



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

PEDRO HENRIQUE CAVALCANTE SIMÕES

ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE METANO NO ATERRO SANITÁRIO
MUNICIPAL OESTE DE CAUCAIA UTILIZANDO DIFERENTES
METODOLOGIAS PROPOSTAS

FORTALEZA

2021

PEDRO HENRIQUE CAVALCANTE SIMÕES

ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE METANO NO ATERRO SANITÁRIO MUNICIPAL
OESTE DE CAUCAIA UTILIZANDO DIFERENTES
METODOLOGIAS PROPOSTAS

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental. Área de concentração: Geração de Metano.

Orientador: Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares.

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S616e Simões, Pedro Henrique Cavalcante.

Estimativa da produção de metano no aterro sanitário municipal oeste de Caucaia utilizando diferentes metodologias propostas / Pedro Henrique Cavalcante Simões. – 2021.
52 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Ambiental, Fortaleza, 2021.

Orientação: Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares.

1. Metano. 2. Aterro Sanitário. 3. IPCC. 4. USEPA. 5. Banco Mundial. I. Título.

CDD 628

PEDRO HENRIQUE CAVALCANTE SIMÕES

ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE METANO NO ATERRO SANITÁRIO MUNICIPAL
OESTE DE CAUCAIA UTILIZANDO DIFERENTES
METODOLOGIAS PROPOSTAS

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental. Área de concentração: Geração de Metano.

Orientador: Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares.

Aprovada em: ___/___/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Ronaldo Stefanutti
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Jefferson Hannover Faustino Magalhães
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

À Deus e Nossa Senhora por todas as bênçãos que me foram proporcionadas.

À minha família, principalmente meus pais Ítalo Borges Leite e Iêda Claudia Montenegro Cavalcante, que sempre se doaram ao máximo com toda a dedicação possível para que eu pudesse ter condições de estudar, sempre me apoiaram e me ajudaram em tudo, a qual sou eternamente grato e meu irmão João Victor Cavalcante Freire, que sempre esteve presente.

Aos meus avós Amarílio Cavalcante (in memoriam), Francisca Holandina Montenegro Cavalcante, Alarico Leite (in memoriam) e Glícia Maria Borges Leite, sem eles nada seria possível.

Ao Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares, por todos os ensinamentos transmitidos ao longo desses anos, e pela excelente orientação que me foi concedida, sempre se mostrando muito solícito e me ajudando bastante, sendo importantíssimo na produção deste trabalho.

Aos amigos feitos no curso: Andrey Marcos, Jefferson Hannover, João Batista, João Paulo, João Pedro, Lucas Silva e Raul Gomes, que estiveram comigo nos momentos de estudos, de apresentações e de descontração, contribuindo para uma graduação mais leve e prazerosa.

À minha amiga Andréa Gisele Limeira Paz, que sempre esteve disponível para me ajudar em estudos, provas, trabalhos e revisões, tendo tido grande contribuição em muitos dos meus melhores desempenhos durante a graduação, sendo uma amiga extremamente solícita.

À minha namorada Priscilla Almeida, por sempre me servir de inspiração na busca dos melhores resultados possíveis, pelo apoio e companheirismo ao longo das disciplinas que cursamos juntos e no TCC, e por sempre se fazer tão presente.

Ao meu primo Ricardo Costa Cavalcante, por todos os aprendizados e experiências vividas ao longo desses anos, que contribuíram bastante para a minha formação pessoal e profissional, sempre se mostrando extremamente paciente e determinado a me fazer melhorar cada vez mais, sempre fomentando minha vontade de evoluir em todos os aspectos.

Ao meu primo Vitor Costa Cavalcante pelos ensinamentos diários sobre os mais abrangentes assuntos possíveis, pela sua determinação em me ajudar sempre que possível e pela alegria que distribui no ambiente de trabalho, tornando-o tão leve.

Ao meu tio Humberto Cavalcante (in memoriam), por sempre ter me dado todo o apoio possível e ter sido fundamental na escolha do meu curso, e que por mais que tenha

partido cedo deixou seu legado em minha vida, sendo alguém que eternamente lembrarei e me inspirarei.

Ao meu primo Tahian, que no meu momento mais difícil de pré-vestibular teve papel fundamental na minha retomada psicológica, me permitindo fazer o ENEM em perfeitas condições, obtendo minha aprovação.

Aos amigos Adriano Leal, Arthur Abreu, Caio Baima, Giulio Sorrenti, João Pedro Marinho, Kim Cavalcante (primo e irmão), Lucas Hariel, Matteo Basso e Pedro Oliveira, que durante o período como universitário pude aproveitar diversos momentos extremamente agradáveis ao lado deles.

À 4autos.club, empresa que me proporcionou a primeira experiência profissional a qual tenho extremo carinho e identificação.

À todos aqueles que de alguma forma contribuíram para que eu chegasse até aqui hoje.

RESUMO

O metano é um dos principais gases gerados no interior de um aterro sanitário e diversos fatores influenciam na sua produção. Se tratando de um gás com alto poder calorífero e sendo uma grande fonte de energia, além de possíveis impactos ambientais que ele possa causar por ser um potencializador do efeito estufa, é importante conhecer o potencial de produção de metano dentro de um aterro sanitário. Baseado nisso, este trabalho tem por objetivo estimar, através de diferentes metodologias a produção de metano no Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia (ASMOC) no período de 1992 à 2009, comparando os resultados obtidos, além de atribuir valores adequados para a taxa e potencial de geração de metano. Os métodos utilizados para a estimativa da produção de metano foram do IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), da USEPA (United States Environmental Protection Agency) e do Banco Mundial. No estudo foi observado que as estimativas obtidas pelos diferentes métodos são influenciadas fortemente por duas variáveis: a taxa de geração de metano (k) e o potencial de geração de metano (L_0), e os parâmetros que influenciam a escolha dessas variáveis dependem do modelo utilizado. Com relação ao volume de metano gerado em cada modelo, o modelo da USEPA gerou maiores volumes de metano, 553.209.626,34 m³ de CH₄, superiores aos demais modelos, o modelo do IPCC, volumes de 288.059.165,64 m³ de CH₄, e o Modelo do Banco Mundial gerou 131.631.928,2 m³ de CH₄. Dentre os três modelos o IPCC é o que utiliza mais dados de entrada para a estimativa de geração de metano, podendo gerar resultados mais realísticos. Os resultados obtidos no presente estudo indicaram que há variações significativas nos volumes de metano estimados pelos diferentes métodos e que a escolha do método mais adequado dependerá da finalidade do trabalho.

Palavras-chave: Metano. Aterro Sanitário. IPCC. USEPA. Banco Mundial. Estimativa da geração de metano.

ABSTRACT

Methane is one of the main gases generated inside a landfill and several factors influence its production. In the case of a gas with a high calorific value and being a great source of energy, in addition to the possible environmental impacts that it may cause because it is a potentiator of the greenhouse effect, it is important to know the potential of methane production inside a landfill. Based on this, this work aims to estimate, through different methodologies, the production of methane in the Metropolitan Landfill West of Caucaia (ASMOC) in the period from 1992 to 2009, comparing the results obtained, in addition to assigning adequate values for the generation rate methane and the potential for methane generation in each case. The methods used to estimate methane production were from the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), USEPA (United States Environmental Protection Agency) and the World Bank. In the study it was observed that the estimates obtained by the different methods are strongly influenced by two variables: the methane generation rate (k) and the methane generation potential (L_0), and the parameters that influence the choice of these variables depend on the model in question. The USEPA model generated higher volumes of methane, obtaining 553,209,626.34 m³ of CH₄, higher than the other models, with the IPCC model having volumes of 288,059,165.64 m³ of CH₄, and the World Bank Model generated 131,631,928.2 m³ of CCH₄. Among the three models, the IPCC is the one that uses the most input data to estimate methane generation, which can generate more reliable results. The results obtained in the present study indicated that there are significant variations in the methane volumes estimated by the different methods and that the choice of the most appropriate method will depend on the purpose of the work.

Keywords: Methane. Landfill. IPCC. USEPA. World Bank. Estimation of methane generation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Geração de RSU no Brasil.....	15
Figura 2 - Coleta de RSU no Brasil.....	16
Figura 3 - Aterro Sanitário em diversas fases.....	19
Figura 4 - Foto aérea do ASMOC.....	33
Figura 5 - Lagoa de Estabilização.....	33
Figura 6 - Dreno de coleta do biogás.....	34
Figura 7 - Estimativa do acumulado de geração do metano no AMOSC através do IPCC.....	41
Figura 8 - Estimativa do acumulado de metano adotando k mínimo e k máximo.....	42
Figura 9 - Estimativa do acumulado de geração do metano no AMOSC através do modelo da USEPA.....	44
Figura 10 - Estimativa do acumulado de geração do metano no AMOSC através do modelo do Banco Mundial.....	46
Figura 11 - Comparativo entre as estimativas de geração de CH ₄ a partir dos modelos estudados.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quantidade de RSU coletada nas regiões do Brasil.....	16
Tabela 2 - Composição do Biogás.	22
Tabela 3 - Valores para o FCM.....	25
Tabela 4 - Teor de carbono orgânico degradável para cada componente do RSU.....	26
Tabela 5 - Taxa de geração de metano (k) Padrão recomendada.	27
Tabela 6 - Valores para a Taxa de Geração de Metano (k).....	28
Tabela 7 - Valores para o Potencial de Geração de Metano (L_0).....	29
Tabela 8 - Valores sugeridos para k no modelo Scholl-Canyon.....	30
Tabela 9: Valores sugeridos para L_0 no modelo Scholl-Canyon.....	31
Tabela 10 - Fluxo de RSU depositados no ASMOC (Linard, 2010).....	35
Tabela 11 - Dados das amostras analisadas.....	36
Tabela 12 - Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Domiciliares Depositados no Aterro Sanitário de Caucaia/CE.....	37
Tabela 13 - Composição de Biogás no ASMOC.	38
Tabela 14 - Valores para o cálculo do k.....	39
Tabela 15 - Estimativa de geração do metano por ano no ASMOC através do IPCC.....	40
Tabela 16 - Estimativa de geração do metano por ano no ASMOC através do método da USEPA.....	43
Tabela 17 - Estimativa de geração do metano por ano no ASMOC através do método do Banco Mundial.....	45

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo Geral	14
2.2 Objetivos Específicos	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 Resíduos sólidos no Brasil	15
3.2 Política Nacional dos Resíduos Sólidos	17
3.3 Aterro Sanitário	18
3.4 Geração de metano	21
3.5 Modelos para estimativa de geração de metano	24
3.5.1 Modelo do IPCC	24
3.5.2 Modelo da USEPA	27
3.5.3 Modelo do Banco Mundial	29
4. METODOLOGIA E RESULTADOS OBTIDOS	32
4.1 Local de Estudo	32
4.2 Coleta de chorume e queima de biogás	33
4.3 Caracterização dos resíduos	34
4.4 Aplicação do modelo do IPCC no ASMOC	37
4.5 Aplicação do Modelo da USEPA no ASMOC	42
4.6 Aplicação do Modelo do Banco Mundial no ASMOC	44
4.7 Comparação dos resultados dos modelos de estimativa de metano	47
5. CONCLUSÕES	50
REFERÊNCIAS	52

1. INTRODUÇÃO

O contínuo crescimento da população no Brasil alinhado com aumento do consumismo da mesma, se comparado às décadas anteriores, gera algumas consequências, como por exemplo o aumento na taxa de geração de resíduos sólidos urbanos. Com isso, se os resíduos não forem dispostos da maneira adequada, problemas que afetam a qualidade de vida da sociedade podem se tornar recorrentes. Em locais onde isso ocorre, fatores como a proliferação de doenças em ambientes com acúmulo de resíduos, entupimento de galerias e tubulações de drenagem urbana, contaminação do solo e/ou lençóis freáticos, presença de insetos e animais vetores de doenças bem como odor local e poluição visual, são apenas algumas das consequências que podem ser observadas.

