC (gC/gRSU)
Papel e papelão	0,40 (de 0,36 a 0,45)
Têxtil	0,24 (de 0,20 a 0,40)
Alimentos	0,45
Madeira	0,47
Borra e Couro	0,07
Plástico	-
Metal	-

<sup>1</sup> A massa atômica do elemento químico Carbono (C) é 12 e a massa molar do Metano (CH<sub>4</sub>) é 16. Para converter uma determinada massa de Carbono em termos de massa de Metano basta multiplicar seu valor por 16/12.



Fração do resíduo correspondente ( $f_i$ )	Teor de DOC (gC/gRSU)
Vidro	-
Outros	-

Fonte: IPCC (2006).

Os valores padrão para o Fator de Correção de Metano (MCF), variável relacionada à forma de gerenciamento dos locais de destinação de resíduos, são expressos na Tabela 7.

Tabela 7- Valores padrão para o Fator de Correção de Metano (MCF) segundo o tipo de local de deposição de resíduos sólidos urbanos.

Tipo de local	Valores padrão para o MCF	Fonte
Gerenciado - anaeróbio	1	IPCC (2006)
Gerenciado - semi-aeróbio	0,5	
Não gerenciado - profundo (> 5 m de resíduo)	0,8	
Não gerenciado - Raso (< 5m de resíduo)	0,4	
Não categorizado	0,6	
Aterro Sanitário	1,0	ABRELPE (2013)
Aterro Controlado	0,8	
Lixão	0,4	

Fonte: ABRELPE (2013)

O Fator de Oxidação reflete a quantidade de  $\text{CH}_4$  dos resíduos que é oxidada no solo ou outro material cobrindo o resíduo.

Tabela 8 - Valores padrão para o Fator de Oxidação do Metano (OX) para os resíduos sólidos urbanos segundo o tipo de local de deposição.

Tipo de Local	Valores padrão do fator de oxidação (OX)
Gerenciados não coberto, não-gerenciados e não-categorizados	0
Gerenciados cobertos com material de oxidação de $\text{CH}_4$	0,1

Fonte: IPCC (2006).

A constante  $k$  está relacionada ao tempo necessário para que a parcela de Carbono

Orgânico Degradável (DOC) do resíduo depositado reduza devido à decomposição. Seu valor é determinado por fatores associados à composição do resíduo e às condições da região onde se localiza o aterro ou lixão, como por exemplo: a composição do resíduo, a temperatura média anual, a precipitação média anual e o potencial de evapotranspiração (IPCC, 2000, 2006; MACIEL, 2009; FIRMO, 2013). Para utilizar os valores padrão para  $k$ , é preciso conhecer informações sobre as o clima da região onde o estudo é realizado, como Temperatura Média Anual (MAT), Precipitação média anual (MAP) e Potencial de Evapotranspiração (PET), tal como é expresso na tabela 9.

Tabela 9 - Valores padrão da Constante de Geração de Metano ( $k$ ) de acordo com os tipos de resíduo e condições climáticas da região: Temperatura Média Anual (MAT), Precipitação média anual (MAP) e Potencial de Evapotranspiração (PET).

	Zona Climática							
	Clima boreal e temperado				Clima tropical			
	MAT $\leq$ , 20°C				MAT $\leq$ , 20°C			
PET - Evapotranspiração potencial	Seco (MAP/PET <, 1)		Úmido e molhado (MAP/PET >, 1)		Seco (MAP/PET <, 1000mm)		Úmido e molhado (MAP/PET $\geq$ , 1000mm)	
Tipo de Resíduo	padrão	faixa	padrão	faixa	padrão	faixa	padrão	faixa
Papel e têxtil	0,04	0,01 - 0,05	0,06	0,05 - 0,07	0,045	0,04 - 0,06	0,07	0,06 - 0,085
Resíduos de madeira e palha	0,02	0,01 - 0,03	0,03	0,02 - 0,04	0,025	0,02 - 0,04	0,035	0,03 - 0,05
Outros putrescíveis (orgânicos não-alimentares)	0,05	0,04 - 0,06	0,1	0,06 - 0,1	0,065	0,05 - 0,08	0,17	0,15 - 0,2
Resíduos de jardim e parques	0,05	0,04 - 0,06	0,1	0,06 - 0,1	0,065	0,05 - 0,08	0,17	0,15 - 0,2
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
Lodo de esgoto	0,06	0,05 - 0,08	0,185	0,1 - 0,2	0,085	0,07 - 0,1	0,4	0,17 - 0,7
Resíduos misturados	0,05	0,04 - 0,06	0,09	0,08 - 0,1	0,065	0,05 - 0,08	0,17	0,15 - 0,2

Fonte IPCC (2006) adaptado por ABRELPE (2013).

O valor recomendado para o parâmetro  $F$ , que representa a fração de metano no biogás é 0,5, justificado pelo fato de que a maior parte dos resíduos gera um gás com aproximadamente 50% de  $\text{CH}_4$  (IPCC, 2006).

O parâmetro  $DOC_f$ , que expressa a fração de carbono orgânico degradável que se decompõe, depende de muitos fatores, tais como temperatura, humidade, pH, composição dos resíduos, etc (IPCC, 1991, 2006; ABRELPE, 2013). É recomendado se utilizar, para essa variável, valores estimados a partir de dados nacionais e/ou locais. Entretanto o IPCC sugere um valor padrão para  $DOC_f$  de 0,5 (IPCC, 2006).

## 6 MATERIAL E MÉTODOS

### 6.1 Características dos RSU da Região Metropolitana de Belém

Um estudo promovido pela Prefeitura de Belém (BELÉM, 1997), estimou que a geração de resíduos urbanos do Município de Belém era de 1.035 toneladas por dia, incluindo os resíduos domiciliares, hospitalares, feiras e mercados e parte dos entulhos. A composição dos resíduos de Belém, visto na Tabela 4, expressa que o teor de matéria orgânica gira em torno de 58%, enquanto que o teor de recicláveis, incluindo: papel e papelões, plásticos, metais e vidros é da ordem de 36%.

Tabela 10 - Composição dos Resíduos Sólidos Urbanos do município de Belém.

Componentes	% em peso (base úmida)
Matéria Orgânica	58
Papel e Papelão	14
Plásticos finos e grossos	18
Metais	2
Têxteis, couro e borracha	4
Vidro, terra e pedra	2
Madeiras	1
Outros	1
TOTAL	100

Fonte: BELÉM (1997).

Esses dados servem de subsídio na modelagem das emissões de metano no Aurá. Cada fração orgânica dos resíduos apresenta valores diferentes para os parâmetros principais dos modelos de primeira ordem aplicados neste estudo ( $k$ ,  $DOC$  e  $L_0$ ).

### 6.2 Modelagem das emissões de CH<sub>4</sub> do Aurá

Para realizar a avaliação do impacto dos Lixão do Aurá na questão climática global, foi estimada a emissão de gases de efeito estufa, dando ênfase ao Metano, gerados pelos resíduos da Região Metropolitana de Belém lá depositados. Neste trabalho foram aplicados dois modelos de primeira ordem para executar tais simulações: LandGEM 3.02 e IPCC.

Os resultados são comparados entre si, para gerar uma estimativa da variabilidade

entre os modelos.

### 6.3 Diretrizes para aplicação do modelo IPCC

O modelo do IPCC utiliza um *software* que pode ser encontrado a partir do link [www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html](http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html) na forma de planilha eletrônica Excel™, que permite aproximar as estimativas de emissão de metano e biogás para a realidade do aterro estudado. Essa planilha é preparada para ser utilizada por gestores públicos para estimativas de emissões de carbono e elaboração de inventários nacionais e regionais de emissões.

