



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Ciências e Tecnologia
Faculdade de Engenharia

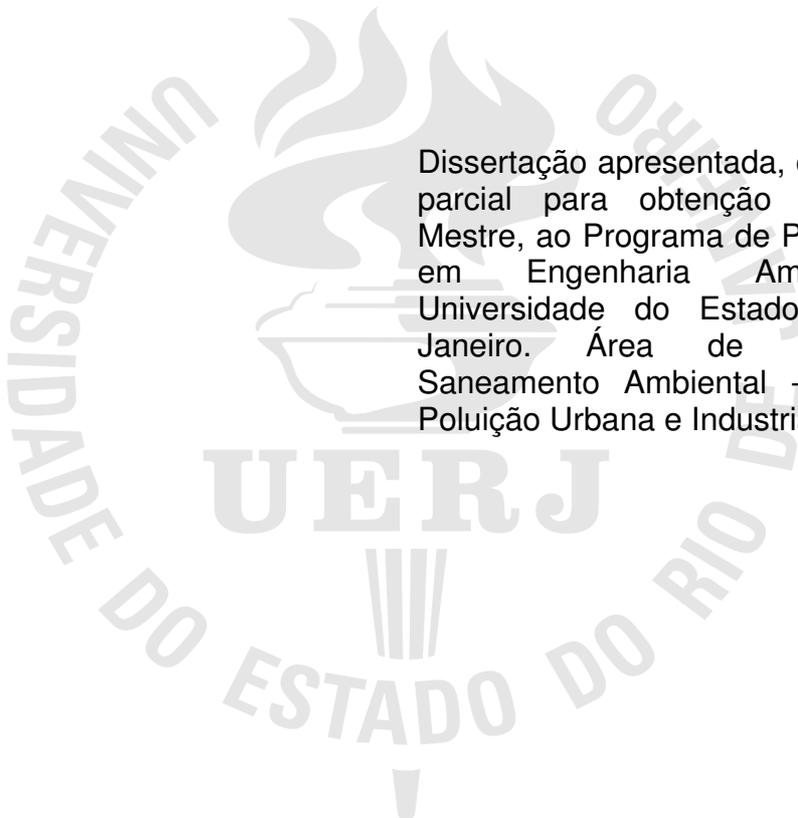
Thiago Augusto Pimenta Viana

**Análise das estimativas de emissão de metano por aterros
sanitários em projetos de MDL no Brasil**

Rio de Janeiro
2011

Thiago Augusto Pimenta Viana

Análise das estimativas de emissão de metano por aterros sanitários em projetos de MDL no Brasil



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de Concentração: Saneamento Ambiental - Controle da Poluição Urbana e Industrial.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Elisabeth Ritter

Rio de Janeiro

2011

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

V614 Viana, Thiago Augusto Pimenta.
Análise das estimativas de emissão de metano por aterros sanitários em projetos de MDL no Brasil / Thiago Augusto Pimenta Viana. - 2011.
98 f.

Orientador: Elisabeth Ritter.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Ambiental – Teses. 2. Aterro sanitário – Teses. 2. Metano - Teses. I. Ritter, Elisabeth. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. III. Título.

CDU 628.472.3

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Thiago Augusto Pimenta Viana

Análise das estimativas de emissão de metano por aterros sanitários em projetos de MDL no Brasil

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de Concentração: Saneamento Ambiental - Controle da Poluição Urbana e Industrial.

Aprovado em: 05 de abril de 2011.

Banca Examinadora:



Prof^a. Dr^a. Elisabeth Ritter (Orientadora)
UERJ



Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá
UFPE



Prof^a. Dr^a. Maria Cristina Moreira Alves
UFRJ

Rio de Janeiro

2011

RESUMO

VIANA, Thiago Augusto Pimenta. *Análise das estimativas de emissão de metano por aterros sanitários em projetos de MDL no Brasil*. 2011. 98f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

Para a maioria dos municípios brasileiros, a instalação de um aterro sanitário é um desafio, sendo uma das dificuldades o custo elevado. Existem algumas formas de mitigar estes custos e uma delas é através do mercado de emissões. Com planejamento prévio suficiente, é possível queimar o metano gerado através da degradação do resíduo, podendo resultar em benefícios para o aterro tanto através do aproveitamento (geração de energia ou venda direta) quanto recebimento de algum tipo de certificado de emissões negociável. Incluído neste “planejamento prévio suficiente” está a realização da estimativa ex-ante de emissão de metano para saber previamente qual será o aproveitamento mais indicado e a eventual receita oriunda da queima. Quando analisados os projetos de MDL feitos em aterros sanitários, pode ser notado que estas estimativas são muitas vezes mal feitas, gerando valores estimados muito acima do realmente observado durante a operação. Este erro acarreta uma perda de credibilidade deste tipo de projeto, já que o número esperado é raramente alcançado. Existem alguns fatores que contribuem para esta discrepância de valores, sendo problemas operacionais (como exemplo podem ser citados deficiência no sistema de captura do biogás e problemas na captação e recirculação de lixiviado) e de modelagem (utilização de valores de entrada experimentais obtidos sob situações muito diferentes das encontradas nos aterros brasileiros, por exemplo) os possíveis principais vilões. Este trabalho visa apresentar e discutir os principais problemas na realização de estimativas prévias de emissão de metano em aterros sanitários utilizando projetos brasileiros de MDL registrados e que estejam atualmente emitindo créditos de carbono como base para analisar a qualidade das estimativas feitas atualmente. Além disto, busca-se também entrevistar profissionais da área para tentar obter diferentes pontos de vista sobre esta questão. Fica claro que os valores estimados, de um modo geral, são entre 40 e 50% superiores aos observados. Metade dos especialistas aponta problemas operacionais diversos como os principais contribuintes desta diferença, mas problemas na modelagem parecem influenciar decisivamente na realização das estimativas. A utilização de valores de entrada no modelo precisa ser criteriosamente analisada e devem ser utilizados números obtidos através de pesquisas que representem a realidade do aterro em questão.