A gestão de resíduos sólidos é um dos pilares do saneamento básico, mas que muitas vezes não recebe a devida atenção em alguns locais do Brasil, que por ser um país de proporções continentais e com uma das maiores populações do mundo, com um alto índice de geração de resíduos. Segundo o Panorama dos Resíduos Sólidos, da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe, 2018,p. 11), em 2018, foram geradas no Brasil 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos, um aumento de 1% em relação ao ano anterior. Em relação aos países da América Latina, o Brasil é o líder de geração de resíduos, representando 40% do total gerado na região , sendo 541 mil toneladas/dia, segundo a ONU Meio Ambiente, (2018).

Atualmente, uma das formas mais conhecidas para a disposição de resíduos sólidos no Brasil e no mundo é o aterro sanitário. Segundo Van Elk (2007, p. 13), “O aterro sanitário é uma obra de engenharia projetada sob critérios técnicos, cuja finalidade é garantir a disposição dos resíduos sólidos urbanos sem causar danos à saúde pública e ao meio ambiente.”

O aterro deve conter todos os elementos necessários para seu correto funcionamento, desde sistemas de drenagem (podendo ser para as águas superficiais, que disciplina a água da chuva do escoamento superficial, evitando a erosão das camadas de cobertura do aterro, ou do lixiviado gerado no interior do aterro sanitário, que conduz o mesmo para o seu local de tratamento adequado), Sistema de drenagem de gases, coberturas (intermediária e final), etc. O aterro pode atuar como um reator dinâmico, pois dentro dele ocorrem diversas reações químicas e biológicas, que resultam na geração de efluentes líquidos, de gases e resíduos mineralizados (húmus) proveniente da decomposição da matéria orgânica, por exemplo.

Se os gases gerados no aterro não forem gerenciados de maneira adequada põem em risco a qualidade do ambiente ao seu redor gerando impactos socioambientais, como a contribuição para agravamento do efeito estufa ou do aquecimento global, por exemplo. Dito isso, outro subproduto do aterro que se tornou objeto de estudo de diversas pesquisas, e muitas vezes área de investimentos em alguns países, é o biogás, que é um gás produzido a partir da decomposição de materiais orgânicos (de origem vegetal ou animal), que são decompostos, produzindo uma mistura de gases, cuja sua composição é majoritariamente de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), contendo também oxigênio (O_2) e gás sulfídrico (H_2S) em menores composições. O metano tem um alto potencial de geração de energia, sua capacidade de retenção de calor é 21 vezes maior que a do CO_2 para um período de 100 anos (MCT, 2009), no entanto não é tão simples fazer uma estimativa de sua produção em aterros sanitários. Os dados muitas vezes são escassos, e os modelos matemáticos para a estimativa do metano podem utilizar diferentes variáveis, tais como a composição do resíduo, o clima, a umidade local, a taxa de entrada de resíduo no aterro, etc.

A captura do metano para posterior reaproveitamento pode ser muito vantajoso tanto do ponto de vista econômico como do ponto de vista estrutural do aterro. No primeiro caso, a presença do metano no biogás propicia sua utilização como combustível de uma fonte renovável, que além de contribuir para diminuição de gases relacionados ao efeito estufa, pode ser aproveitado como fonte de geração de energia, principalmente por se tratar de um gás de grande poder calorífero. No segundo caso, é fundamental que haja sua retirada do aterro pois com isso haverá redução das pressões internas melhorando portanto sua estabilidade e, segundo Van Elk (2004, p.33), se o metano se encontrar em determinadas concentrações é passível de risco de explosões no aterro.

O presente trabalho visa analisar comparativamente a estimativa de produção de metano no aterro sanitário de Caucaia, Ceará, no período de 1992 à 2009, tendo como base modelos matemáticos consagrados e aplicados em aterros sanitários no Brasil e no mundo. Os modelos utilizados neste trabalho foram o modelo da USEPA (United States Environmental Protection Agency), modelo do IPCC (Intergovernmental Painel on Climate Change) e o modelo do Banco Mundial.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Estimar por meio de diferentes métodos teóricos disponíveis na literatura, o volume de metano gerado em massas de resíduos presente no Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia (ASMOC) no período de 1992 à 2009.

2.2 Objetivos Específicos

Apresentar valores adequados para k e L_0 em cada metodologia apresentada e

Desenvolver uma análise comparativa entre os resultados obtidos entre os três métodos citados.

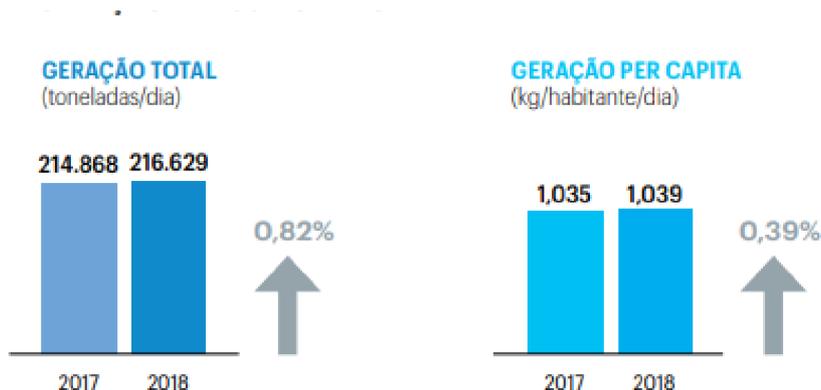
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A geração de metano em aterros sanitários sofre grande influência da quantidade e caracterização dos seus resíduos: dependem do resíduo disposto bem como do percentual de matéria orgânica para fazer uma estimativa o mais fiel possível. Fatores como a umidade e disponibilidade de nutrientes e pH também são fundamentais para realizar a estimativa. É importante ter conhecimento prévio sobre a situação dos resíduos que serão utilizados no processo.

3.1 Resíduos sólidos no Brasil

Segundo o Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil da ABRELPE (2018), os números referentes à geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) indicam que foram gerados 79 milhões de toneladas no país no mesmo ano, onde 72,7 milhões de toneladas foram coletados, gerando um percentual de cobertura de coleta de 92%, e isso significa que as mais de 6 milhões de toneladas restantes tiveram sua destinação de maneira inadequada. Segundo Abrelpe (2018), No período entre 2017 e 2018 a população brasileira apresentou um crescimento de 0,40% e sua geração total de resíduos passou de 214.868 ton/dia em 2017 para 216.629 ton/dia em 2018, indicando aumento de 0,82% no total. Já a geração de RSU per capita subiu 0,39%, passando de 1,035 para 1,039 kg/hab/dia, conforme pode ser observado na Figura 01.

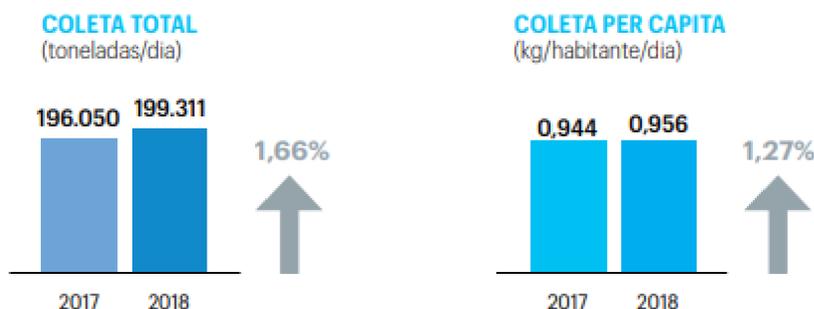
Figura 01 - Geração de RSU no Brasil



Fonte: Abrelpe/IBGE

À respeito do volume de resíduos coletados nesse período, passou de 196.050 ton/dia em 2017 para 199.311 ton/dia em 2018, indicando aumento de 1,66%. Quando se observa a coleta per capita, houve aumento de 1,27% pois em 2017 foram coletados 0,944 kg/hab/dia, enquanto que no ano seguinte passou para 0,956 kg/ha/dia, como pode ser visto na Figura 02.

Figura 02 - Coleta de RSU no Brasil



Fonte: Abrelpe/IBGE

Os dados apresentados da Tabela 01 mostram também que mais da metade dos resíduos gerados em massa no Brasil nesse período é proveniente da Região Sudeste com 53,2%, seguido pela região Nordeste com 23%, em terceiro a região Sul com 10,8%, com 7,5% vem a região Centro-Oeste, e por fim a região Norte com 6,5% (ABRELPE, 2018). A elevada geração de resíduos na região Sudeste pode ser explicada pela sua grande densidade populacional, bem como pela condição econômica e padrão de vida mais elevado. A região norte, que englobou menor concentração, possui um padrão de vida mais baixo, além de ter uma menor densidade populacional se comparada às demais regiões.

Tabela 01 - Quantidade de RSU coletada nas regiões do Brasil

Regiões	2017	População 2018	2018
	RSU Total (toneladas/dia)		RSU Total (toneladas/dia)
Norte	12.705	18.182.253	13.069
Nordeste	43.871	56.760.780	43.763
Centro-Oeste	14.406	16.085.885	14.941
Sudeste	103.741	87.711.946	105.977
Sul	21.327	29.754.036	21.561
BRASIL	196.050	208.494.900	199.311

Fonte: Abrelpe/IBGE

2.1.1 Resíduos Sólidos no Ceará

A grande maioria dos municípios do Estado do Ceará não possuem aterros sanitários, e acabam destinando seus resíduos de maneira incorreta. De acordo com a Secretaria das Cidades, no levantamento realizado em 2017, o Estado contava com mais de 300 lixões e apenas seis aterros sanitários em operação. Fatores como o baixo número de aterros no Estado concomitante com deficiências no modelo de gestão do RSU, junto à ausência de práticas de educação ambiental da população em geral (visto que com certa frequência há depósitos de resíduos nas ruas e calçadas, por exemplo), contribuem para uma inadequada destinação final dos resíduos.

3.2 Política Nacional dos Resíduos Sólidos

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei Nº 12.305/10, criada visando melhorar a situação de problemas socioambientais oriundos da má gestão de RSU, completou 10 anos em 2020. Segundo o Ministério do Meio Ambiente (MMA), a lei prevê: "a prevenção e a redução na geração de resíduos, tendo como proposta a prática de hábitos de consumo sustentável e um conjunto de instrumentos para propiciar o aumento da reciclagem e da reutilização dos resíduos sólidos".

Dentre as exigências da PNRS, destacava-se a extinção de lixões, pois a destinação de resíduos nesses locais é considerado crime ambiental. No entanto, o prazo para essa ação expirou em 2014, e os lixões continuam a existir, gerando os diversos impactos ambientais. A lei ainda cita que deve haver a integração de catadores de materiais recicláveis em ações que envolvam a responsabilidade compartilhada na gestão de RSU, e cita também conceitos como "poluidor-pagador" e "protetor-recebedor", visando incentivar atitudes que colaborem para uma melhor gestão dos resíduos e qualidade do meio ambiente.