Os parâmetros de entrada da planilha levam em conta as condições climáticas do aterro (se seco ou úmido), as frações de resíduos com diferentes quantidades de carbono orgânico degradável (DOC), fatores relacionados a biodegradabilidade do metano (MCF), movimento do gás, e fator de oxidação (OX). Também há opções de se atribuir valores padrões regionais para as variáveis  $k$  e  $DOC$ , consistentes com os valores nas Tabelas 5 e 6.

Na primeira sessão da planilha o usuário é instruído a compreender o software, fornecendo instruções de uso e algumas informações sobre a teoria.

Na segunda sessão é possível adequar a simulação para a região de interesse e modificar os parâmetros de entrada  $k$  e  $DOC$  para a estimativa considerar o clima da região (tropical seco ou úmido, temperado seco ou úmido para a América do Sul) e se a massa de resíduo é única ou se é fracionada em componentes (orgânico, jardim, fraldas, plástico e materiais inertes). No presente estudo foram realizadas simulações utilizando valor geral do  $DOC$ , assim como outras considerando as respectivas frações ou componentes do resíduo.

Na terceira sessão o usuário ajusta o Fator de Correção de Metano - MCF de acordo com o tipo gerenciamento do aterro ou indústria e distribuição da massa de resíduo que pode ser fracionada em até, 100% (semi-aeróbico, gerenciado, não-gerenciado, profundo ou raso). Esta seção pode abranger uma estimativa nacional ou regional para vários aterros, onde os valores variam consideravelmente de acordo com o seu tipo de gerenciamento. No caso do Aurá, o valor do MCF adotado foi 0,8, considerando o Aurá como aterro profundo e sem controle de emissões.

A quarta sessão se refere a produção de resíduo, dada a população e sua produção per capita anual. O sistema calcula a massa do resíduo total, mas aqui o usuário especifica as frações para cada componente do resíduo, ou se deseja utilizar valores padrão do modelo. Neste estudo, as simulações compreenderam tantos valores padrão para estas frações do

resíduo sugeridos pela planilha quanto valores disponibilizados pela Prefeitura Municipal de Belém a partir de estudos gravimétricos do resíduo (BELÉM, 1997).

As demais sessões o usuário encontra os resultados da disposição do resíduo, fator de oxidação, emissão total de metano gerada pelo aterro e outras informações voltadas para a construção de estimativas de estoque de carbono.

Neste sentido, este trabalho realizou várias simulações, nas quais foram utilizados tanto os valores padrão sugeridos pela planilha do *software* quanto valores adaptados a partir de dados locais com intuito de verificar os diferentes cenários de emissão a partir de ajustes nos parâmetros do modelo.

#### **6.4 Diretrizes para aplicação do modelo LandGEM 3.02**

O Modelo do LandGEM também pode ser encontrado na forma de planilha eletrônica Excel™, já preparada para ser utilizada por gestores de aterros sanitários ou gestores públicos. Ela é especificamente pensada para a utilização nos aterros sanitários dos Estados Unidos da América, onde considera a legislação local.

A aplicação desse modelo é relativamente simples. Na primeira aba da planilha especificam-se os valores de  $k$ ,  $L_0$  e de massa de resíduo depositada por ano. Numa outra aba obtém-se os resultados da emissão de metano. Esta é uma ferramenta de escopo limitado, pois apenas integra a Equação 2. Não há opções de escolhas regionais, ou de frações de resíduo. Isso fica para o valor de  $k$  e  $L_0$  utilizados, que levam em conta a região.

As opções padrão do LandGem para  $k$  e  $L_0$  se dividem entre Padrão CAA (Clean Air Act) árido ( $L_0=170 \text{ m}^3\text{CH}_4 / \text{MgRSU}$ ,  $k=0.04 \text{ ano}^{-1}$ ); Padrão CAA Regular ( $L_0=170 \text{ m}^3\text{CH}_4 / \text{MgRSU}$ ,  $k=0,17 \text{ ano}^{-1}$ ), Padrão Inventário árido ( $L_0=100 \text{ m}^3\text{CH}_4 / \text{MgRSU}$ ,  $k=0.04$ ), Padrão Inventário Convencional ( $L_0=100 \text{ m}^3\text{CH}_4 / \text{MgRSU}$ ,  $k=0,04 \text{ ano}^{-1}$ ), Padrão Inventário Úmido ( $L_0=96 \text{ m}^3\text{CH}_4 / \text{MgRSU}$ ,  $k=0.17 \text{ ano}^{-1}$ ), ou especificado pelo usuário. Aqui, CAA (*Clean Air Act*) é uma legislação ambiental estadunidense que define valores para  $k$  e  $L_0$ . *Inventário* é o resultado de observações e estudos em um grande apanhado de aterros sanitários nos EUA.

Várias simulações foram realizadas no Aurá a fim de verificar o comportamento das emissões com dados padrão e com dados adaptados para a região metropolitana de Belém.

É preciso considerar que o LandGEM foi construído para estimar as emissões nos Estados Unidos, ou seja, em condições climáticas e tipos de gerenciamento de resíduos bem diferentes da Região Amazônica, o que pode superestimar ou subestimar as emissões, caso se

utilize os valores padrão dos parâmetros do modelo.

Neste trabalho, além dos valores sugeridos pelo *software* foram utilizados valores de  $k$  e  $L_0$  sugeridos pelo IPCC, que leva em conta tanto a região, quanto as frações de resíduo. No caso do  $L_0$ , o valor foi calculado segundo a Equação 4.

Em outras simulações, levou-se em consideração o Fator de Correção do Metano - MCF, ajuste proposto pelo IPCC, em que foi considerado valor 0,8 (aterro controlado profundo).

## 7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 7.1 Estimativa da Geração de resíduos na RMB

A maneira usual deve se estimar a geração de RSU é através da população, onde se considera que cada habitante produz, em média, uma certa quantidade de resíduo por dia (ou no). Na Amazônia estima-se que esse valor seja de aproximadamente 650g/hab./dia (ou 237 Kg/hab./ano) (IBGE, 2010).

Tabela 11- Estimativas da população e geração de resíduos na Região Metropolitana de Belém no período de 1990 a 2016.

Ano	População	Massa (Ton/ano)
1990	1.302.505,27	309.019,38
1991	1.332.840,00	316.216,29
1992	1.362.123,20	323.163,73
1993	1.391.406,40	330.111,17
1994	1.420.689,60	337.058,61
1995	1.449.972,80	344.006,05
1996	1.479.256,00	350.953,49
1997	1.546.595,00	366.929,66
1998	1.613.934,00	382.905,84
1999	1.681.273,00	398.882,02
2000	1.748.612,00	414.858,20
2001	1.782.601,86	422.922,29
2002	1.816.591,71	430.986,38
2003	1.850.581,57	439.050,48
2004	1.884.571,43	447.114,57
2005	1.918.561,29	455.178,67
2006	1.952.551,14	463.242,76
2007	1.986.541,00	471.306,85
2008	1.982.235,67	470.285,41
2009	1.977.930,33	469.263,97
2010	1.973.625,00	468.242,53
2011	1.991.739,33	472.540,16
2012	2.009.853,67	476.837,78
2013	2.027.968,00	481.135,41
2014	2.046.082,33	485.433,03
2015	2.064.196,67	489.730,66
2016	2.082.311,00	494.028,28

Fonte: IBGE (2010)

Para estimar a população, foram utilizados os censos do IBGE de 1980, 1991, 2000 e