Palavras-Chave: Disposição de resíduos sólidos. Mecanismo de desenvolvimento limpo. Gases de efeito estufa. Mercado de emissões. Modelagem de emissão de metano.

ABSTRACT

Most of the Brazilian municipalities find the installation of a Solid Waste Disposal Site a challenge due to the high investment needed. There are some ways to mitigate these costs, including emissions trading. With previous planning, it is possible to burn the methane produced by the decomposition of the waste, resulting in benefits for the landfill by either the simple use of the gas (generating electricity or directly selling the gas) or the revenues from negotiations of emissions certificates. Included in "previous planning" is the ex-ante estimation of the methane produced by the landfill in order to know beforehand how to make the best use of the biogas and the amount of revenues that can be obtained from this use. When the CDM projects developed in landfills are analyzed, it can be noticed that these estimations generally are poorly made, resulting in estimated values far above the real methane production. This mistake results in a credibility loss by this type of project, since the expected number is rarely achieved. There are some factors that contribute to this difference in values, being operational problems (such as deficiency in the biogas capture and problems in the collection and recirculation of the leachate) and modeling problems (such as the use of input values obtained from experiments in laboratories under different situations from the ones found in Brazilian landfills) the major issues. The present work aims to present and discuss the main problems in estimating ex-ante the methane produced by landfills, using Brazilian CDM projects that are registered and issuing carbon credits as sources to analyze the quality of estimations currently being made. Additionally, experts in landfills and estimations are interviewed in order to obtain different points of view. It is clear that the estimated values, in general, are between 40 and 50% higher than observed during the operation of the landfill. Half of the experts point operational problems as the main contributors, however modeling problems seems to have a decisive influence in estimations. The use of input values must be carefully analyzed and must be used numbers obtained through researches that represent the reality of the landfill in question.

Keywords: Solid waste disposal. Clean development Mechanism. Greenhouse gases. Emissions trading. Methane emissions modeling.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – DESTINAÇÃO FINAL DE RSU NO BRASIL, POR DIA.	20
FIGURA 2 – EMISSÕES TOTAIS DO SETOR DE RESÍDUOS POR FONTES.	22
FIGURA 3 – EMISSÕES ORIUNDAS DE ATERROS SANITÁRIOS NO BRASIL.	22
FIGURA 4 – GASTOS COM SERVIÇOS DE LIMPEZA URBANA E GERAÇÃO DE RESÍDUOS PER CAPITA.....	25
FIGURA 5 – COMPARAÇÃO DE GASTOS PER CAPITA DOS SERVIÇOS DE LIMPEZA URBANA NAS CIDADES COM A QUANTIDADE DE RESÍDUO PER CAPITA.....	26
FIGURA 6 – TAXA DE SUCESSO DA PRIMEIRA EMISSÃO DOS PROJETOS DE MDL REGISTRADOS QUE JÁ EMITIRAM CRÉDITOS.....	30
FIGURA 7 – PROJETOS REGISTRADOS NO CONSELHO EXECUTIVO DO MDL DIVIDIDOS POR ANO DE REGISTRO E ENTRADA EM VALIDAÇÃO.	31
FIGURA 8 – TAXA DE SUCESSO DA PRIMEIRA EMISSÃO DOS PROJETOS DE MDL REGISTRADOS NO BRASIL QUE JÁ EMITIRAM CRÉDITOS.....	33
FIGURA 9 – COMPARAÇÃO ENTRE O RESULTADO DE DIFERENTES EQUAÇÕES PARA PRODUÇÃO DE METANO EM ATERRO.....	53
FIGURA 10 – GRÁFICO REPRESENTANDO A EVOLUÇÃO DAS REDUÇÕES DE EMISSÃO MONITORADAS E ESTIMADAS DO PROJETO ONYX DE RECUPERAÇÃO DE GÁS DE ATERRO.	64
FIGURA 11 – GRÁFICO REPRESENTANDO A EVOLUÇÃO DAS REDUÇÕES DE EMISSÃO MONITORADAS E ESTIMADAS DO PROJETO NOVA GERAR - PROJETO DE ENERGIA A PARTIR DE GASES DE ATERRO SANITÁRIO.	66
FIGURA 12 – GRÁFICO REPRESENTANDO A EVOLUÇÃO DAS REDUÇÕES DE EMISSÃO MONITORADAS E ESTIMADAS DO PROJETO DE GÁS DO ATERRO DE BRAGANÇA - EMBRALIXO/ARAÚNA.	69
FIGURA 13 – GRÁFICO REPRESENTANDO A EVOLUÇÃO DAS REDUÇÕES DE EMISSÃO MONITORADAS E ESTIMADAS DO PROJETO DE ENERGIA DE GASES DE ATERRO SANITÁRIO DA EMPRESA MARCA.	71
FIGURA 14 – GRÁFICO REPRESENTANDO A EVOLUÇÃO DAS REDUÇÕES DE EMISSÃO MONITORADAS E ESTIMADAS DO PROJETO VEGA BAHIA - PROJETO DE GÁS DE ATERRO DE SALVADOR DA BAHIA.	73
FIGURA 15 – GRÁFICO REPRESENTANDO A EVOLUÇÃO DAS REDUÇÕES DE EMISSÃO MONITORADAS E ESTIMADAS DO PROJETO BANDEIRANTES DE GÁS DE ATERRO E GERAÇÃO DE ENERGIA EM SÃO PAULO, BRASIL.	76
FIGURA 16 – GRÁFICO REPRESENTANDO A EVOLUÇÃO DAS REDUÇÕES DE EMISSÃO MONITORADAS E ESTIMADAS DO PROJETO DE RECUPERAÇÃO DE GÁS DE ATERRO ESTRE - PAULÍNIA (PROGAE).	78
FIGURA 17 – GRÁFICO REPRESENTANDO A EVOLUÇÃO DAS REDUÇÕES DE EMISSÃO MONITORADAS E ESTIMADAS DO PROJETO DE GÁS DE ATERRO CDR PEDREIRA (PROGAEP).....	80
FIGURA 18 – GRÁFICO REPRESENTANDO A EVOLUÇÃO DAS REDUÇÕES DE EMISSÃO MONITORADAS E ESTIMADAS DO PROJETO DE GÁS DE ATERRO CDR PEDREIRA (PROGAEP).....	82