2.2.1 Plano Estadual de Resíduos Sólidos no Ceará

A proposta ao Edital do Meio Ambiente apresentada pelo Governo do Estado do Ceará, em 2012, foi aprovada e posteriormente elaborada entre 2013 a 2016, constituindo-se como uma ferramenta de grande importância na execução do Plano Estadual de Resíduos Sólidos. Esse plano, segundo a Secretaria do Meio Ambiente do Estado do Ceará (SEMA),

tem como objetivo desativar e recuperar áreas degradadas por lixões, implementando também uma coleta seletiva nas regiões de gestão integrada. Além disso, implantar a logística reversa bem como a compostagem dos resíduos sólidos orgânicos, e a inclusão de catadores de materiais recicláveis na responsabilidade compartilhada para a gestão de resíduos sólidos.

3.3 Aterro Sanitário

De acordo com Van Elk (2007, p. 25), “O lixão é a forma inadequada de dispor os resíduos sólidos urbanos sobre o solo, sem nenhuma impermeabilização, sem sistema de drenagem de lixiviados e de gases e sem cobertura diária do RSU, causando impactos à saúde pública e ao meio ambiente.”. Os lixões trazem impactos diversos à vida e ao ambiente que o rodeia, e demandam grandes investimentos para recuperar os danos causados. Já o aterro sanitário, ainda que necessite de investimento tanto para sua construção, como também para operação e manutenção, é uma alternativa muito melhor do ponto de vista socioambiental.

O aterro sanitário é um projeto de engenharia baseado em critérios técnicos e oferece maior controle dos procedimentos operacionais com os resíduos que estão sendo manejados. É importante que haja a diferenciação entre aterro sanitário e aterro controlado: no primeiro caso há toda a impermeabilização do solo, além da instalação da rede de drenagem de chorume (líquido tóxico oriundo da decomposição do resíduo) que é encaminhado para tratamento. Também existe o sistema de captação de gases liberados, como o metano, seguido de sua queima ou reaproveitamento. Já no segundo caso, o resíduo é disposto de maneira controlada e recebe uma cobertura de solos, não contendo rede de drenagem e nem de captação de gases, além de não atenderem às recomendações da Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS).

2.3.1 Aspectos Básicos de Projeto de Aterro Sanitário

O aterro sanitário acaba funcionando como um grande biorreator, e por isso é necessário que se conheça as variáveis que participam das diversas reações que ocorrem dentro dele, bem como ter o controle das mesmas para evitar potenciais desastres ambientais.

a) Escolha da Área do Aterro

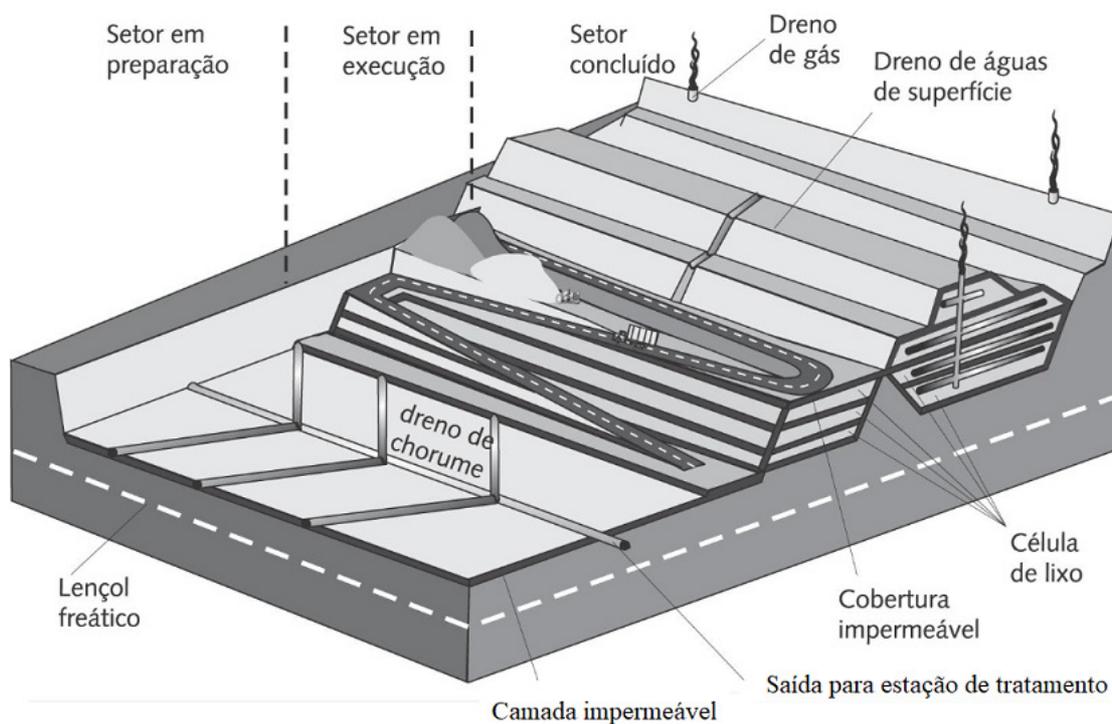
Uma das primeiras etapas no projeto de um aterro sanitário é a escolha da área onde este será implantado, que, conforme a ReCESA (2008), deve atender aos seguintes fatores:

- I) Minimizar os impactos ambientais, além de manter a distância de mananciais (ou cursos d'água) e habitações, utilizando material de cobertura com características específicas, com menor suscetibilidade a processos erosivos e/ou escorregamentos;
- II) Maior vida útil ao empreendimento, buscando a capacidade máxima para armazenamento de RSU;
- III) Minimizar gastos com instalação, operação e manutenção, e ter proximidade com a zona geradora de RSU; a jazida do material de cobertura no próprio local ou entorno;
- IV) Aceitação da sociedade, com menor rejeição por parte da comunidade.

b) Componentes do aterro

O aterro sanitário é projetado para armazenar a quantidade de resíduo estimada bem como suas reações químicas e subprodutos, como por exemplo a geração de chorume. Para isso é necessário que o projeto tenha seus componentes com a devida eficiência para garantir que não haja imprevistos. A Figura 03 apresenta os principais componentes:

Figura 03 – Aterro sanitário em diversas fases



Fonte: (IPT, 2000 apud Boscov, 2008)

1) Impermeabilização do fundo

Segundo a Cetesb (1979), a impermeabilização do fundo do aterro sanitário de Classe II é feita com uma camada de argila compactada com coeficiente de permeabilidade inferior a 10^{-7} cm/s, com espessura de no mínimo 60 cm. Sobre a camada argilosa instala-se um revestimento geossintético impermeabilizante de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) com 2,5 mm de espessura. O sistema composto (solo + geossintético) têm função de impedir os fluxos de contaminantes oriundo dos resíduos para o solo e água subterrânea. Também é necessário um geotêxtil não tecido para proteção mecânica da geomembrana de PEAD.

2) Sistemas de Drenagem das águas superficiais

Obtidos através de levantamentos topográficos e estudos climatológicos, e compostos por elementos drenantes (como calha e escadas, por exemplo), esse sistema objetiva conduzir a água oriunda de escoamento superficial no aterro, diminuindo a ação erosiva da chuva e a degradação da cobertura, da permeabilidade da superfície, que acarretaria no aumento do lixiviado e das poro-pressões no interior do aterro, causando instabilidade na massa de resíduos, podendo comprometer a estrutura do aterro.

3) Sistemas de Drenagem do lixiviado

O sistema de drenagem do lixiviado é composto por uma rede de drenos verticais e horizontais interligados, sendo que os últimos são colocados na base do aterro. Sua implantação garante a coleta e condução do líquido percolado visando minimizar a carga hidráulica na barreira de fundo, bem como encaminhar o efluente para seu local de disposição e/ou para tratamento adequado. É fundamental que os drenos do sistema de drenagem possuam uma pequena declividade para facilitar o escoamento e evitar a colmatação (obstrução dos poros do sistema drenante), para garantir a captação e escoamento do lixiviado.

4) Sistemas de Drenagem dos gases

Já o sistema de drenagem para o biogás gerado no interior da massa de resíduo, objetiva aliviar as pressões internas no aterro bem como evitar que eles escapem através dos

poros presentes no subsolo. Segundo Van Elk (2004, p.21), esse sistema deve ser implantado adequadamente desde a base do aterro, sendo realizado através de tubos verticais e horizontais que na maioria dos casos é composto por tubos de concreto armado perfurados envoltos por uma camada de brita, que é fixada com o uso de uma tela metálica, realizando a coleta do biogás para posterior queima através dos flares, para o reaproveitamento energético.

5) Camada de cobertura

A camada de cobertura aplicada sobre resíduos é composta por uma ou mais camadas de solos, materiais sintéticos ou resíduos não reativos, com a função de minimizar contato entre a massa de resíduos e o ambiente externo, minimizando a entrada de água no aterro (que aumentaria seu lixiviado e os custos de tratamento) e a emissão de gases para a atmosfera, além de evitar a aparecimento de potenciais vetores no seu entorno, pelo isolamento dos resíduos. No geral, os aterros brasileiros utilizam camadas de solo compactado como camada impermeabilizante da cobertura, podendo ser solos argilosos. De acordo com Lopes *et. al.* (2010), as coberturas finais em regiões de clima árido e semiárido devem possuir configurações e especificações diferentes das coberturas convencionais construídas em aterros de regiões de clima úmido. Isso acontece devido à baixa eficiência das camadas argilosas em climas áridos, pois devido à altas temperaturas e elevada taxa de evaporação, resultam no ressecamento da camada originando trincas, prejudicando seu desempenho.

3.4 Geração de metano

A massa de resíduo presente no aterro é composta por uma grande diversidade de materiais cuja composição varia muito devido a diversos fatores: grau de coleta seletiva na cidade, percentual de matéria orgânica no resíduo que chega ao aterro, costumes alimentícios da região, etc. Além disso, ela sofre interações físico-químicas e biológicas com o passar do tempo, favorecendo atividades microbiológicas que têm importante papel na produção de metano no aterro, sendo esse um processo complexo. Segundo Van Elk (2004, p.27), O metano (CH_4) é um dos principais componentes do biogás de aterros, que também é composto de outros gases, como o dióxido de carbono (CO_2), que, junto ao metano, constituem aproximadamente 99% de seu total.

O Metano é gerado pela decomposição anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos, mas mecanismos como a volatilização e a presença de reações químicas são

predominantes para sua formação podendo atuar associado a ação bacteriana ou agirem de forma isolada na conversão dos compostos em gases. A composição biogás além do metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), possui também em menor quantidade o nitrogênio (N_2), oxigênio (O_2) enxofre, amônia (NH_3), hidrogênio (H_2), dentre outros gases com com menores concentrações, como pode ser visto na Tabela 02.

Tabela 02 - Composição do Biogás

Componente	Porcentagem ^b
Metano	45 - 60
Dióxido de carbono	40 - 60
Nitrogênio	2 - 5
Oxigênio	0,1 - 1,0
Enxofre, mercaptanas	0 - 1,0
Amônia	0,1 - 1,0
Hidrogênio	0 - 0,2
Monóxido de carbono	0 - 0,2
Gases em menor concentração	0,01 - 0,6

Fonte: Tchobanoglous et al (1994).