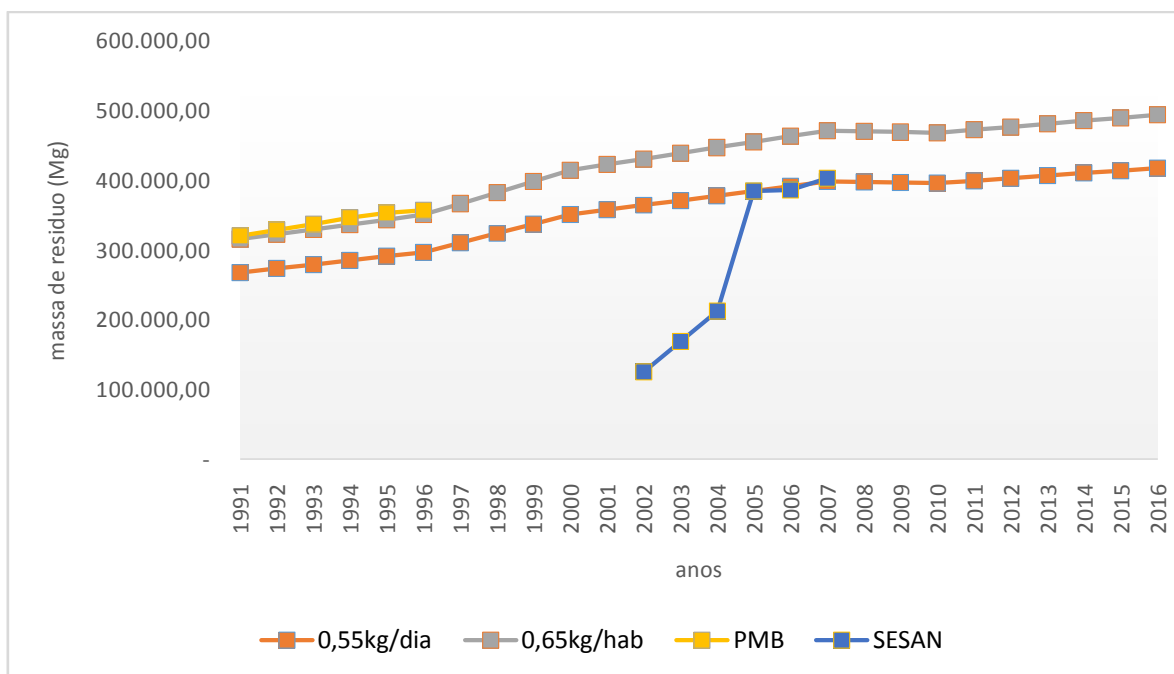


2010, que fornecem a contagem da população para os municípios da RMB. Para os outros anos a foi feita uma interpolação linear (colocando uma reta entre cada um dos pontos conhecidos e tirando assim os valores intermediários) para estimar a população.

Para validar a estimativa de massa de RSU, os resultados foram comparados com duas outras fontes. Primeiro com dados estimados apresentados no Relatório da Prefeitura Municipal de Belém sobre o Aurá (BELÉM, 1997), que estima valores até 1996. Também foi feita a comparação com dados fornecidos pela Secretaria de Saneamento de Belém (SESAN) de planilhas de coleta de resíduo, com valores medidos da massa depositada no aterro do Aurá pelos caminhões das várias companhias de coleta.

A compilação desses dados, os dados do Relatório do Aurá, e a nossa estimativa do resíduo gerado estão expressos na figura 3. Foram utilizadas duas estimativas de produção de resíduos, uma com 550g/hab./dia, e outra com 650g/hab./dia.

Figura 3- Estimativas da geração de resíduos na Região Metropolitana de Belém no período de 1991 a 2016 comparado aos dados da SESAN e PMB.



Fonte: Do autor

A produção de resíduos entre 300 e 450 mil toneladas por ano (usando 650g/hab./dia) é consistente com os dados do Relatório da Prefeitura de Belém (BELÉM, 1997). Já os dados da SESAN apresentam inicialmente valores muito abaixo dos valores estimados nos anos de 2002, 2003 e 2004 e, a partir de 2005 até 2007, tornam-se consistentes

com a estimativa de 550g/hab./dia. Desta forma estimativa utilizada neste trabalho é consistente com dados utilizados oficialmente pelo governo.

Neste sentido, pode-se inferir que provavelmente os dados do Relatório da Prefeitura de Belém, de 1991 a 1996 foram na verdade estimativas da massa de RSU, usando a produção de 650g/hab./dia. Já os dados da SESAN parecem se basear em pesagem real dos resíduos até o ano de 2004, depois disso parecem ser novamente, meras estimações baseadas na produção de 550g/hab./dia.

## 7.2 Simulações do IPCC

No total, foram realizadas cinco simulações no *software* do IPCC para as emissões de CH<sub>4</sub> a partir dos resíduos depositados Aurá, nas quais foram utilizados valores padrão dos parâmetros do modelo do IPCC (América do Sul) assim como as modificações para adaptar à Região Metropolitana de Belém. A mesma massa de RSU foi utilizada em todas as simulações. Em nenhuma simulação foi considerada a produção de resíduos de indústrias ou qualquer coleta de biogás no Aterro. As cinco simulações são descritas a seguir:

1. *IPCC-REG-BULK* – Foram utilizados valores padrão do IPCC para a região da América do Sul para “k”, “DOC” e taxa de produção de resíduo (kg/hab./dia). Não foram consideradas as frações de resíduo, mas sim um único valor de *DOC* e *k* que consideram o resíduo como um todo (o chamado “bulk”). Neste caso se utiliza “cegamente” a planilha, pois não se avalia os dados locais de fato, mas sim valores propostos pelo banco de dados do próprio *software* a partir de estimativas regionais.

2. *IPCC-REG-COMP* – Semelhante a simulação 1, porém aqui foi considerado que o resíduo se divide em frações, com *DOC* diferente para cada fração. Aqui as frações de resíduo são estipuladas pelo próprio modelo para a região da América do Sul, ou seja, novamente uma utilização “cega” da planilha.

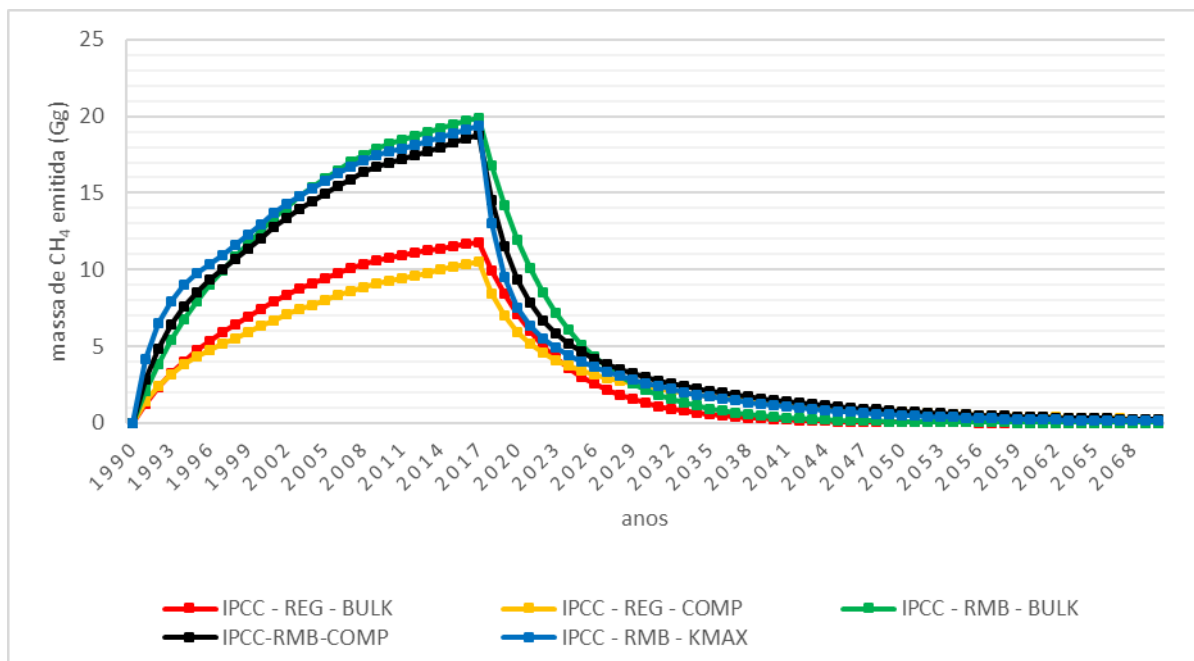
3. *IPCC-RMB-BULK* – Aqui se utilizou a taxa de produção de resíduo como sendo 650g/hab./dia, o valor para Região Metropolitana de Belém (IBGE, 2010). Também foi considerado que o resíduo é depositado em um Aterro Controlado profundo com MCF de 0,8.