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – QUANTIDADE TOTAL GERADA DE RSU POR REGIÃO E BRASIL, POR DIA.....	19
TABELA 2 – QUANTIDADE DE RSU COLETADO POR REGIÃO E BRASIL, POR DIA.....	19
TABELA 3 – QUANTIDADE DE MUNICÍPIOS POR MODALIDADES PRATICADAS DE DESTINAÇÃO FINAL DE RSU. ...	20
TABELA 4 - DESTINO FINAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL, DE 1989 A 2008.....	21
TABELA 5 – QUANTIDADE DE PROJETOS DE MDL REGISTRADOS POR TIPOS.....	30
TABELA 6 – PROJETOS DE MDL DE QUEIMA DE GÁS DE ATERRO SANITÁRIO DESENVOLVIDOS NO BRASIL E QUE POSSUEM CRÉDITOS EMITIDOS.....	32
TABELA 7 – INFORMAÇÕES BÁSICAS SOBRE TODAS AS VERSÕES DA METODOLOGIA ACM0001.....	41
TABELA 8 – CONTRIBUIÇÕES DE CADA PARÂMETRO PARA A VARIÂNCIA NA ESTIMATIVA.	52
TABELA 9 – VELOCIDADE DE REAÇÃO PARA DIFERENTES TIPOS DE RESÍDUOS.....	57
TABELA 10 – CONTEÚDO DE CARBONO ORGÂNICO POR TIPO DE RESÍDUO PARA O PROJETO ONYX.....	63
TABELA 11 – INFORMAÇÕES SOBRE RCEs DO PROJETO ONYX DE RECUPERAÇÃO DE GÁS DE ATERRO.	64
TABELA 12 – INFORMAÇÕES SOBRE RCEs DO PROJETO NOVAGERAR - PROJETO DE ENERGIA A PARTIR DE GASES DE ATERRO SANITÁRIO.	66
TABELA 13 – INFORMAÇÕES SOBRE RCEs DO PROJETO DE GÁS DO ATERRO DE BRAGANÇA - EMBRALIXO/ARAÚNA.	68
TABELA 14 – INFORMAÇÕES SOBRE RCEs DO PROJETO DE ENERGIA DE GASES DE ATERRO SANITÁRIO DA EMPRESA MARCA.....	70
TABELA 15 – INFORMAÇÕES SOBRE RCEs DO PROJETO VEGA BAHIA - PROJETO DE GÁS DE ATERRO DE SALVADOR DA BAHIA.	72
TABELA 16 – INFORMAÇÕES SOBRE RCEs DO PROJETO BANDEIRANTES DE GÁS DE ATERRO E GERAÇÃO DE ENERGIA EM SÃO PAULO, BRASIL.....	75
TABELA 17 – INFORMAÇÕES SOBRE RCEs DO PROJETO DE RECUPERAÇÃO DE GÁS DE ATERRO ESTRE - PAULÍNIA (PROGAE).....	77
TABELA 18 – INFORMAÇÕES SOBRE RCEs DO PROJETO DE GÁS DE ATERRO CDR PEDREIRA (PROGAEP).	79
TABELA 19 – INFORMAÇÕES SOBRE RCEs DO PROJETO REDUÇÃO DE EMISSÕES DE BIOGÁS, CAIEIRAS - BRASIL.	82
TABELA 20 – COMPARAÇÃO ENTRE AS INFORMAÇÕES BÁSICAS UTILIZADAS PARA REALIZAÇÃO DE ESTIMATIVA NOS ATERROS CITADOS E SEUS RESULTADOS.	86