2.4.1 Processo de decomposição anaeróbia

O principal processo na produção do metano é de decomposição anaeróbia, que ocorre depois de certo tempo que a massa de resíduo foi disposta no aterro, já na ausência de oxigênio. A degradação anaeróbia é muito lenta podendo produzir gases por mais de 30 anos (Van Elk, 2004). O processo anaeróbio pode ser dividido em quatro etapas:

1) **Fase Acidogênica:** é a fase inicial, produzida por enzimas celulares que decompõem a matéria orgânica, formando compostos mais simples, como ácidos solúveis (ácidos graxos, aminoácidos e açúcares). Os subprodutos formados são principalmente água, hidrogênio e dióxido de carbono. Sua duração é de algumas semanas

2) **Fase Metanogênica Instável:** é a segunda fase do processo anaeróbio, que ocorre na presença de microorganismos normalmente presentes no solo. As bactérias são a *Methanobacterium brvanti* e a *Methanosarcina barkeri*, que transformam os ácidos orgânicos e o dióxido de carbono em metano. O período de incremento da formação do metano é de seis meses à dois anos.

3) **Fase Metanogênica Estável:** é a fase mais longa, estendendo-se por décadas. A composição básica é de cerca de 60% de metano (CH₄), 40% de dióxido de carbono (CO₂) e pequenas frações variáveis de outros gases, só sofrendo grandes variações em caso de perturbações do equilíbrio de fatores como umidade e cobertura da massa de resíduos.

4) **Fase Final:** ocorre após várias décadas, quando a porcentagem de metano na composição do biogás tenha chegado a um índice desprezível, praticamente esgotando-se o material degradável nas condições do aterro.

2.4.2 Fatores que afetam a produção de metano

Diversos fatores podem afetar a produção do metano no aterro, sejam relacionados com a construção da estrutura ou com a composição da massa de resíduos, apresentam-se como importantes:

1) **Umidade:** é fundamental para a decomposição biológica da matéria orgânica, precisando estar presente em determinada quantidade para favorecer a ação microbiana.

2) **Temperatura:** segundo Van Elk (2004), faixa ótima de temperatura para a geração de metano é de 30°C a 40°C, sendo que temperaturas abaixo dos 15°C propiciam severas limitações para a atividade metanogênica. A temperatura externa pode influenciar processos no interior dos resíduos, é comum haver flutuações de temperatura na parte mais elevada do aterro devido a alterações do clima no local.

3) **pH:** a ação de bactérias metanogênicas é muito sensível à alterações de pH. O pH ótimo para o desenvolvimento dessas bactérias está na faixa entre 6 e 8 (Christensen et al., 1992).

4) **Composição dos resíduos:** a quantidade e composição de resíduos orgânicos são fatores que influem diretamente na produção de gases, pois quanto maior for a fração orgânica biodegradável, maior será o potencial de produção de gases.

5) **Forma de construção e operação do aterro:** aterros construídos com altura elevada e um eficiente sistema de impermeabilização de camada de cobertura facilitarão a ocorrência da atividade anaeróbia. Além disso, a compactação aumentará a densidade dos resíduos, acelerando a etapa aeróbia.

3.5 Modelos para estimativa de geração de metano

Existem alguns métodos de cálculo que estimam a geração de metano em aterros sanitários. Neste trabalho serão abordados os seguintes modelos consagrados: o Modelo da USEPA (United States Environmental Protection Agency), Modelo do IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) e o Modelo do Banco Mundial.

3.5.1 Modelo do IPCC

Um dos modelos desenvolvidos para a estimativa de metano em aterros sanitários foi apresentado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (2006), o IPCC, que permite estimar o volume de metano gerado a partir da seguinte equação:

$$Q_{CH_4x} = k.R_x.L_0.e^{-k(T-x)} \quad (1)$$

Onde:

Q_{CH_4x} = metano produzido no ano (m^3 /ano);

k = constante de geração de metano (ano⁻¹);

R_x = massa de resíduo total aterrado no ano (t);

X = ano de aterramento do resíduo (ano);

L_0 = potencial de geração de metano (m^3 /t de resíduo);

T = ano de realização do inventário (ano).

Um dos parâmetros mais importantes utilizado no modelo do IPCC é o potencial de geração de metano (L_0), que está relacionado com a quantidade de matéria orgânica na massa de resíduo. Em aterros com resíduos de baixo percentual de matéria orgânica ele pode ter apenas 1 m^3 de CH_4 / tonelada de resíduo. Caso a massa do aterro seja rica em matéria

orgânica, o valor de L_0 pode atingir 312 m³ de CH₄/ tonelada de resíduo. O potencial de geração de metano pode ser calculado da seguinte maneira:

$$L_0 = FCM \times COD \times COD_f \times F \times \frac{16}{12} \quad (2)$$

onde:

L_0 = potencial de geração de metano dos resíduos em m³ de CH₄/tonelada de resíduo;

FCM = fator de correção de metano;

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

COD_f = fração de COD dissociada;

F = fração do metano presente no biogás em volume;

(16/12) = Constante de conversão do carbono em metano

O fator de correção de metano (FCM) está relacionado com a gestão do resíduo sólido questão: em resíduos não gerenciados uma fração maior se decompõe aerobicamente no topo da camada, produzindo menos CH₄ se comparado a resíduos gerenciados. O local em que a massa de resíduo foi disposta é determinante para adotar o valor mais adequado do FCM, conforme mostra a Tabela 03.

Tabela 03 - Valores para o FCM

Tipo de local de disposição	FCM
Lixão	0,4
Aterro Controlado	0,8
Aterro Sanitário	1,0
Locais sem categoria	0,6

Fonte: IPCC (2006).

Outra variável de grande importância para determinação do L_0 é o carbono orgânico degradável (COD) presente nos resíduos. Ele é definido a partir da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos, tendo valores de quantidade de carbono já estabelecidos para os tipos de resíduos conforme pode-se observar na tabela 04. O COD deve ser calculado para

cada categoria de resíduo aterrada, depois os valores de cada categoria são somados para obtenção do valor final, como pode ser visto na Equação 03.

Tabela 04 - Teor de carbono orgânico degradável para cada componente do RSU.

Componente	Porcentagem COD (em massa)
Papel e Papelão	40
Resto de alimentos	15
Resíduos de parques e jardins	17
Tecidos	40
Madeiras	30

Fonte: IPCC (2006).

$$COD = 0,40(A) + 0,15(B) + 0,17(C) + 0,40(D) + 0,30(E) \quad (3)$$

Onde (A), (B), (C), (D) e (E) são as porcentagens de resíduos presentes, conforme as categorias respectivamente apresentadas na tabela 04.

Segundo Birgemer & Crutzen (1987), a fração de COD dissociada (COD_f) indica a fração de carbono que é disponível para a decomposição bioquímica, e pode ser obtida pela seguinte equação:

$$COD_f = 0,014.T + 0,28 \quad (4)$$

Onde:

COD_f : fração de COD dissociada (%);

T: temperatura na zona anaeróbia (°C).

Outro dado importante para determinação do L_0 é a fração de metano presente no biogás (F), que varia bastante dependendo do aterro. Segundo IPCC (2006), o percentual de metano em sua composição fica em torno de 50%. O valor de $\frac{16}{12}$ na equação é a constante de conversão do carbono em metano, sendo portanto um valor fixo. Quanto à taxa de geração de metano (k), depende de fatores como a umidade, disponibilidade de nutrientes, etc. A

Tabela 05 apresenta valores que k pode assumir, considerando os diferentes componentes de resíduos, e em diferentes condições climáticas, extraídos do IPCC (2006), considerando a condição climática de precipitações anuais acima de 1000 mm. Seu valor pode variar de acordo com a localização do aterro, pluviosidade ou até mesmo com hábitos de consumo da localidade. A composição gravimétrica dos resíduos do aterro vai influenciar diretamente no valor final do k, que vai variar dependendo da sua composição.

Tabela 05 - Taxa de Geração de Metano (k) Padrão recomendada.

Tipo de resíduo		Zona Climática	
		Tropical (T > 20°C)	
		Úmido (MAP > 1000 mm)	
		Padrão	Variação
Lentamente degradável	Papel/resíduos têxteis	0,07	0,06 - 0,085
	Resíduos de madeira e palha	0,035	0,03 - 0,05
Moderadamente degradável	Outro orgânico (não alimentício) putrescível/resíduo de parques	0,17	0,15 - 0,2
Rapidamente degradável	Resíduos de comida/lodo de esgoto	0,4	0,17 - 0,7
Outros		0,17	0,15 - 0,2

Fonte: Adaptado do IPCC (2006).

3.5.2 Modelo da USEPA

A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) também apresentou um modelo de estimativa de geração de metano em aterros sanitários. A equação utilizada é a seguinte:

$$Q_{CH_4} = L_0.R.(e^{-kc} - e^{-kt}) \quad (5)$$

onde:

Q_{CH_4} : Metano produzido no ano (m^3 /ano)

L_0 : Potencial de geração de metano (m^3 /ton de resíduo)

R: Massa de resíduo aterrada no ano (ton/ano)

k: Constante de geração do metano (ano^{-1})

c: Tempo desde o fechamento do aterro

t: Tempo desde o início do aterramento (ano)

Os valores para as variáveis R, c e t, geralmente são disponibilizadas pelo aterro para fins necessários (como estudos), ainda assim, em casos em que não for possível o conhecimento do valor de R, é possível estimá-lo dividindo a massa total de resíduos aterrada pelo número de anos que o aterro possui.

A taxa de geração de metano (k) determina a velocidade com que o gás será gerado a partir da massa de resíduo; quanto maior o valor de k, mais rápido ocorrerá. Essa variável depende diretamente da umidade da massa de resíduos, da disponibilidade de nutrientes para formação do metano e dióxido de carbono, do pH e da temperatura da massa de resíduos. Segundo o Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide (2005), para a determinação de valores do k deve-se basear no "EPA Method 2E", adotando o valor mais adequado para o aterro em estudo, conforme mostra a Tabela 06.

Tabela 06 - Valores para a Taxa de Geração de Metano (k)

Tipo de Emissão	Tipo de Aterro	Valores para k
CAA	Convencional	0,05 (Padrão)
CAA	Área Árida	0,02
Inventário	Convencional	0,04
Inventário	Área Árida	0,02
Inventário	Wet (Biorreator)	0,7

Fonte: Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide (2005).

O CAA (Clean Air Acts) é baseado em regulamentações federais e costuma gerar dados de maneira mais conservadora, já o modelo Inventário (Inventory), se baseia nos dados da EPA e pode ser utilizado em locais sem dados disponíveis. Portanto, para aterros que não se encontram sob regulamentação do CAA, adota-se os dados do Inventário.

Para a determinação do potencial de geração de metano (L_0), é necessário saber que o L_0 é função do tipo e da composição da massa de resíduos, sendo diretamente proporcional à quantidade de matéria orgânica presente. Segundo Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide (2005) Para a determinação dos valores de L_0 , deve-se basear na Tabela 07.

Tabela 07 - Valores para o Potencial de Geração de Metano (L_0)

Tipo de Emissão	Tipo de Aterro	L_0 (m³/ton resíduo)
CAA	Convencional	170 (padrão)
CAA	Área Árida	170
Inventário	Convencional	100
Inventário	Área Árida	100
Inventário	Wet (Biorreator)	96

Fonte: EPA (2008).

3.5.3 Modelo do Banco Mundial

Segundo Elk (2007), o modelo desenvolvido pelo Banco Mundial, também conhecido como Scholl-Canyon, é aplicado por agências reguladoras e instituições financeiras relacionadas a projetos de aproveitamento de biogás em aterros sanitários nas Américas. O modelo é considerado simples, e se baseia na teoria de que existe uma fração constante de material biodegradável disponível no aterro, por unidade de tempo. A Equação 6 apresenta o modelo:

$$Q_{CH_4} = k \times L_0 \times m_i \times e^{-kt} \quad (6)$$

onde:

Q_{CH_4} = metano produzido no ano (m^3 /ano);

k = constante de geração de metano (ano⁻¹);

L_0 = potencial de geração de metano (m^3 /t);

m_i = massa de resíduos depositada no ano (t/ano);

t = tempo após o encerramento do aterro (anos).