4. *IPCC-RMB-COMP* – Aqui, além da taxa de produção de 650g/hab./dia, e do MCF de 0,8, foram consideradas as frações do resíduo estipuladas pelo Relatório da prefeitura de Belém (BELÉM, 1997) sobre os resíduos destinados ao Aurá.

5. *IPCC-RMB-KMAX* – Similar à simulação 4, porém considerando o *k* maior

possível para cada tipo de resíduo, a fim de testar a dependência desse parâmetro no resultado. Os resultados das cinco simulações aparecem na figura 4, a seguir.

Figura 4 - Estimativas de emissões de CH<sub>4</sub> no Aurá realizadas pelas 5 simulações do software do IPCC.



Fonte: Do autor

A emissão total de metano gerado pelo Aurá atinge seu nível máximo em 2017, um ano após o ano de encerramento do aterro e, a partir de então, passa a reduzir os níveis de emissão. Na medida em que o gás vai sendo gerado, uma massa de resíduo está sendo degradada. Esta massa vai decaindo ao longo dos anos até atingir níveis irrelevantes de emissão.

É possível perceber que as simulações realizadas considerando padrões regionais do IPCC expressam menores emissões quando comparadas as simulações que utilizam dados da Região Metropolitana de Belém. Como os valores propostos pelo IPCC são estimativas a partir de padrões regionais da América do Sul, e que o presente estudo contempla apenas um aterro, é possível inferir que há maior confiabilidade nos resultados dos dados locais e que os valores padrão subestimam as emissões. O próprio IPCC (2006) propõe que é mais recomendado utilizar dados locais, quando esses são considerados confiáveis.

A velocidade de decaimento (relacionada à constante  $k$ ) é superior nas simulações para a Região Metropolitana de Belém, mostrando que, como os resíduos degradam

rapidamente, é preciso se tomar medidas de controle de emissão com certa rapidez, caso contrário todo o biogás terá sido emitido para Atmosfera.

### 7.3 Simulações do LandGEM 3.02

Considerando as várias possibilidades de combinações de parâmetros na modelagem, foram realizadas 7 simulações no Aurá usando o *software* da USEPA, abaixo descritos:

1. *LandGEM-CAA* – Uso “desavisado” da planilha com as primeiras opções disponíveis.  $L_0=170 \text{ m}^3\text{CH}_4 / \text{MgRSU}$  e  $k=0,05 \text{ ano}^{-1}$ . Um padrão para estimar emissões (no limite superior) em aterros sanitários nos EUA.

2. *LandGEM Inventário Convencional* – Também uma opção padrão do modelo, usando valores:  $L_0=100 \text{ m}^3\text{CH}_4 / \text{MgRSU}$  e  $k=0,04 \text{ ano}^{-1}$ . Esta opção se refere a uma estimativa a partir de estudos realizados em vários aterros sanitários dos EUA, o que forneceu valores “convencionais” para os parâmetros naquele país.

3. *LandGEM Inventário Úmido* – Opção padrão semelhante a anterior, porém propõe valores dos parâmetros para regiões úmidas:  $L_0=96 \text{ m}^3\text{CH}_4 / \text{MgRSU}$  e  $k=0,7 \text{ ano}^{-1}$ . Nota-se aqui um valor elevado da constante  $k$ , que está relacionada à umidade. Vale lembrar que este clima úmido considerado aqui diz respeito aos EUA, o que não quer dizer necessariamente que pode valer também para a Região Amazônica, que possui clima úmido, porém se localiza em uma faixa tropical e com latitude bem diferente dos EUA.

4. *LandGEM Cust. MCF* – Mesmos parâmetros da simulação 3, porém levando em conta que esse modelo foi pensado para ser utilizado em aterros sanitários, ele poderá não produzir valores adequados para um aterro controlado, como é o caso do Aurá. Um fator que minimiza essa incerteza é o MCF definido pelo IPCC. Para aterros controlados profundos é de 0,8. Assim, para um rápido ajuste, foi multiplicado o valor padrão de  $L_0=96$  por 0,8, obtendo uma estimativa mais realista.

5. *LandGEM Cust. IPCC  $L_0$*  – mesmo valor de  $k$  ( $0,7 \text{ ano}^{-1}$ ), porém aqui foram calculados valores para  $L_0$  baseado nas diretrizes do IPCC (2006) e nas frações de RSU apresentadas no Relatório sobre o Aurá da Prefeitura de Belém (1997). Inicialmente foi calculado o valor do DOC geral a partir do DOC da cada fração do RSU destinados ao Aurá. Assim o valor do DOC total é  $159 \text{ kgC/MgRSU}$ , como mostrado na Tabela abaixo.

Tabela 12– Valores do teor de Carbono Orgânico Degradável (DOC) para as frações dos resíduos da Região Metropolitana de Belém.

Tipo de resíduo	Fração	DOC (kgC/MgRSU)	DOC final
Orgânico	51%	150	87
Jardins	1%	200	2
Papel	14%	400	56
Madeira	1%	430	4
Têxtil	4%	240	10
Inerte	22%	0	0
<b>Total</b>	<b>100%</b>		<b>159</b>

Fonte: Do autor

Dessa forma, o valor de  $L_0$ , obtido a partir da Equação 4 (IPCC, 2006) é portanto:

$$L_0 = F \cdot MCF \cdot DOC_f \cdot DOC \cdot \frac{16}{12} = 0,5 \cdot 0,8 \cdot 0,5 \cdot 159 \cdot \frac{16}{12} = 42 \text{ kgCH}_4/\text{MgRSU}.$$

Em termos de volume ( $\text{m}^3$ ) equivalente dessa massa de  $\text{CH}_4$ , o valor de  $L_0$  é  $59 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{MgRSU}$ .