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

φ	Fator de correção devido a incertezas do modelo
ABRELPE	Associação brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ACM0001	Metodologia do MDL: Metodologia consolidada de linha de base e monitoramento para atividades de projeto de gás de aterro sanitário (do inglês <i>Consolidated baseline and monitoring methodology for landfill gas project activities</i>)
AM0002	Metodologia do MDL: Redução de emissão de gás estufa através de captura e queima de gás de aterro sanitário onde a linha de base é estabelecida através de um contrato de concessão pública (do inglês <i>Greenhouse gas emission reductions through landfill gas capture and flaring where the baseline is established by a public concession contract</i>)
AM0003	Metodologia do MDL: Análise financeira simplificada para projetos de captura de gás de aterro sanitário (do inglês <i>Simplified financial analysis for landfill gas capture projects</i>)
AM0010	Metodologia do MDL: Projetos de captura de gás de aterro sanitário e geração de eletricidade onde a captura do gás de aterro sanitário não é exigida por lei (do inglês <i>Landfill gas capture and electricity generation projects where landfill gas capture is not mandated by law</i>)
AM0011	Metodologia do MDL: Recuperação de gás de aterro com geração de eletricidade com cenário de linha de base não contendo captura ou destruição de metano (do inglês <i>Landfill gas recovery with electricity generation and no capture or destruction of methane in the baseline scenario</i>)
CAR	Climate Action Reserve, padrão voluntário utilizado nos Estados Unidos
CCX	Bolsa do Clima de Chicago (do inglês <i>Chicago Climate Exchange</i>)
CD4CDM	Desenvolvimento de Capacidade para o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (do inglês <i>Capacity Development for the Clean Development Mechanism</i>)
CDM	Clean Development Mechanism
CDR	Central de Disposição de Resíduos
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CGR	Central de Gerenciamento de Resíduos
CH ₄	Gás metano
CRT	Climate Reserve Tonnes, unidade de emissão do CAR
CTR	Central de Tratamento de Resíduos

DOC _f	Fração de Carbono Orgânico Degradável (DOC) a ser decomposto
DOC _j	Fração de Carbono Orgânico Degradável no resíduo orgânico tipo j (do inglês Degradable Organic Carbon)
EPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (do inglês <i>Environmental Protection Agency</i>)
EU ETS	Bolsa de Emissões da Europa (do inglês <i>European Union Emissions Trading Scheme</i>)
F	Fração volumétrica de metano no biogás
FOD	Método de Decaimento de Primeira Ordem (do inglês <i>First Order Decay Model</i>)
GEE	Gases de Efeito Estufa
GWP	Potencial de Aquecimento Global (do inglês <i>Global Warming Potential</i>)
IBGE	Instituto brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (do inglês <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>)
k _j	Taxa de decomposição para o resíduo tipo j
MCF	Fator de Correção de Metano (do inglês Methane Correction Factor)
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
NBR	Norma brasileira
ONU	Organização das Nações Unidas
OX	Fator de oxidação
PNRS	Política Nacional dos Resíduos Sólidos
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (do inglês <i>United Nations Environment Programme – UNEP</i>)
RCE	Redução Certificada de Emissão (do inglês <i>Certified Emission Reduction – CER</i>)
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
tCO ₂ e	Tonelada de gás carbônico equivalente
UNFCCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (do inglês <i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>)
VCS	Voluntary Carbon Standard, padrão voluntário mais utilizado no mundo
VCU	Voluntary Carbon Unit, unidade de emissão do VCS

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	11
1 METODOLOGIA	15
2 DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS, METANO E O MERCADO DE EMISSÕES ..	18
2.1. DESTINAÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL	18
2.2. EMIÇÃO DE METANO POR ATERROS SANITÁRIOS	21
2.3. CUSTOS COM LIMPEZA PÚBLICA	24
2.4. O MERCADO VOLUNTÁRIO DE EMISSÕES E O MDL	28
2.5. SITUAÇÃO BRASILEIRA NO MDL EM PROJETOS DE ATERROS	31
3 ESTIMATIVAS DE EMISSÃO DE METANO POR ATERROS	34
3.1. HISTÓRICO DAS METODOLOGIAS UTILIZADAS PELO MDL	36
3.2. MODELO UTILIZADO PARA ESTIMATIVA DE EMISSÃO DE METANO	42
3.3. PARÂMETROS DE ENTRADA DO MODELO	46
3.3.1. <i>OX (Fator de oxidação):</i>	46
3.3.2. <i>MCF (Fator de correção de metano)</i>	47
3.3.3. <i>DOC_j (Fração de Carbono Orgânico Degradável no resíduo orgânico tipo j)</i> ..	48
3.3.4. <i>k_j (Taxa de decomposição para o resíduo tipo j)</i>	49
3.3.5. <i>Fator de correção devido a incertezas do modelo (φ)</i>	51
3.3.6. <i>Fração volumétrica de metano no biogás (F)</i>	51
3.3.7. <i>Fração de Carbono Orgânico Degradável (DOC) a ser decomposto (DOC_f)</i> ..	51
3.3.8. <i>Resumo sobre incertezas do modelo</i>	52
3.4. HIPÓTESES PARA BAIXA EFICIÊNCIA / INCONSISTÊNCIAS NA ESTIMATIVA	55
3.4.1. <i>Operação do aterro</i>	55
3.4.2. <i>Varição de umidade devido a chuvas, composição do resíduo e/ou lixiviado</i>	56
3.4.3. <i>Velocidade de decomposição do resíduo</i>	59
3.4.4. <i>Captura do biogás</i>	60
4 ESTUDOS DE CASO: ALGUNS PROJETOS DE MDL NO BRASIL	62