Valores como a massa de resíduos depositada (m_i) e o tempo (t) podem ser obtidos através de pesquisas simples. No caso da constante de geração de metano (k), também se considera a umidade como principal fator na determinação do valor a ser utilizado, consistindo na reação de primeira ordem em que o metano é gerado a partir do resíduo disposto. Segundo a ESMAP (2004), valores típicos de k variam entre 0,02 para locais secos até 0,09 para locais úmidos. A Tabela 08 mostra qual valor de k se deve adotar de acordo com as condições em questão.

O potencial de geração de metano L_0 varia com a composição do resíduo e principalmente com a quantidade de matéria orgânica presente no mesmo. Nesse caso, os valores variam em média entre 5 m^3 e 300 m^3 de metano produzidos por tonelada de resíduo. Os valores recomendados para o L_0 são apresentados na Tabela 09.

Tabela 08 - Valores sugeridos para k no modelo Scholl-Canyon.

Precipitação Anual	Resíduo Relativamente Inerte	Resíduo Moderadamente Inerte	Resíduo Altamente Degradável
>250 mm	0,01	0,02	0,03
250 a 500 mm	0,01	0,03	0,05
500 a 1000 mm	0,02	0,05	0,08
> 1000	0,02	0,06	0,09

Fonte: ESMAP (2004).

Tabela 09 - Valores sugeridos para L_0 no modelo Scholl-Canyon.

Categorização dos Resíduos	Valor Mínimo de L_0 (m³/t)	Valor máximo de L_0 (m³/ton resíduo)
Relativamente Inerte	5	25
Moderadamente Degradável	140	200
Altamente Degradável	225	300

Fonte: ESMAP (2004)

4. METODOLOGIA E RESULTADOS OBTIDOS

Neste trabalho foi realizado com base nos dados dos resíduos do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia (ASMOC), localizado no Município de Caucaia, Zona Oeste da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), no período entre 1992 e 2009 . Por se tratar do maior receptor de RSU do Estado do Ceará, e ser fundamental na gestão ambiental da RMF, este foi escolhido.

4.1 Local de Estudo

Construído em 1990 pelo Governo do Estado do Ceará, o Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia (ASMOC) começou a operar em 1991 recebendo resíduos de Caucaia. Em 1998, com a desativação do lixão do Jangurussú, os RSU da Cidade de Fortaleza também passaram a ser destinados para o local. O aterro se localiza próximo à BR 020, no Município de Caucaia, Ceará, sendo delimitado pelos paralelos 3°45' e 3°47' de latitude Sul e pelos meridianos 38°43' e 38°45' de longitude Oeste.

O ASMOC (Figura 04) ocupa uma área equivalente a 123 hectares dos quais 78,47 são destinados ao recebimento e confinamento dos resíduos sólidos, dentre outros setores (SANTOS, 2007). A base do aterro seguiu o método da escavação com trincheira, com posterior alteamento e o uso do material adequado para recobrimento da camada. A área designada para aterramento é dividida em 67 trincheiras, que em geral possuem um volume de 7.000 m³ (70 m de largura e 100 m de comprimento), com profundidade variando entre três e cinco metros. De acordo com a classificação do Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (IPECE, 2017), a região do município de Caucaia apresenta clima tropical quente, com temperatura média anual de 27°C, com precipitações pluviométricas médias de 1.243 mm/ano e períodos chuvosos de janeiro a maio.

Figura 04 - Foto aérea do ASMOC.



Fonte: Google Earth (2020).

4.2 Coleta de chorume e queima de biogás

O ASMOC foi inicialmente planejado em 1990 para uma vida útil até 2015, além disso até o ano de 2020 existia uma projeto para sua extensão. Visando proteger o lençol freático e impedir a contaminação do solo pela infiltração do líquido percolado, o fundo do aterro é impermeabilizado com solo argiloso. A massa de resíduo é compactada por maquinários adequados para facilitar o processo. O chorume gerado das reações no interior do aterro era todo direcionado para as lagoas de estabilização (Figura 05) para receber o devido tratamento, e o biogás inicialmente coletado através dos drenos (Figura 06), sendo parcialmente queimado pelos flares.

Figura 05 - Lagoa de Estabilização



Fonte: (Linard, 2010).

Figura 06 - Dreno de queima do biogás



Fonte: Linard (2010).

4.3 Caracterização dos resíduos

Os caminhões de limpeza urbana transportam os resíduos coletados na cidade até o aterro sanitário, onde são pesados e posteriormente dispostos nas células de RSU. A composição do resíduo é fundamental para estimar a produção de metano, tendo em vista que os materiais presentes têm diferentes percentuais de matéria orgânica e estão dispostos em diferentes quantidades. Na Tabela 10 é possível observar que houve um aumento considerável na massa de resíduos entre os anos de 1997 e 1998, isso se deve porque em 1998 o ASMOC, que só recebia o RSU de Caucaia, passou a receber também os resíduos de Fortaleza devido ao fechamento do lixão do Jangurussú, aumentando bastante o volume de entrada de resíduo no aterro.

Tabela 10 - Fluxo de RSU depositados no ASMOC (Linard, 2010)

Ano	Resíduos sólidos totais (ton/ano)
1992	40.000
1993	40.000
1994	40.000
1995	40.000
1996	40.000
1997	40.000
1998	1.065.169
1999	1.012.934
2000	1.113.743
2001	1.055.160
2001	1.004.630
2003	864.737
2004	730.067
2005	944.083
2006	1.062.288
2007	1.188.843
2008	1.186.655
2009	1.436.782

Fonte: ACFOR; EMLURB; ECOFOR (2010).

No estudo de Santos e Mota (2009) foi realizada uma análise acerca da composição do ASMOC, utilizando diversas amostras que chegavam ao aterro, sendo analisadas com diferentes massas, para garantir maior fidelidade ao experimento. A Tabela 11 apresenta as massas de cada amostra que foi analisada.

Tabela 11 - Dados das amostras analisadas.

Nº da amostra	Amostra inicial (Kg)	Amostra analisada (Kg)
1	100	12,5
2	400	50
3	600	75
4	800	100
5	1.000	125
6	1.200	150
7	2.000	250
8	2.400	300
9	4.000	500
10	6.000	750

Fonte: Santos e Mota (2009).

Após a análise das amostras, verificou-se que suas composições não variaram significativamente com o aumento da sua massa. Após a caracterização das amostras foi calculado um valor médio de cada componente da mesma, como pode ser observado na Tabela 12:

Tabela 12 - Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Domiciliares Depositados no Aterro Sanitário de Caucaia/CE.

Tipo de Material	Composição Gravimétrica (%)										Média
	Amostra de 12,5Kg	Amostra de 50Kg	Amostra de 75Kg	Amostra de 100Kg	Amostra de 125Kg	Amostra de 150Kg	Amostra de 200Kg	Amostra de 300Kg	Amostra de 500Kg	Amostra de 750Kg	
Matéria Orgânica	46,0	47,6	42,7	50,0	42,4	49,0	50,0	49,7	48,2	49,6	47,5
Papel/Papelão	15,6	14,0	16,0	13,0	15,2	14,0	14,0	12,7	13,4	13,6	14,2
Plástico Filme	8,0	8,0	7,9	9,6	10,9	8,7	8,4	8,7	8,4	8,3	8,7
Plástico Rígido	6,4	8,0	7,3	6,6	8,4	8,1	6,8	6,3	6,4	5,5	7,0
Outros	7,2	8,0	8,1	6,0	6,3	6,7	5,2	5,9	5,0	5,5	6,4
Metal	3,2	3,6	3,3	2,9	3,3	3,0	3,2	3,0	3,2	3,8	3,3
Têxtil	3,2	2,4	4,0	1,9	3,6	2,1	2,4	4,1	4,6	3,6	3,2
Borracha	4,0	3,2	3,5	2,1	3,6	2,7	2,4	3,0	2,8	2,2	3,0
Tetra Pak	2,8	2,2	3,1	2,5	2,4	2,7	2,4	2,3	2,4	2,8	2,6
Madeira	2,0	1,6	2,0	3,0	2,1	1,5	2,0	2,0	3,4	2,3	2,2
Vidro	1,6	1,6	2,1	2,0	1,9	1,7	3,2	2,7	2,2	2,4	2,1

Fonte: Santos e Mota (2009).

4.4 Aplicação do modelo do IPCC no ASMOC

Para estimar a produção do metano a partir do modelo do IPCC, é necessário realizar o cálculo para encontrar o valor do potencial de geração de metano, mostrado na Equação 02. Por tratar-se de um aterro sanitário, conforme a Tabela 03, o valor adotado do FCM para este caso será 1.

Para o cálculo do carbono orgânico degradável (COD), deve-se calcular cada categoria de resíduo mostrado na Tabela 04, tendo como base valores do ASMOC, presentes na Tabela 12. Os devidos valores devem ser inseridos na Equação 03, da seguinte forma:

$$COD_{asmoc} = 0,40(0,142) + 0,15(0,475) + 0,17(0,064) + 0,40(0,032) + 0,30(0,022)$$

(7);

$$COD_{asmoc} = 0,15833 \text{ ton de C/ton de resíduo}$$

É importante salientar que, conforme mostra a Tabela 12, a categoria “Resíduos de parques e jardins” presente na Tabela 04, não foi especificada no estudo de Santos e Mota (2009), cujos dados são utilizados para referência no presente trabalho. Por isso será considerado que tal categoria está incluída na classe “Outros” da Tabela 12, e seu percentual será utilizado na Equação 02.

Para o cálculo da fração de carbono orgânico dissociada (COD_f), que é a fração do carbono que será decomposto quimicamente, segundo Birgemer & Crutzen (1987) o valor da temperatura na zona anaeróbia (T) à ser adotado é de 35°C. Utilizando a Equação 04, temos:

$$COD_f = 0,014.35 + 0,28; \quad (8)$$

$$COD_f = 0,77$$

O valor da fração de metano (F), segundo o IPCC (2006, p.3.15) deve ser adotado um valor padrão de 50%. Para obter resultados mais precisos o valor adotado será de 53%, conforme mostra a Tabela 05, que foi apresentada em palestra da GNR, em visita técnica ao aterro ASMOC (2016) na disciplina do Geotecnia Ambiental da Universidade Federal do Ceará (UFC). Do lado direito corresponde a composição do biometano já tratado.

Tabela 13 - Composição de Biogás no ASMOC

Elemento	Composição (%)
CH ₄	52 a 55
CO ₂	42 a 45
N ₂	0,8 a 1,5
O ₂	0,2 a 0,3
H ₂ S	>1000 ppm

Fonte: GNR, 2016.

Com isso, através da Equação 2, é possível calcular o valor do L_0 com as variáveis previamente estabelecidas, através da Equação 9:

$$L_0 = FCM \times COD \times COD_f \times F \times \frac{16}{12} \quad (2)$$

temos:

$$L_0 = 1 \times 0,15833 \times 0,77 \times 0,53 \times \frac{16}{12} \rightarrow L_0 = 0,0861 \text{ ton de C/ton de resíduo}$$

Para colocar o L_0 em m^3 de CH_4 /tonelada de resíduo, deve-se dividir o valor calculado pela densidade do metano (0,657), obtendo então o valor final de $L_0 = 131,13 \text{ m}^3$ de CH_4 /ton de resíduo.