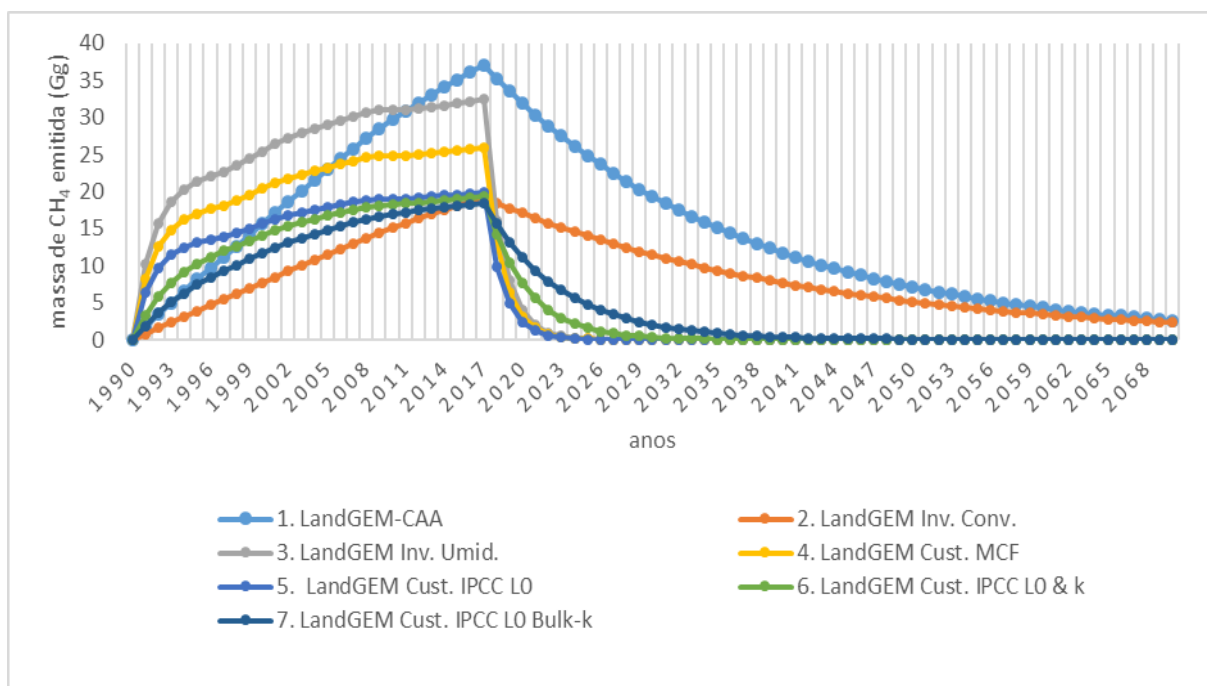
Este valor de  $L_0$  se mostra consideravelmente inferior aos valores padrão propostos pela planilha do LandGEM. Isso se deve ao fato de que os valores são estimativas a partir de inventários nacionais ou regionais, ou seja, considerando grupos de aterros apresentam comportamentos diferentes, onde se estabelecem valores médios para serem utilizados em estudos mais gerais. Como neste trabalho, somente um aterro é estudado, é normal que haja discrepância dos valores padrão. Além disso, os valores padrão são propostos a partir das condições dos resíduos nos EUA, que certamente são bem distintas das condições amazônicas, e especificamente do Aurá.

6. *LandGEM Cust. IPCC  $L_0$  & k* – Similar a simulação 5 ( $L_0=59 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{MgRSU}$ ), porém foi calculado o valor “k” como sendo a média ponderada dos valores de “k” para cada fração do RSU, resultando num valor de  $k=0,25 \text{ ano}^{-1}$ .

7. *LandGEM Cust. IPCC  $L_0$  Bulk-k* – Também similar a simulação 5 ( $L_0=59 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{MgRSU}$ ), porém aqui se utilizou o valor de “k” padrão dado pelo IPCC para os resíduos da América do Sul, sem considerar suas componentes, resultando num valor de  $k=0,17 \text{ ano}^{-1}$ .

Todas as simulações estão representadas na Figura 5. Nota-se grande heterogeneidade no comportamento dos gráficos, mostrando o quanto os modelos são dependentes dos parâmetros  $L_0$  e  $k$ , e que sua utilização inadequada pode superestimar ou subestimar consideravelmente as emissões.

Figura 5 - Estimativas de emissões de CH<sub>4</sub> no aterro do Aurá realizadas pelas 7 simulações do software LandGEM.



Fonte: Do autor

A simulação **1** estima maiores gerações de CH<sub>4</sub>, isso devido ao alto valores de L<sub>0</sub> (170 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> /MgRSU), que considera que um grande volume de CH<sub>4</sub> é gerado a partir da massa de RSU que se decompõe.

As simulações **1**, **2**, **6** e **7**, por apresentarem menores valores para *k*, mostram um decaimento bem mais lento dos resíduos e, conseqüentemente uma produção lenta de gás, quando comparadas às demais simulações.

A simulação **2** mostra um comportamento na curva parecido com a **1**, por possuem valores de *k* bem próximos, porém a **2** apresenta uma produção de CH<sub>4</sub> menor, pois seu L<sub>0</sub> é bem inferior (100 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub> /MgRSU). Quanto maior o valor para o potencial de geração de Metano maior será a produção do gás a partir de uma determinada massa de RSU.

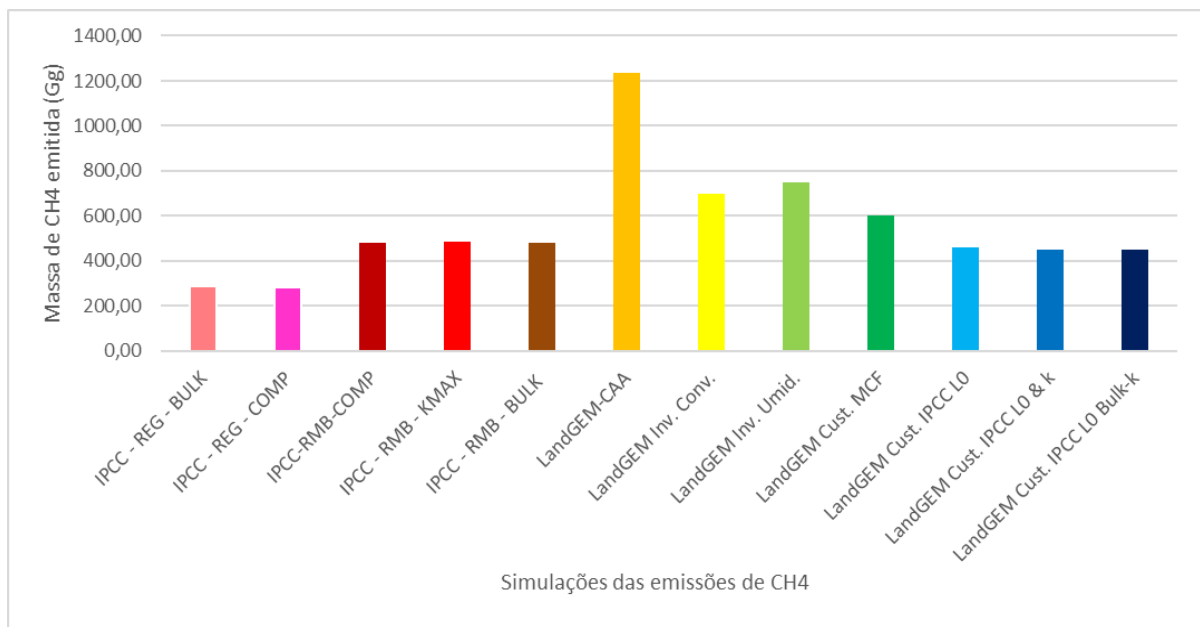
As simulações **3** e **4** se apresentam um comportamento muito similar na produção de CH<sub>4</sub>. A diferença entre elas se dá basicamente na produção máxima do gás, sendo que na simulação **4** a produção máxima é 80 % da produção máxima da simulação **3**, resultado da aplicação do fator de correção de metano (MCF) para aterro controlado profundo, que é 0,8. Como estas simulações são propostas para regiões úmidas, teoricamente são mais consistentes com as condições do Aurá, porém é preciso lembrar que o Aurá se localiza em latitudes tropicais, bem diferente das condições dos EUA.