4.1.	PROJETO ONYX DE RECUPERAÇÃO DE GÁS DE ATERRO	62
4.2.	PROJETO NOVA GERAR - PROJETO DE ENERGIA A PARTIR DE GASES DE ATERRO SANITÁRIO.....	65
4.3.	PROJETO DE GÁS DO ATERRO DE BRAGANÇA - EMBRALIXO/ARAÚNA	66
4.4.	PROJETO DE ENERGIA DE GASES DE ATERRO SANITÁRIO DA EMPRESA MARCA..	69
4.5.	PROJETO VEGA BAHIA - PROJETO DE GÁS DE ATERRO DE SALVADOR DA BAHIA ..	71
4.6.	PROJETO BANDEIRANTES DE GÁS DE ATERRO E GERAÇÃO DE ENERGIA EM SÃO PAULO, BRASIL	73
4.7.	PROJETO DE RECUPERAÇÃO DE GÁS DE ATERRO ESTRE - PAULÍNIA (PROGAE)	76
4.8.	PROJETO DE GÁS DE ATERRO CDR PEDREIRA (PROGAEP)	78
4.9.	PROJETO DE REDUÇÃO DE EMISSÕES DE BIOGÁS, CAIEIRAS - BRASIL.....	80
4.10.	RESUMO COMPARATIVO ENTRE OS CASOS CITADOS	83
4.11.	OPINIÕES DE ESPECIALISTAS	87
5	CONCLUSÕES	90
	REFERÊNCIAS.....	92
	ANEXO I – Pesquisa de Mestrado	97

INTRODUÇÃO

O gerenciamento e disposição de resíduos sólidos é um assunto complexo em todo o mundo e que impacta diretamente a saúde humana e o ecossistema terrestre como um todo (Meyers et al., 2006).

É sabido que aterros sanitários são largamente utilizados para disposição de resíduos sólidos (Sanphoti et al., 2006). Existe uma dependência histórica de disposição de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) em aterros (Barlaz, 2006). Este quadro mundial é ainda mais presente nos países em desenvolvimento, onde a falta de recursos e a falta de vontade política na aplicação dos mesmos acarreta um quadro de, em muitas cidades, não haver local adequado para dispor o resíduo corretamente.

Estima-se que seja depositada em aterros anualmente uma quantidade superior a 1,5 bilhões de toneladas de RSU (Themelis e Ulloa, 2007). Como não há tecnologia viável para substituição de aterros sanitários (havendo apenas um esforço para minimizar sua utilização) e em muitas cidades do mundo em desenvolvimento não há sequer aterros corretamente instalados para recebimento de resíduos, a dependência de nossa civilização a aterros sanitários deverá perdurar por bastante tempo.

Apesar desta situação não ser diferente no Brasil, existe um sério movimento na direção da regularização dos locais de disposição de resíduos sólidos neste país. Isto pode ser visto claramente através de legislações recentemente aprovadas, tornando obrigatória a correta disposição dos resíduos sólidos (Brasil, 2010a e 2010b). Porém, ao mesmo tempo em que tenta regulamentar a disposição de resíduos, é criado um impasse para a maioria dos municípios brasileiros. A construção de um aterro sanitário da forma correta é cara, caindo sobre as prefeituras esta responsabilidade. O número de moradores do município está diretamente ligado à geração de resíduos e à quantidade de receita do município através do pagamento de impostos. Com pequenos municípios, ocorre que não há moradores suficientes (leia-se arrecadação e geração de resíduos suficientes) para justificar um aterro sanitário municipal. Ou seja, devido ao seu alto custo, aterros sanitários que contemplem apenas um município são mais viáveis apenas nos grandes centros.

Uma saída para esta situação é a cooperação entre municípios, de forma que vários compartilhem um mesmo aterro sanitário e contribuam em conjunto com investimentos para sua instalação e manutenção. Além disso, há também formas de utilização dos resíduos e seus subprodutos para gerar receita e minimizar os gastos efetivos com o aterro. Um dos subprodutos dos resíduos é o gás metano (CH_4) contido no biogás, gerado através da decomposição anaeróbica do material orgânico presente no aterro.

O gás metano é o mais simples dos hidrocarbonetos, é inodoro e possui um alto teor de inflamável, com grande potencial para ser utilizado como combustível. É produzido por um grande número de processos tanto naturais quanto antropogênicos. Existem várias opções para aproveitamento comercial do metano: geração de eletricidade (tanto para abastecimento da rede elétrica quanto para abastecimento apenas dos equipamentos do próprio aterro), injeção na tubulação de gás natural, geração de vapor (para secagem do lixiviado), entre outros. Entretanto, outra característica do metano é ser um dos principais contribuintes do efeito estufa e nesta característica tem origem uma diferente fonte de receita para viabilizar projetos em aterros sanitários envolvendo captura e destruição de metano: a venda de certificados de redução de emissão.

O tempo de vida médio do metano na atmosfera é de 12 anos (EPA, 2010). Através de uma série de reações em cadeia e *feedbacks*, é um ativo participante do efeito estufa e também do aquecimento global. De acordo com diversas fontes, o Potencial de Aquecimento Global (do inglês *Global Warming Potential* – GWP) de uma molécula de metano em um período de 100 anos é de 21 (EB, 2008), 23 (IPCC, 2001) ou 25 (IPCC, 2007), dependendo da fonte. O valor do GWP tem como referência o GWP 1, que é o de uma molécula de gás carbônico (CO_2) em um período de 100 anos.