A Tabela 10 mostra os valores em massa que foram registrados no fluxo de resíduos anual do aterro, por ano, no período entre 1992 e 2009. Através da somatória de cada ano, obtêm-se o valor total de 12.905.091 kg de resíduos, referente à todo o período do estudo.

De acordo com a Tabela 05 é possível utilizar os dados do Município de Caucaia, onde se localiza o aterro, para adotar os valores adequados para cada categoria de resíduo, realizando uma média proporcional, assim como foi feito com o COD, na Equação 07, para obter o valor de k. A Tabela 14 mostra os valores adotados para cada tipo.

Tabela 14 - Valores para o cálculo do k

Tipo de resíduo	Valor adotado para k
Resíduos de comida/ Lama e esgoto	0,4
Papel	0,07
Têxteis	0,07
Madeira	0,035
Outros	0,17

Fonte: IPCC (2006).

O ASMOC está localizado em região com temperatura média superior à 20°C e pluviosidade superior a 1000 mm/ano. Com isso, a Tabela 14 mostra dados que serão adotados neste estudo, de acordo com ela, relacionando o valor adequado para cada categoria, com o percentual da mesma, na composição do aterro, fazendo a média ponderada com os dados da Tabela 12. A categoria “Resíduos de comida/ Lama e esgoto” será considerada como matéria orgânica. Feito isso o valor final foi de $k = 0,21$. A título de comparação, o valor de k mínimo seria de 0,12 e o k máximo seria de 0,36.

Com o fito de acompanhar a geração de metano anual de 1992 à 2009, conforme a Tabela 10, bem como o volume total acumulado no período, a Equação 1 será utilizada em cada ano para análise do comportamento da curva do gráfico, e ao final será feito o somatório

para que se obtenha o valor final. Os valores para k e L_0 , já calculados, serão constantes ao longo dos anos.

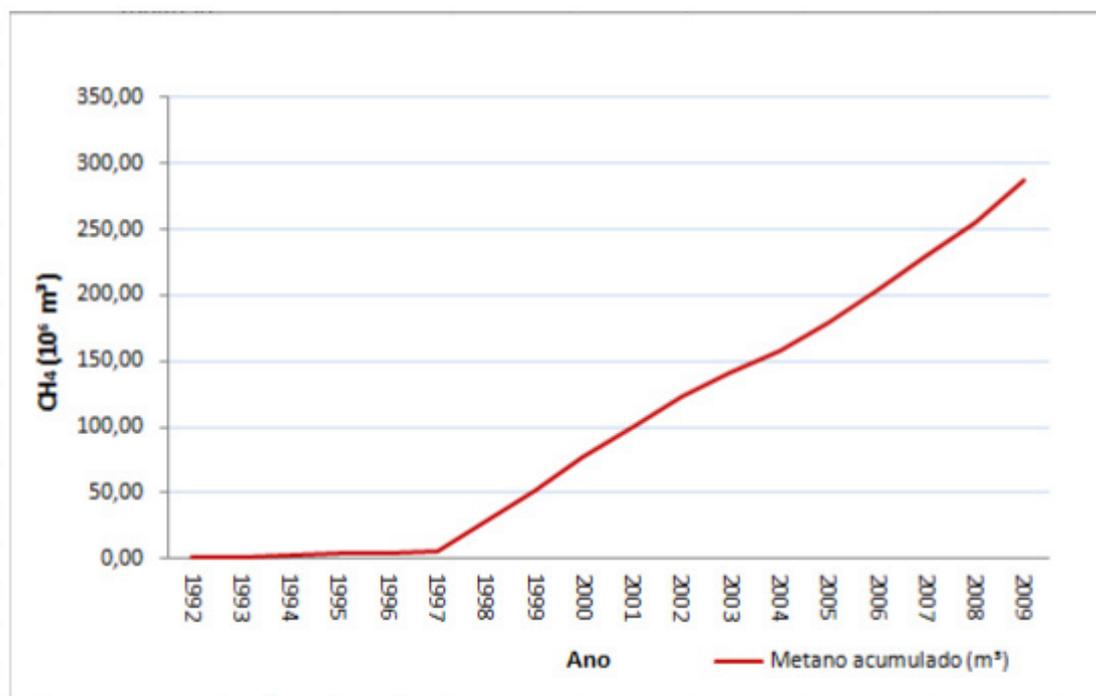
Tabela 15 - Estimativa de geração do metano por ano no ASMOC através do IPCC

Ano	Geração de metano/ano(m ³)	Metano acumulado (m ³)
1992	892.854,35	892.854,35
1993	892.854,35	1.785.708,70
1994	892.854,35	2.678.563,05
1995	892.854,35	3.571.417,40
1996	892.854,35	4.464.271,75
1997	892.854,35	5.357.126,10
1998	23.776.019,36	29.133.145,45
1999	22.610.063,18	51.743.208,63
2000	24.860.257,04	76.603.465,67
2001	23.552.604,88	100.156.070,55
2002	22.424.706,62	122.580.777,17
2003	19.302.104,78	141.882.881,95
2004	16.296.087,40	158.178.969,35
2005	21.073.215,31	179.252.184,67
2006	23.711.711,52	202.963.896,19
2007	26.536.591,08	229.500.487,26
2008	26.487.751,94	255.988.239,21
2009	32.070.926,44	288.059.165,64

Fonte: Autor

Segundo essa estimativa, o ASMOC gerou um total de 288.059.165,64 m³ de CH₄ no período de 1992 e 2009. Através da Figura 07 é possível visualizar o acumulado de metano gerado estimado ao longo dos anos no ASMOC através da metodologia utilizada pelo IPCC:

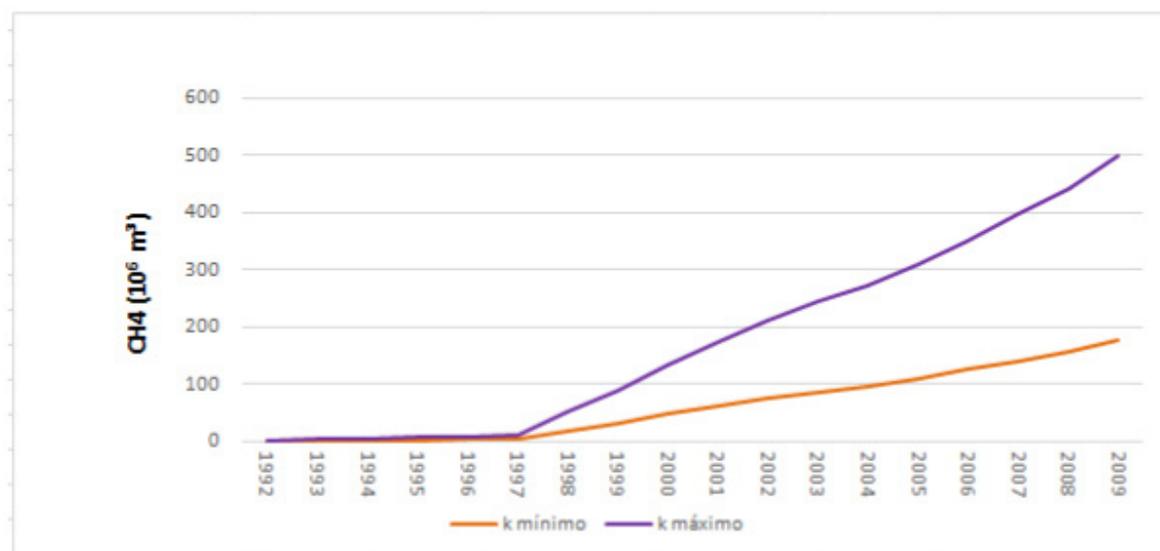
Figura 07 - Estimativa do acumulado de geração do metano no AMOSC através do IPCC.



Fonte: Autor.

Segundo essa estimativa, o valor mínimo de produção de metano seria em 1992 produzindo 892.854,35 m³ de CH₄, ano de abertura, e teria seu pico ao final de 2009, último ano do período estudado, onde o acumulado total seria de 288.059.165,64 m³ de CH₄. Durante o período analisado, a produção média de metano por ano foi de 16.003.286,98 m³ de CH₄. Além disso, é possível obter também estimativas teóricas do acumulado de metano para a adoção de um k mínimo e k máximo, e dependendo do valor adotado, o volume estimado pelo método do IPCC pode variar consideravelmente, mostrando a influência do fator k nas estimativas e já mencionados. A figura 8 mostra a faixa de variação do volume de metano gerado pelo método do IPCC, considerando um valor de k máximo e mínimo:

Figura 08 - Estimativa do acumulado de metano para k mínimo e k máximo.



Fonte: Autor

4.5 Aplicação do Modelo da USEPA no ASMOC

Para fazer a estimativa da produção de metano no ASMOC através do modelo da USEPA, deve-se ter como base a Equação 5, conforme já apresentada:

$$Q_{CH_4} = L_0 \cdot R \cdot (e^{-kc} - e^{-kt})$$

A USEPA indica adotar $c = 0$ no caso de aterros em funcionamento, que é o caso deste estudo. A massa de resíduo já foi apresentada e assim como no método do IPCC, será calculado o volume de metano em cada ano, para ao final obter o volume acumulado. No caso da metodologia da USEPA, os valores de k e L_0 são adotados conforme condições como o tipo do aterro em questão e o tipo de emissão. De acordo com a Tabela 6, baseado nos dados apresentados, o ASMOC será considerado aterro convencional. Quanto ao tipo de emissão, o CAA é utilizado baseado em regulamentações federais, estimando emissões apenas em aterros submetidos a tais regulamentações. Já o tipo Inventário se baseia num compilado de dados (EPA) podendo ser utilizado para estimar emissões em diferentes locais sem dados disponíveis, e por isso será utilizado neste estudo. Com isso o valor adotado para o L_0 será de 100 m^3 , e o valor de k será $0,04$. A Tabela 16 mostra os valores calculados através da aplicação dos dados já apresentados para as respectivas variáveis na Equação 5.