As simulações 5, 6 e 7 são baseadas nos  $k$  e  $L_0$ , estimados para a RMB utilizando valores do IPCC, mostram uma produção de gás próxima entre elas, porém consideravelmente inferior às demais simulações. Considerando que os valores aqui utilizados são fornecidos por fontes locais da RMB e do próprio Aurá, não somente padrões sugeridos a partir de uma realidade totalmente diferente da amazônica, pressupõe-se que essas três últimas simulações acabam sendo as mais realistas.

#### 7.4 Comparação entre os modelos

Para comparar as simulações foi calculada a quantidade total, em Gigagramas de  $\text{CH}_4$ , emitida para cada simulação dos modelos, representadas na figura 6. É possível verificar grande discrepância nas estimativas de produção de gás entre as simulações. Isso se deve ao uso de parâmetros com valores bem diferentes nas simulações, que geram resultados diversos.

Figura 6- Emissões totais de  $\text{CH}_4$  estimadas pelas simulações do LandGEM e IPCC no aterro do Aurá no período de 1990 a 2070.



Fonte: Do autor

Dessa forma, as simulações foram divididas em quatro classes, definidas de acordo com os parâmetros utilizados na modelagem:

*I – IPCC Regional* (usando valores de padrões regionais da América do Sul): subestima as emissões de  $\text{CH}_4$  em relação às outras simulações (1ª e 2ª colunas);

*II - IPCC RMB* (usando dados específicos sobre a RMB): considerada a mais detalhista, por utilizar valores locais na modelagem (3ª, 4ª e 5ª colunas);

*III - LanGEM - Padrão* (com valores padrão do modelo, sendo uma com aplicação do MCF): superestima as emissões de CH<sub>4</sub>, por utilizar valores dos parâmetros propostos para resíduos em condições muito diferentes das do Aurá (6ª, 7ª, 8ª e 9ª colunas);

*IV - LandGEM + IPCC* (usando valores de  $L_0$  e/ou  $k$  baseado no IPCC): Subestima ligeiramente as emissões, porém com uma diferença pequena em relação à *simulação II* do IPCC. Nesta categoria há uma adaptação e combinação de parâmetros do IPCC e do LandGEM. Quando o valor de  $L_0$  foi calculado a partir da equação 4, a simulação mostrou um resultado bem mais próximo ao resultado mais realista do IPCC (*IPCC RMB*) (10ª, 11ª e 12ª colunas).

A emissão total de CH<sub>4</sub> emitido nos anos considerados para cada classe está sumarizada na tabela 12. A *classe II* foi tomada como ponto de referência para a análise das percentagens das outras simulações, que apontam superestimação ou subestimação de emissões.

Tabela 13 - Emissão total de CH<sub>4</sub> no Aurá estimada pelas simulações do IPCC e do LandGEM no período de 1990 a 2070, discriminando as estimativas em 4 classes de simulação.

Classe	Simulação	Produção total (GgCH <sub>4</sub> )	Diferença do IPCC RMB
<i>I - IPCC - Regional</i>	IPCC-REG-BULK	286	-41%
	IPCC-REG-COMP	284	-41%
<i>II - IPCC - RMB</i>	IPCC-RMB-COMP	483	0%
	IPCC-RMB-BULK	483	0%
	IPCC-RMB-KMAX	485	0%
<i>III-LandGEM Padrão</i>	LandGEM-CAA	1235	+157%
	LandGEM Inventário Convencional	699	+46%
	LandGEM Inventário Úmido	750	+56%
	LandGEM Cust. MCF	600	+25%
<i>IV-LandGEM+IPCC</i>	LandGEM Cust. IPCC L <sub>0</sub>	461	-4%
	LandGEM Cust. IPCC L <sub>0</sub> & k	452	-6%
	LandGEM Cust. IPCC L <sub>0</sub> Bulk-k	449	-6%

Fonte: Do autor



É possível perceber a grande discrepância na emissão total mostrada por cada classe, o que é reflexo da variação dos parâmetros de cada simulação.

A *classe II* e a *classe IV* que utilizam valores para os parâmetros a partir de dados locais, mostram cenários de emissões de CH<sub>4</sub> mais realista do Aurá. A utilização de parâmetros locais fornece maior confiabilidade na modelagem.

Já a *classe III*, que superestima as emissões mostra que o uso indevido do modelo gera resultados não condizentes com a realidade. Porém esse comportamento do modelo LandGEM é benéfico no caso de se estar projetando um aterro, pois permite aos tomadores de decisão se prepararem para os piores cenários de emissão.

As estimativas mais realistas tomadas como referência (*classe II*) mostram que o Aurá deve emitir aproximadamente 483 mil toneladas de CH<sub>4</sub> até 2070. Ao calcular a área dos gráficos referentes a essa classe (figura 5), percebe-se que até o ano de 2017 já foram emitidas cerca de 362 mil toneladas de Metano (75% da emissão total), e ainda estão para ser emitidas cerca de 25% nas próximas décadas, ou seja, aproximadamente 121 mil toneladas de CH<sub>4</sub> até 2070.

Considerando o fato de que o potencial do Metano em reter calor na Atmosfera é 21 vezes o do Dióxido de Carbono, é possível imaginar essas emissões em termos equivalentes de Dióxido de Carbono (principal gás estufa que aumentou sua concentração na atmosfera por fontes antropogênicas). Nesse sentido, significa dizer que o Aurá emitirá aproximadamente 10 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> ao longo de sua história.

#### 7.4.1 Simulações da empresa *Conestoga-Rovers*

A partir de 2014, quando foi determinado o encerramento das atividades no Aurá, a empresa *Conestoga-Rovers & Associates* instalou no Aurá um sistema de coleta e queima de biogás, com intuito de capitalizar através da venda de créditos de carbono. Neste processo, a empresa instalou uma rede de tubulações abaixo do solo, que coletavam o biogás, canalizando-o para um sistema de queima.

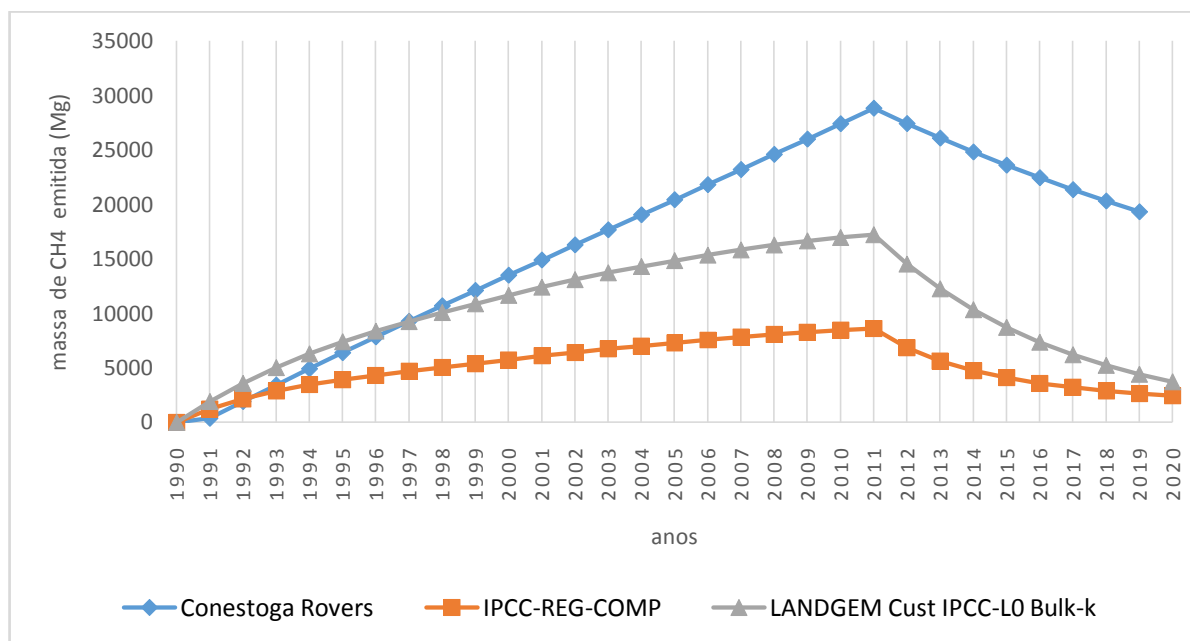
A empresa também realizou simulações das emissões de biogás do Aurá, que são expressas em relatórios resultado do projeto de captação de biogás no Aurá (CRA, 2010) A figura 8 mostra as simulações do IPCC, do LandGEM e da *Conestoga-Rovers* para as emissões de CH<sub>4</sub> do Aurá. Nos modelos do IPCC e LandGEM foram feitas adequações para o Aurá (frações de resíduos locais e MFC=0,8).