A unidade de um certificado de redução de emissão seja ele oriundo de sistemas voluntários de redução de emissão (como o Voluntary Carbon Standard – VCS –, válido em todo o mundo, ou o Climate Action Reserve – CAR –, válido apenas nos Estados Unidos) ou de mecanismos de flexibilização do Protocolo de Quioto (como o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL) é a “tonelada de gás carbônico equivalente” (tCO_2e). O certificado de redução de emissão pode possuir diversos nomes nos diferentes sistemas. Por exemplo, no VCS o certificado chama-se *Voluntary Carbon Unit* (VCU); no CAR chama-se *Climate Reserve Tonnes* (CRT);

no MDL chama-se *Certified Emission Reduction* (RCE) ou em português “Redução Certificada de Emissão” (RCE). O chamado “Crédito de Carbono” é meramente uma forma diferente de nomear os RCEs. Resumindo, todos os gases de efeito estufa são comparados ao gás carbônico para obtenção de certificados de redução de emissão. Desta forma, enquanto uma tonelada de carbono que deixou de ser emitida gera um certificado, uma tonelada de metano que se evitou emitir para a atmosfera gera, dentro das regras atuais para cálculos de redução de emissão de gases de efeito estufa, 21¹ certificados.

Desta forma o metano capturado e “destruído” (queimado, resultando em CO₂) possui potencial de ser transformado em um papel negociado em vários países do mundo, gerando receita. De acordo com a EPA (2006a), em 2000 as emissões de metano oriundas de aterros sanitários de RSU representaram 12% do total das emissões de metano no mundo. O potencial de receita oriunda de projetos de redução de emissão de metano em aterros sanitários é grande, mas ainda subaproveitado. No sistema de registro de projetos do VCS, um sistema voluntário bastante utilizado no mundo, no universo de 535 projetos registrados existe 9 projetos de aterro sanitário². No MDL, existem apenas 153 projetos de aterros sanitários (PNUMA, 2010) em um universo de aproximadamente 2100 projetos registrados. Se esta comparação foi realizada por quantidade de certificados de redução de emissão médios, fica ainda mais evidente o subaproveitamento. Entretanto, este status atual é compreensível se levados em consideração todas as dificuldades enfrentadas por aterros sanitários principalmente no aspecto financeiro.

Além do alto investimento inicial, outro fator que influencia decisivamente na dificuldade de implementação de projetos envolvendo redução de emissão é a dificuldade de prever ex-ante a quantidade efetiva de certificados que serão emitidos e quando serão emitidos. O retorno financeiro depende da venda destes certificados. Estimativas mal feitas de redução de emissão, bem como excessiva burocratização (e conseqüentes atrasos) na emissão dos certificados vem sucessivamente minando a confiança de investidores. Quanto mais arriscado e incerto for o retorno de um projeto que envolva emissões em aterros sanitários, mais difícil será atrair e/ou direcionar investimentos para o setor/atividade.

¹ O valor 21 é o aprovado pela UNFCCC e será utilizado pelo protocolo de quioto até o fim de 2012, quando pode ser revisado.

² <https://vcsprojectdatabase1.apx.com/myModule/rpt/myrpt.asp?r=111>, acesso em Fevereiro 2011.

Os benefícios sociais e ambientais da modernização dos aterros são evidentes e extremamente importantes para nosso modo de vida. Conhecer os riscos é essencial na tomada de decisão, mas saber formas de mitigação dos riscos é ainda mais importante no resgate da credibilidade e na consequente atração de investimentos para estabelecimentos de projetos.

O objetivo do presente estudo é iniciar uma discussão sobre a baixa eficiência de geração de metano (e consequentemente de certificados de redução de emissão) dos aterros sanitários quando comparados números reais monitorados com valores estimados. Para tanto, serão exploradas as principais fontes de incerteza no modo de cálculo atual de realização de estimativas ex-ante de emissão de metano. Busca-se compilar o conhecimento sobre o assunto em pesquisas internacionais e contribuir para o conhecimento deste problema no Brasil, já que poucos estudos no país o abordam, e tecer considerações sobre a possibilidade de minimização das incertezas.

Os objetivos específicos são:

- ✘ Fornecer informações para recuperar a credibilidade deste tipo de projeto no Brasil e desta forma auxiliar futuros gestores e técnicos de aterros a não cometerem os mesmos erros;
- ✘ Avaliar a influência das hipóteses levantadas na diferença encontrada entre a estimativa e a real geração de metano nos aterros brasileiros;
- ✘ Explorar o conhecimento já existente sobre o modelo matemático utilizado na estimativa de geração de metano para considerar possíveis melhorias no cálculo;
- ✘ Reportar a opinião de alguns especialistas do setor sobre as diferenças encontradas.

Neste trabalho, o capítulo 1 descreve a metodologia utilizada para coleta das informações. O capítulo 2 fornece um panorama geral da situação de disposição de resíduos no Brasil, emissões de metano em aterros, custos de limpeza pública e sobre os mercados de emissões. Já o capítulo 3 aborda o modo de estimar estas emissões de metano, com foco nos projetos de MDL. O capítulo 4 mostra os estudos de caso, no qual alguns projetos brasileiros de MDL são descritos e, além disso, consta também neste capítulo a opinião de alguns especialistas consultados. No capítulo 5 podem ser encontradas as principais conclusões obtidas.

1 METODOLOGIA

Buscando avaliar as diferenças entre números estimados e emissões efetivamente evitadas de metano em aterros sanitários, o enfoque na escolha das informações se deu considerando alguns fatores. O primeiro deles foi a disponibilidade das informações para consulta e replicação do trabalho. Devido a isto, com exceção das opiniões de especialistas e profissionais ligados a aterros, todas as demais informações encontram-se disponíveis na internet no momento de elaboração do trabalho.