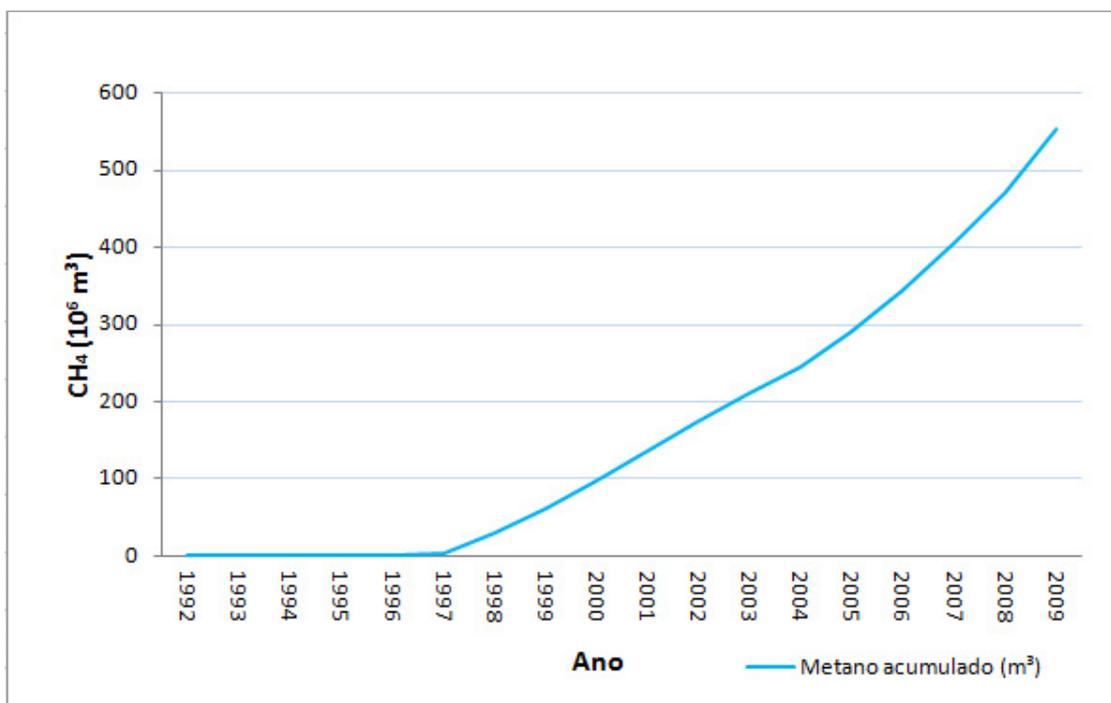
Tabela 16 - Estimativa de geração do metano por ano no ASMOC através do método da USEPA

Ano	Geração de metano/ano (m ³)	Metano acumulado (m ³)
1992	0,00	0,00
1993	195.082,30	195.082,30
1994	380.650,33	575.732,63
1995	557.168,09	1.132.900,72
1996	725.076,99	1.857.977,71
1997	884.796,87	2.742.774,58
1998	27.607.239,67	30.350.014,25
1999	29.913.147,45	60.263.161,70
2000	36.717.874,10	96.981.035,80
2001	38.236.027,95	135.217.063,75
2002	39.529.110,33	174.746.174,09
2003	36.582.715,18	211.328.889,27
2004	32.939.773,53	244.268.662,79
2005	45.122.845,69	289.391.508,49
2006	53.477.139,08	342.868.647,57
2007	62.727.333,03	405.595.980,60
2008	65.345.653,81	470.941.634,41
2009	82.267.991,92	553.209.626,34

Fonte: Autor

Segundo essa estimativa, o ASMOC gerou um total de 553.209.626,34 m³ de CH₄ no período de 1992 e 2009. Através da Figura 10 é possível visualizar o acumulado de metano gerado estimado ao longo dos anos no ASMOC através da metodologia utilizada pelo IPCC:

Figura 09 - Estimativa do acumulado de geração do metano no AMOSC através do modelo da USEPA.



Fonte: Autor

Segundo a USEPA, o metano só começaria a ser gerado a partir do segundo ano, essa estimativa mostra um volume de 195.082,30 m³ de CH₄ em 1993, e teria seu pico ao final de 2009, último ano do período estudado, onde o acumulado total seria de 553.209.626,34 m³ de CH₄. Durante o período analisado, a produção média de metano por ano foi de 30.733.868,13 m³ de CH₄.

4.6 Aplicação do Modelo do Banco Mundial no ASMOC

Para que a aplicação do modelo do Banco Mundial com os dados do ASMOC ocorram da maneira correta, deve-se utilizar a Equação 6, já apresentada:

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

Conforme ocorreu nas metodologias já apresentadas, a aplicação do modelo do Banco Mundial no ASMOC será estimada a cada ano, com posterior somatório dos valores ao final do período analisado. Aqui também seguirá a recomendação da USEPA para aterros em funcionamento, onde o tempo após o fechamento adotado será 0. No modelo em questão, as

variáveis k e L_0 são adotadas de acordo com o local de estudo, bem como sua composição. A região em que se localiza o ASMOC tem pluviosidade acima de 1000 milímetros por ano, e devido a alta concentração de matéria orgânica presente, conforme a Tabela 12, os resíduos do aterro serão considerados como moderadamente degradáveis. Baseado na Tabela 08 o valor que será utilizado para a variável k será 0,06. Seguindo a mesma lógica para o valor de L_0 , será utilizado o valor de média aritmética para resíduos moderadamente degradáveis (conforme a Tabela 09), adotando o valor de 170 m³/ton. A Tabela 17 apresenta os valores calculados através da aplicação dos dados já apresentados para as respectivas variáveis na Equação 6:

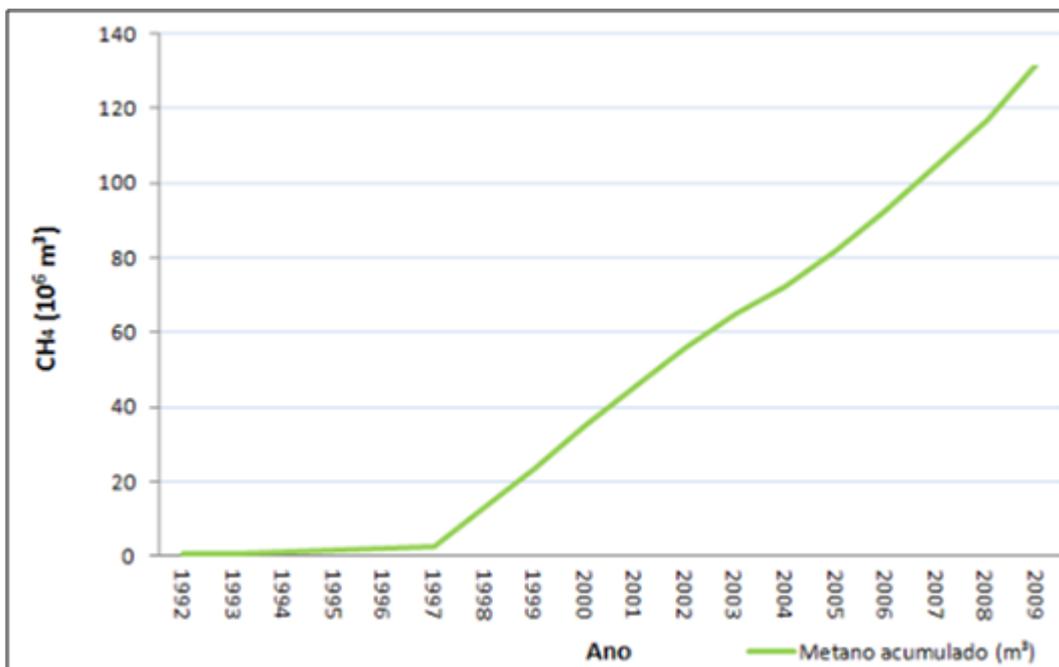
Tabela 17 - Estimativa de geração do metano por ano no ASMOC através do método do Banco Mundial

Ano	Geração de metano/ano (m ³)	Metano acumulado (m ³)
1992	408.000,00	408.000,00
1993	408.000,00	816.000,00
1994	408.000,00	1.224.000,00
1995	408.000,00	1.632.000,00
1996	408.000,00	2.040.000,00
1997	408.000,00	2.448.000,00
1998	10.864.723,80	13.312.723,80
1999	10.331.926,80	23.644.650,60
2000	11.360.178,60	35.004.829,20
2001	10.762.632,00	45.767.461,20
2002	10.247.226,00	56.014.687,20
2003	8.820.317,40	64.835.004,60
2004	7.446.683,40	72.281.688,00
2005	9.629.646,60	81.911.334,60
2006	10.835.337,60	92.746.672,20
2007	12.126.198,60	104.872.870,80
2008	12.103.881,00	116.976.751,80
2009	14.655.176,40	131.631.928,20

Fonte: Autor

Com isso, é possível ver a estimativa da produção de metano por ano bem como o valor acumulado no ASMOC ao longo dos anos através do método do Banco Mundial. a Tabela 11 facilita a visualização dos dados:

Figura 10 - Estimativa do acumulado de geração do metano no AMOSC através do modelo do Banco Mundial.



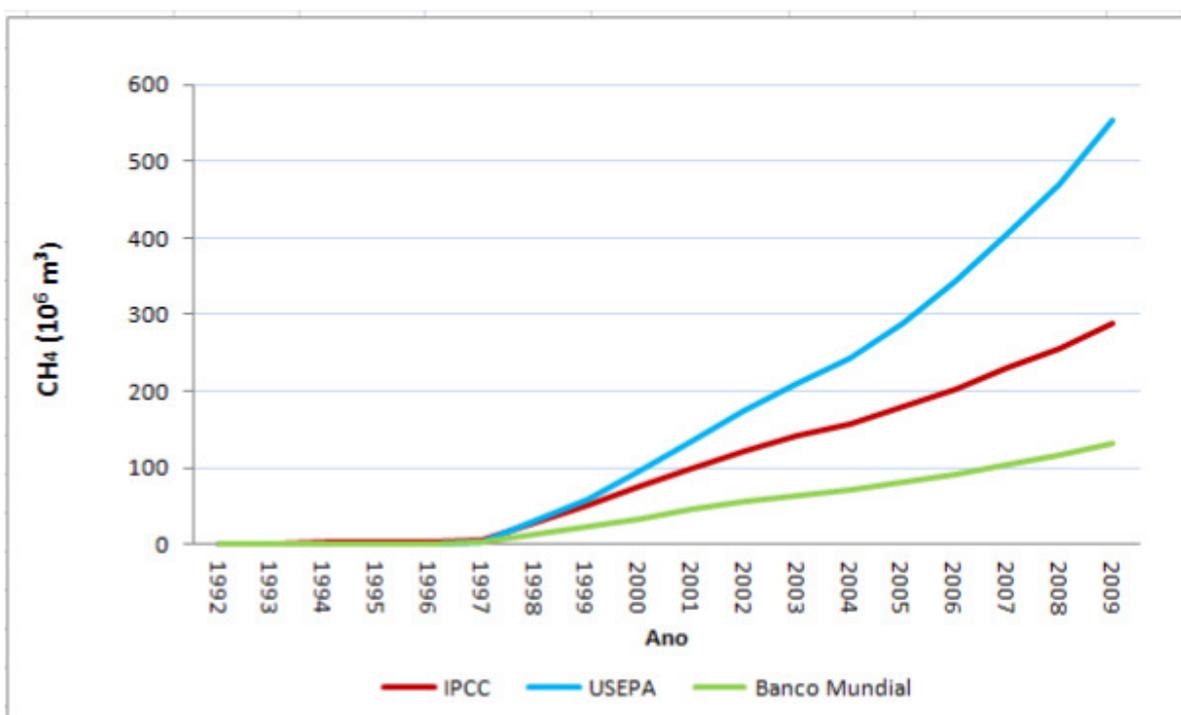
Fonte: Autor

Segundo essa estimativa, o valor mínimo de produção de metano seria em 1992, ano de abertura, produzindo 408.000 m³ de CH₄, e teria seu pico ao final de 2009, último ano do período estudado, onde o acumulado total seria de 131.631.928,2 m³ de CH₄. Durante o período analisado, a produção média de metano por ano foi de 7.312.884,9 m³ de CH₄.

4.7 Comparação dos resultados dos modelos de estimativa de metano

A Figura 12 apresenta uma análise comparativa dos gráficos gerados a partir das metodologias do IPCC, USEPA e Banco Mundial:

Figura 11 - Comparativo entre as estimativas de geração de CH₄ a partir dos modelos estudados.



Fonte: Autor

Os resultados indicaram uma discrepância no resultado final de cada estimativa, onde o modelo da USEPA apresentou volumes maiores na geração de metano, sendo quase duas vezes maior que o modelo do IPCC, e cerca de quatro vezes maior que o modelo do Banco Mundial. Alguns fatores podem ter influência direta na diferença de valores finais para cada metodologia, como as variáveis k e L_0 em cada situação. Por exemplo, a variável k obtida pelos métodos da USEPA e do Banco Mundial foram muito próximas, mas quando se trata do IPCC, o valor de k foi de 0,21, bem maior que nos outros dois métodos. No entanto, quando se trata do L_0 , o valor calculado no IPCC foi cerca de 131 m³/ton de resíduo, sendo intermediário dentre os três modelos.