As simulações de emissões de CH<sub>4</sub> feitas com o modelo do IPCC foram com os parâmetros de  $k=0,4 \text{ ano}^{-1}$ , considerando as componentes de fração de resíduo da RMB (BELÉM, 1997) para o DOC, e com  $MCF = 0,8$ . Para o modelo LandGEM foram utilizados valores de  $k=0,17 \text{ ano}^{-1}$ , e  $L_0=59 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{MgRSU}$ . A produção diária de resíduos considerada em ambas as simulações foi de 0,65kg/hab. Estes valores correspondem, respectivamente, às simulações *IPCC-RMB-COMP* e *LandGEM Cust. IPCC L<sub>0</sub> Bulk-k* (tabela12).

Aparentemente a empresa utilizou uma simulação similar aos resultados da categoria *LandGem Padrão* ( $k= 0,05 \text{ ano}^{-1}$  e  $L_0= 170 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{MgRSU}$ ), com uma produção diária de resíduos equivalente a 0,52kg/hab (CRA, 2010). Esses valores de  $k$  e  $L_0$  não são adequados às condições do clima de Belém, pois considerando o valor de  $k=0,05 \text{ ano}^{-1}$  (ver tabela 4) que admite a precipitação como menor que 1000mm (BANCO MUNDIAL, 2004), é diferente da climatologia da cidade de Belém que apresenta uma precipitação média anual de 3170mm (INMET, 2017).

Para fins de comparação com dados da empresa, as simulações do IPCC e LandGEM considerou-se o encerramento da deposição de RSU em 2010, como expresso na figura 7.

Figura 7 - Estimativas de emissões de CH<sub>4</sub> no Aurá realizadas pelas simulações do IPCC e LandGem e a partir de emissões previstas pela empresa Conestoga-Rovers no período de 1990 a 2019.



Fonte: Do autor

Os dados simulados pela *Conestoga-Rovers* estimaram maiores emissões do que os resultados do presente trabalho, devido as modificações nos parâmetros de  $k$  e  $L_0$  serem

incoerentes com a realidade do aterro quanto a sua climatologia e vida útil do gás metano. Por isso obtive uma simulação semelhante aos resultados da classe *LandGem Padrão*, ou seja, sem adequar os valores de  $k$  e  $L_0$  às condições da Região Amazônica. Este resultado mostra uma superestimação das emissões de  $\text{CH}_4$  do Aurá em relação aos resultados do presente estudo.

Esse tipo de modelagem (*Conestoga*) prediz uma vida útil de um sistema de coleta irrealista e muito superior à realidade. Essa superestimação das emissões de biogás é interessante quando se pretende aprovar um projeto de coleta de créditos de carbono que futuramente será convertido em lucro financeiro.

## 8 CONCLUSÕES

Apesar de não confirmarmos a validade das simulações neste estudo, a modelagem se mostra uma importante ferramenta para elaborar cenários de emissão de gases estufa a partir de aterros e, a partir disso, avaliar os impactos e tomar medidas de controle de emissões.

Os valores dos parâmetros utilizados nos modelos (especialmente  $k$  e  $L_0$ ) devem ser escolhidos cuidadosamente para que a modelagem mostre cenários de emissão mais realistas possíveis, caso contrário a simulação pode superestimar ou subestimar as emissões do aterro. Neste sentido é recomendado utilizar dados fornecidos por estudos locais, desde que sejam confiáveis, pois fornecem resultados mais realistas de emissões.

Para a Amazônia, os valores da constante de geração de Metano  $k$  são elevados devido à alta precipitação e umidade, o que faz com que os resíduos degradem rapidamente. Portanto é necessário se tomar decisões com mais rapidez no sentido de aplicar métodos de controle de emissões de aterros na Região e evitar que os gases escapem para a Atmosfera.

A maior parte das emissões de biogás do Aurá já ocorreram. Neste sentido, o Aurá deve emitir durante sua história (considerando que foi completamente fechado em 2016) aproximadamente 483 mil toneladas de  $\text{CH}_4$ , das quais aproximadamente 25% ainda serão emitidos nos próximos anos.

Como o potencial de aquecimento global do  $\text{CH}_4$  é 21 vezes maior do que o do  $\text{CO}_2$ , significa dizer que o Aurá, ao longo dos anos, emite uma quantidade de  $\text{CH}_4$  equivalente a 10 milhões de toneladas de  $\text{CO}_2$ .

A realização de medidas de emissões *in loco* é uma forma de aferir os resultados dos modelos e ajustar os parâmetros. Portanto, recomenda-se realizar medições diretas no terreno do aterro, para quantificar o biogás que sai da superfície do aterro para a Atmosfera.

Apesar da relevância da temática abordada nesse trabalho, estudos sobre emissão de gases de aterros na Região Amazônica são escassos na literatura. Portanto este trabalho abre um novo campo de estudo no que diz respeito às emissões de Gases Estufa na Região Metropolitana de Belém e Amazônia.

## REFERÊNCIAS

- ALCÂNTARA, P. B. **Avaliação da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados**. 2007. 364 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)–Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.
- ALDIBERT, J. L. **Avaliação qualitativa e quantitativa do biogás do aterro controlado de Londrina**. 2001. 186 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento)–Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2001.
- ALDIBERT, J. L.; FERNANDES, F. Avaliação qualitativa da emissão de biogás em aterro controlado de médio porte. **Revista DAE**, v. 190, p. 56–73, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. **Atlas brasileiro de emissões de GEE e potencial energético na destinação de resíduos sólidos**. São Paulo, 2013.
- \_\_\_\_\_. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil, 2014**. São Paulo: ABRELPE, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 8419 - apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos urbanos**. Rio de Janeiro, 1983.
- \_\_\_\_\_. **NBR 10004 -resíduos sólidos – classificação**. Rio de Janeiro, 2004.
- BAHIA, V. E.; FENZL, N.; MORALES, G. P. Estudo hidrogeológico e hidrogeoquímico da área localizada entre o depósito de lixo metropolitano de Belém (Aurá) e o Lago Água Preta. **Geochimica Brasiliensis**, v. 20, p. 295–311, 2006.
- BANCO MUNDIAL. **Manual para a preparação de gás de aterro sanitário para projetos de energia na América Latina e caribe**. [S.l.], 2004.
- BELÉM. Prefeitura Municipal. **Projeto técnico: saneamento ambiental do complexo de destino final de resíduos sólidos do Aurá-Belém-PA**. Belém, 1997.
- BRASIL. Congresso. Câmara dos Deputados. Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010. **Política nacional de resíduos sólidos**. 2 ed. Brasília, DF: Edições Câmara, 2012.
- CHIEMCHAISRI, C.; CHETTIYAPPAN, V. Greenhouse gas emission potential of the municipal solid waste disposal sites in Thailand. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 58, n. 5, p. 629–35, 2008. doi:10.3155/1047-3289.58.5.629.
- CONETOGA-ROVERS & ASSOCIATES - CRA. **Monitoring report: Aurá Landfill Gas Project**. Belém, 2010.
- CROVADOR, M. I. C. **Potencial de geração de biogás a partir da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos**. 2014. 103 f. Dissertação (Mestrado em Bioenergia)–Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava, 2014.