O segundo fator levado em consideração foi a confiabilidade das informações. O objetivo do trabalho é avaliar estimativas de emissões de metano por aterros sanitários, mas em países em desenvolvimento tais empreendimentos são frequentemente mal monitorados. Como normalmente não existe regulamentação para gases liberados por aterros, estas informações são relegadas a segundo plano. Isto dificulta bastante os trabalhos realizados nesta área, já que qualquer pesquisa precisa ser concebida e desenhada em um momento muito inicial (disponibilização de estruturas que possibilitem amostragem e rotinas de monitoramento) e o aterro precisa prever este monitoramento em sua concepção ou inviabiliza sua execução futura. Desta forma, um modo encontrado para avaliar as emissões de aterro foi utilizar projetos que contemplem tanto a realização de estimativas quanto um monitoramento confiável das emissões. Este foi o parâmetro definidor para escolha de projetos de MDL como fonte de informações.

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo apresenta inúmeras garantias e controles de qualidade para os dados e, além disso, grande parte das informações encontra-se disponível na internet. A Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (do inglês *United Nations Framework Convention on Climate Change*) é o órgão das Organizações das Nações Unidas que, através do Conselho Executivo do MDL, centraliza todas as informações disponíveis sobre MDL. O resultado desta centralização é o endereço da internet <http://cdm.unfccc.int/>, onde podem ser vistas todas as informações sobre MDL existentes no mundo.

Especificamente para informações sobre os projetos de MDL o endereço para consulta é <http://cdm.unfccc.int/Projects/projsearch.html>, o qual disponibiliza um sistema de pesquisa de projetos. O endereço de cada projeto de MDL abordado

neste trabalho encontra-se citado como nota de rodapé diretamente no estudo de caso sobre o respectivo projeto. As informações sobre redução de emissões foi retirada diretamente do(s) Relatório(s) de Monitoramento constantes no site de cada projeto, na seção “*Requests for Issuance and related documentation*”.

Para obtenção de informações sobre as metodologias e ferramentas de cálculo utilizadas para padronizar os projetos de MDL foi utilizado o endereço <http://cdm.unfccc.int/methodologies/index.html>. Neste local podem ser vistas todas as metodologias (tanto atualmente válidas quanto já suspensas ou canceladas) que devem ser utilizadas por projetos de MDL que queiram ser registrados dentro deste mecanismo. Também é possível ver todas as versões de cada metodologia que já foi utilizada.

Outra fonte de informação consultada foi a base de dados “Visão geral do pipeline de projetos de MDL” (PNUMA, 2010). É o resultado do projeto Desenvolvimento de Capacidade para o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (do inglês *Capacity Development for the Clean Development Mechanism* ou CD4CDM). Este projeto foi lançado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA ou *United Nations Environment Programme* – UNEP) e seu banco de dados consolida muitas das informações disponíveis sobre MDL, além de ser atualizado com frequência. O endereço da internet deste projeto é <http://cd4cdm.org>. Definiu-se a atualização de Março de 2010 como sendo a utilizada por este trabalho, já que esta base de dados é sempre atualizada com muita frequência.

A seleção dos projetos obedeceu ao critério de ser representativa e não aleatória (projetos escolhidos para representar diferentes tamanhos e eficiências de redução de emissão) dentro do universo dos projetos brasileiros registrados que já haviam emitido créditos de carbono. Deste modo, os projetos escolhidos para serem alvos de estudos de caso no presente trabalho refletem a atual situação brasileira, havendo representantes com baixa, média e alta taxa de sucesso de emissão de créditos com relação à estimativa inicial realizada para cada um individualmente.

Para obtenção da opinião de especialistas foi submetido um questionário que será apresentado no Anexo I e seu resultado discutido no item 4.11. O mesmo era composto por perguntas genéricas e discursivas. O objetivo foi obter opiniões pessoais, qualitativas e não relacionadas à instituição ou empresa ligada a cada um dos entrevistados. Os profissionais entrevistados têm ou tiveram ligação com projetos de MDL em aterros sanitários e são profundos conhecedores do tema. As

qualificações de cada um seguem como nota de rodapé abaixo da respectiva opinião. Apenas Bogner não foi entrevistada por meio do questionário, já que o contato aconteceu em um momento bastante inicial da pesquisa. Entretanto, como a informação fornecida foi julgada como sendo bastante importante e dada a qualificação da profissional, escolheu-se incluir a informação.

2 DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS, METANO E O MERCADO DE EMISSÕES

2.1 Destinação final de resíduos sólidos no Brasil

Segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004), o termo Resíduos Sólidos pode ser definido como:

“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.”

Estes resíduos são classificados, pela mesma norma, em Classe I – Perigosos e Classe II – Não Perigosos. Este trabalho irá focar os aterros sanitários recebedores de resíduos Classe II, neste caso sendo basicamente Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), tanto Não Inertes (Classe IIA) quanto Inertes (Classe IIB). Entretanto, para geração de metano, apenas os resíduos Classe IIA influenciam, já que é o tipo de resíduo que sofrerá degradação biológica.

No Brasil, foram gerados em todo o ano de 2009 aproximadamente 57.011.136 toneladas de RSU, representando um aumento de quase 8% em relação a 2008 (ABRELPE, 2010). Se for levada em consideração a taxa de crescimento populacional de 1% no mesmo período, nota-se que houve um aumento real na quantidade de resíduos descartados.