No estudo de Linard (2010), que procurou analisar o aproveitamento energético do ASMOC sob a perspectiva do mecanismo de desenvolvimento limpo, é apresentada uma projeção da geração de metano no aterro através da equação aqui apresentada no IPCC. O referido autor adotou o valor de 0,08 para o k , e 120 m³/ton de resíduo para L_0 , obtendo um valor de 83.867.000 m³ de CH₄ no mesmo intervalo de tempo que o presente estudo se baseia. É importante ressaltar que o valor de k adotado por Linard (2010) é quase de três vezes menor que o calculado no presente trabalho. Segundo o autor referido, o uso do valor de $k = 0,08$ é justificado porque não havia uma avaliação disponível da variável e foi preciso adotar um valor considerado médio. No presente trabalho foi utilizada a composição gravimétrica do aterro, possibilitando a aplicação da metodologia para cálculo do k com as informações disponíveis.

No estudo de Freire (2018), foi realizada uma estimativa de geração de metano no Aterro Sanitário de Brusque -SC, através dos três modelos aqui apresentados. Em relação ao Banco Mundial, os valores de k e L_0 foram exatamente os mesmos aqui adotados. Para o modelo da USEPA, o k adotado por Freire foi 0,04 e o L_0 foi de 100 m³/ton de resíduo, sendo portanto os mesmos valores escolhidos neste estudo, visto que o método escolhido por ambos foi o Inventory, pois o CAA se restringe a aterros que estão sob sua regulamentação. Quanto ao IPCC, os valores que foram utilizados por Freire (2018) para k e L_0 foram respectivamente 0,04 e 100 m³/ton de resíduo, ambos abaixo dos valores aqui calculados pelo IPCC. No resultado final, a USEPA apresentou valores maiores, seguida do IPCC e do Banco Mundial, respectivamente.

Tarazona (2010) realizou um estudo no aterro “Macondo”, localizado no Município de Duque de Caxias/RJ, utilizando as metodologias aqui abordadas. As simulações geraram resultados semelhantes com os do presente trabalho: os valores da USEPA foram os maiores, seguidos do IPCC e por fim, do Banco Mundial. No trabalho de Tarazona (2010) a quantidade de metano gerado pelo método da USEPA foi cerca de 8 vezes maior que o do Banco Mundial.

É importante ressaltar que tanto a cidade de Brusque como a de Duque de Caxias, tem características como condições climáticas e população atendida pelo aterro, diferentes de Caucaia, que influenciam na escolha do valor adequado para cada variável. Os resultados obtidos no presente trabalho apresentaram uma mesma tendência de estimativa de geração de metano quando comparado com os resultados obtidos por Tarazona (2010) e Freire (2018). Em todos os trabalhos observou-se uma discrepância nos resultados entre os diferentes métodos utilizados sendo que o método da USEPA estimou maiores valores, seguido pelo

método do IPCC e do método do Banco Mundial. Apesar de se tratarem de diferentes aterros (no que diz respeito a clima, quantidade de resíduos, composição, etc.), o comportamento das curvas mostrou a diferença na estimativa de cada modelo e a ordem crescente dos modelos (USEPA, IPCC e Banco Mundial), em ambos os casos semelhantes com o que foi apresentado neste trabalho.

É importante ressaltar que o objetivo de cada modelo pode afetar o resultado final: o modelo do Banco Mundial objetiva estimar a geração de metano para auxiliar projetos de uso do biogás na geração de energia elétrica, propondo resultados mais conservadores, enquanto o do IPCC visa a elaboração de inventários de gases de efeito estufa, ou da USEPA que é muito utilizado em aterros com pouca disponibilidade de dados. (IPCC, 1996; ESMAP 2004; EPA, 2008).

5. CONCLUSÕES

Pôde-se notar que estimar a geração de metano em um aterro sanitário é um procedimento complexo, podendo gerar diferentes valores, dependendo do método que seja adotado. No presente trabalho foram apresentados alguns dados fundamentais para o entendimento da quantidade de gás que o aterro pôde gerar, como o volume de resíduo que entrou e sua composição gravimétrica detalhada. O propósito de cada método tem influência na estimativa final, por exemplo: o método do Banco Mundial é mais conservador, pois estima a geração de metano para fins de aproveitamento, gerando uma quantidade menor, já o do IPCC estuda uma situação mais crítica relacionada a mudanças climáticas, e está relacionado com a elaboração de inventários de gases de efeito estufa, e da USEPA que para aterros fora de sua regulamentação é bastante utilizada em locais com pouca disponibilidade de dados.

Além disso, deve-se fomentar que modelos desenvolvidos com base em determinados aterros, baseados em fatores como suas condições climáticas, composição e quantidade de resíduo, podem acabar não gerando resultados tão fielmente se aplicados em outros aterros cujas condições podem ser muito diferentes. Hábitos culturais típicos de cada região também podem influenciar a produção do gás, visto que a produção/consumo de produtos específicos em quantidade significativa podem influenciar a composição final do resíduo disposto no aterro, refletindo por exemplo no percentual de matéria orgânica do mesmo.

Após abordar cada metodologia e posteriormente aplicá-las aos dados do local de estudo, foi possível calcular valores estimados da geração de metano no ASMOC através de cada um dos três métodos, observando as semelhanças e diferenças entre eles. Em todos os casos foi notória a influência que as variáveis k e L_0 exerceram sobre o valor final, indicando que a umidade e o percentual de matéria orgânica são dados fundamentais nos cálculos para a estimativa proposta. Os valores de k e L_0 podem ser adotados dependendo de algumas características específicas de cada situação: na USEPA, o tipo de aterro (convencional ou árido) e o tipo de emissão (Inventory ou CAA) que determinam as variáveis citadas, enquanto que o Banco Mundial se baseia na pluviosidade e na degradabilidade dos resíduos para escolher cada valor.

Na metodologia do IPCC, é necessário conhecimento de dados específicos para calcular tanto k como L_0 : o primeiro depende de fatores como a zona climática e

pluviosidade em que se encontra o aterro, junto a degradabilidade de cada grupo de resíduos previamente tabelados. No segundo caso, o cálculo do L_0 se mostrou mais complexo ao envolver diversas variáveis bastante específicas dos resíduos do aterro. Por esse motivo, provavelmente o método do IPCC deve tender a gerar resultados mais realistas se comparado aos demais, desde que as variáveis sejam corretamente atribuídas.

Quanto ao comparativo de cada método, o valor final obtido pela USEPA foi bem superior aos outros dois, obtendo um acumulado final de 553.209.626,34 m³ de CH₄, o IPCC obteve valores intermediários, de 288.059.165,64 m³ de CH₄, e o Banco Mundial gerou os menores valores dentre os três, com 131.631.928,2 m³ de CH₄. Esses resultados corroboram com a estimativa de geração de metano obtidos em outros trabalhos citados na bibliografia. É importante ressaltar que os dados aqui obtidos se referem a composição do resíduo sólido urbano obtido em determinado período do aterro, e essa composição pode sofrer mudanças com o tempo e influenciar nos resultados. A escolha do método mais adequado vai depender do objetivo do estudo, no entanto, possivelmente o IPCC pode obter valores mais próximos da realidade de cada aterro.

Por fim, são apresentadas as principais sugestões para trabalhos futuros, considerando os resultados e desafios aqui encontrados:

- Estimar a geração de metano através dos métodos citados, estendendo o horizonte de projeto até um ano de interesse, utilizando coleta de dados condizente a massa de RSU do período em questão, junto a projeções da massa de resíduo que contribuiriam para o volume final;
- Estimar a captação de metano no aterro, considerando o volume útil de metano gerado, uma vez que durante o processo de geração ocorrem perdas, que podem ser calculadas baseadas em considerações teóricas disponíveis na literatura;
- Realizar uma análise comparativa da estimativa de geração de metano a partir de dados reais dos volumes de metano medidos verificando a eficiência do processo.

REFERÊNCIAS

ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, São Paulo, 2019.

AUTARQUIA DE REGULAMENTAÇÃO, FISCALIZAÇÃO E CONTROLE DOS SERVIÇOS PÚBLICOS DO SANEAMENTO AMBIENTAL (ACFOR), EMPRESA MUNICIPAL DE LIMPEZA E URBANIZAÇÃO (EMLURB) & ECOFOR. **Resíduos sólidos dispostos no ASMOC**. Fortaleza, 2010

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia Ambiental**. Oficina de Textos, São Paulo, 2008.

BIRGEMER, H.G.; CRUTZEN, P.J. **The production of methane from solid wastes**. Journal of geophysical research, Washington, v. 92, n. 2, p.2181-2187, 1987.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **POLÍTICA NACIONAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS**. Brasília, 2010.

CETESB. COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Manual de instruções básicas para a execução de aterro sanitário**. São Paulo, 1979.

EPA. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Background information document for updating AP42 section 2.4 for estimating emissions from municipal solid waste andfills**. EPA, 2008. 249 p.

EPA. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide, 2005**. Washington, 2005.

ESMAP. ENERGY SECTOR MANAGEMENT ASSISTANCE PROGRAMME. **Handbook for the Preparation of Landfill Gas to Energy Projects in Latin America and the Caribbean**. The World Bank. Waterloo, 2004.

GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ. **SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE DO CEARÁ**. Fortaleza, 2010.

IPCC . **INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE**. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: v. 5. IPCC, 2006.

IPECE. **Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará**. Governo do Estado do Ceará. Caucaia, 2017

FREIRE, V. H. N. **ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM UM ATERRO SANITÁRIO PARA APROVEITAMENTO ENERGÉTICO**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

LINARD, A. D. F. G. **ANÁLISE DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS DO ATERRO SANITÁRIO METROPOLITANO OESTE EM CAUCAIA SOB A PERSPECTIVA DO MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Ceará, 2010.

LOPES, R.L.; JUCA, J.F.T.; MARIANO, M.O.H. **Camadas de Cobertura Metanotróficas como Alternativas para Gerenciamento de Gases de Efeito Estufa em Aterros Sanitários**.

ONU. **Meio Ambiente**. Organização das Nações Unidas, 2018.

RECESA. REDE NACIONAL DE CAPACITAÇÃO E EXTENSÃO TECNOLÓGICA EM SANEAMENTO AMBIENTAL. **Projeto, Operação e Monitoramento de Aterros Sanitários**: Guia do profissional em treinamento, Nível 2. Belo Horizonte, 2008.

SANTOS, G. O.; MOTA, F. S. B. **Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Domiciliares de Fortaleza/CE Dispostos no Aterro Sanitário de Caucaia/CE**. Fortaleza, 2009.

SANTOS, G. O. **ANÁLISE HISTÓRICA DO SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DE FORTALEZA COMO SUBSÍDIO ÀS PRÁTICAS DE EDUCAÇÃO AMBIENTAL**. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização)-Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2007.

SOARES, A. B. **Apostila da disciplina de Geotecnia Ambiental**. UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Disciplina de Geotecnia Ambiental. Fortaleza, 2019.

TARAZONA, Carolina F. **Estimativa de produção de gás em aterros de resíduos sólidos urbanos**. 2010. 189 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. A. **Gestión integral de residuos sólidos**. São Paulo: McGraw-Hill, 1994.

VAN ELK, A. G. H. P. **MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO APLICADO A RESÍDUOS SÓLIDOS**: redução de emissões na disposição final. Ministério das Cidades, Brasília, 2007.