DI BELLA, G.; DI TRAPANI, D.; VIVIANI, G. Evaluation of methane emissions from Palermo Municipal Landfill: comparison between field measurements and models. **Waste Management**, v. 31, n. 8, p. 1820–26, 2011. doi:10.1016/j.wasman.2011.03.013.

EL-FADEL, M.; FINDIKAKIS, A. N.; LECKIE, J. O. Environmental impacts of solid waste landfilling. **Journal of Environmental Management**, v. 50, n. 1, p. 1–25, 1997. doi:10.1006/jema.1995.0131.

FIRMO, A. L. B. **Estudo numérico e experimental da geração de biogás a partir da biodegradação de resíduos sólidos urbanos**. 2013. 268 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)–Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

FREIRE, T. S. C. **A gestão de resíduos sólidos urbanos no município de Belém: uma análise do gerenciamento e da possibilidade de geração de renda através da reciclagem de resíduos (1997/2010)**. 2010. 122 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Sustentável do Trópico Úmido) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

GOMES, F. F. **A política pública municipal de resíduo sólido: sua incidência sobre os catadores de lixo do aterro sanitário do Aurá em Belém**. 2010. 146 f. Dissertação (Mestrado em Serviço social) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

HOUGHTON, J. T.; IPCC. **Climate change 2001: the scientific basis: contribution of Working Group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. New York: Cambridge University Press, 2001.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Censo demográfico 2010: características da população e dos domicílios**. Rio de Janeiro, 2010.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. **Climatologia da cidade de Belém**. Belém, 2017. Disponível em <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home2/index>>. Acesso em: 04 maio 2017.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Waste**. In: \_\_\_\_\_. **Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories**. 8. Montreal, 2000. Cap. 5.

\_\_\_\_\_. **Waste**. In: \_\_\_\_\_. **Guidelines for national greenhouse gas inventories**. 5. Montreal, 2006. V. 5.

\_\_\_\_\_. **Waste**. In: \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. 6. Montreal, 1996. Cap. 3.

JARDIM, N. S.; WELLS, C.; IPT; CEMPRE. **Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1996. n. 2163.

MACHADO, S. L.; CARVALHO, M. F.; GOURC, J.P.; VILAR, O. M.; NASCIMENTO, J. C. F. Methane generation in tropical landfills: simplified methods and field results. **Waste Management**, v. 29, n. 1, p. 153–61, 2009. doi:10.1016/j.wasman.2008.02.017.

MACIEL, F. J. **Geração de biogás e energia em aterro experimental de resíduos sólidos**

**urbanos**. 2009. 333 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)–Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

MATOS, F. O.; MOURA, Q. L.; CONDE, G. B.; MORALES, G. P.; BRASIL, E. C. Impactos ambientais decorrentes do aterro sanitário da Região Metropolitana de Belém-PA: aplicação de ferramentas de melhoria ambiental. **Caminhos da Geografia**, v.12, n. 39, p. 297–305, 2011.

MENDES, L. G. G.; MAGALÃES SOBRINHO, P. Métodos de estimativa de geração de biogás em aterro sanitário. **Rev. ciênc. Exatas**, v. 11, p. 71–76, 2005.

MONTEIRO, J. H. P.; MANSURY, G. L. **Manual de gestión integrada de residuos sólidos municipales en ciudades de América Latina y el Caribe**. Rio de Janeiro: IBAM, 2006. 264 f.

MORALES, G. P. **Avaliação ambiental dos recursos hídricos, solos e sedimentos na área de abrangência do depósito de resíduos sólidos do Aurá**. 2002. 240 f. Tese (Doutorado Geologia e Geoquímica) –Universidade Federal do Pará, Belém, 2002.

O’LEARY, P. R.; TCHOBANOGLOUS, G. Landfilling. In: HANDBOOK of solid waste management. 2 ed. New York: Mcgraw – hill, 2002.

PARÁ . Ministério Público do Estado. **Temo de ajuste de conduta**: Prefeitura Municipal de Belém, Prefeitura Municipal de Ananindeua, Prefeitura Municipal de Marituba. Belém, 2013.

PERERA, M D.N.; HETTIARATCHI, J P.A.; ACHARI, G.A Mathematical modeling approach to improve the point estimation of landfill gas surface emissions using the flux chamber technique. **Journal of Environmental Engineering and Science**, v. 1, n. 6, p. 451-63, 2002. doi:10.1139/s02-033.

REINHART, D. R.; COOPER, D. C.; WALKER, B. L. Flux chamber design and operation for the measurement of municipal solid waste landfill gas emission rates. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 42, n. 8, p. 1067-70, 1992. doi:10.1080/10473289.1992.10467053.

SANTOS. FILHO, F. E. **Estimativa do aproveitamento energético do biogás gerado por resíduos sólidos urbanos no Brasil**. 2013. 242 f. Dissertação (Mestrado em Energia)–Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

SANTOS, V. C. P. O MDL e as oportunidades para a economia paraense: a produção de biogás no aterro sanitário do Aurá. **Revista Terceiro Incluído**, v. 2, n. 2, p. 1-19, 2012. doi:10.5216/teri.v2i2.23283.

SIQUEIRA, G. W.; APRILE, F. Avaliação de risco ambiental por contaminação metálica e material orgânico em sedimentos da bacia do rio Aurá, Região Metropolitana de Belém - PA. **Acta Amazonica**, v. 43, n. 1, p. 51-62, 2013.

TALYAN, V.; DAHIYA, R.P.; ANAND, S.; SREEKRISHNAN, T.R. Quantification of methane emission from municipal solid waste disposal in Delhi. **Resources, Conservation**

**and Recycling**, v. 50, n. 3, p. 240-59, 2007. doi:10.1016/j.resconrec.2006.06.002.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. **Air emissions from municipal solid waste landfills**: background information for proposed standards and guidelines. [S.l.]: Emission Standards Division, 1991.

———. **Background information document for updating AP42 Section 2.4 for estimating emissions from municipal solid waste landfills**. [S.l.]: 2008.

———. **First - order kinetic gas generation model**: parameters for wet landfills. [S.l.]: 2005a.

———. **Landfill gas emissions model (LandGEM) version 3.02 user's guide**. [S.l.]: 2005b.

VAN ELK, A. G. H. P. **Redução de emissões na disposição final. Mecanismo de desenvolvimento limpo aplicado a resíduos sólidos**. 3ed. Rio de Janeiro: IBAM, 2007.

WANGYAO, K.; TOWPRAYOON, S.; CHIEMCHAI SRI, C.; GHEEWALA, S. H.; NOPHARATANA, A. Application of the IPCC waste model to solid waste disposal sites in tropical countries: case study of Thailand. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 164, n. 1-4, p. 249-61, 2010. doi:10.1007/s10661-009-0889-6.