Desta quantidade gerada no ano, aproximadamente 50.258.208 t foi coletada, indicando que quase 12% (ou 6.752.928 t) ainda não são coletadas anualmente. Do total coletado, aproximadamente 57% são destinados a aterros sanitários, enquanto aproximadamente 43% são levados a lixões ou aterros controlados (ABRELPE, 2010). As Tabelas 1 e 2 mostram mais detalhes sobre geração e coleta de RSU no Brasil.

Tabela 1 – Quantidade total gerada de RSU por região e Brasil, por dia.

Região	2008	2009		
	RSU Gerado (t/dia)/ Índice (Kg/hab/dia)	População Urbana (hab)	RSU Gerado (t/dia)	Índice (Kg/habitante/dia)
Norte	11.333 / 1,002	11.482.246	12.072	1,051
Nordeste	45.437 / 1,207	38.024.507	47.665	1,254
Centro-Oeste	12.355 / 1,047	11.976.679	13.907	1,161
Sudeste	83.180 / 1,087	74.325.454	89.460	1,204
Sul	17.353 / 0,766	22.848.997	19.624	0,859
BRASIL	169.658 / 1,080	158.657.883	182.728	1,152

Fonte: ABRELPE, 2010.

Tabela 2 – Quantidade de RSU coletado por região e Brasil, por dia.

Região	2008	2009		
	RSU Coletado (t/dia)/ Índice (Kg/hab/dia)	População Urbana (hab)	RSU Coletado (t/dia)	Índice (Kg/habitante/dia)
Norte	8.919 / 0,788	11.482.246	9.672	0,842
Nordeste	33.372 / 0,912	38.024.507	35.925	0,945
Centro-Oeste	11.164 / 0,946	11.976.679	12.398	1,035
Sudeste	80.041 / 1,087	74.325.454	85.282	1,147
Sul	15.703 / 0,693	22.848.997	17.807	0,779
BRASIL	149.199 / 0,950	158.657.883	161.084	1,015

Fonte: ABRELPE, 2010.

O valor encontrado pela ABRELPE (2010) para índice de resíduos coletados no país (1,015 kg/hab/dia) é similar ao reportado pelo IBGE (2010), que é 0,98 kg/hab/dia em média. Na Figura 1 pode ser visto mais informações sobre a disposição deste resíduo coletado.

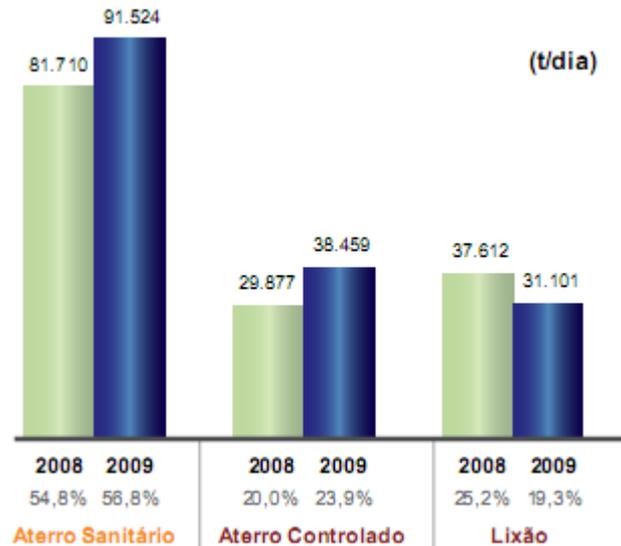


Figura 1 – Destinação final de RSU no Brasil, por dia.

Fonte: ABRELPE, 2010.

Se as informações de disposição de resíduo forem relativizadas por município, pode-se notar claramente a diferença no país dependendo da região. Na Tabela 3 fica evidenciado que as regiões Sudeste e Sul, as mais ricas do país, possuem uma disposição de resíduos mais adequada. Pode ser notado, também, que a maioria dos municípios pesquisados no país dispõe o resíduo em um local incorreto (ou seja, “aterros controlados” e lixões).

Tabela 3 – Quantidade de municípios por modalidades praticadas de destinação final de RSU.

Disposição Final	Regiões e Brasil					
	Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Sudeste	Sul	BRASIL
Aterro Sanitário	81	431	146	793	687	2.138
Aterro Controlado	105	497	146	630	361	1.739
Lixão	263	866	174	245	140	1.688
BRASIL	449	1.794	466	1.668	1.188	5.565

Fonte: ABRELPE, 2010.

Entretanto este quadro é ainda mais preocupante se utilizado como fonte de dados a pesquisa do IBGE (2010). O resultado desta pesquisa, que utiliza dados coletados em 2008, encontra-se na Tabela 4 e mostra que, apesar de haver melhorado nos últimos 20 anos, a situação da destinação final dos resíduos no Brasil ainda está longe da ideal.

Tabela 4 - Destino final dos resíduos sólidos no Brasil, de 1989 a 2008.

Ano	Destino final dos resíduos sólidos, por unidades de destino dos resíduos (%)		
	Vazadouro a céu aberto	Aterro controlado	Aterro sanitário
1989	88,2	9,6	1,1
2000	72,3	22,3	17,3
2008	50,8	22,5	27,7

Fonte: IBGE (2010)

Segundo o IBGE (2010), as regiões mais problemáticas no país são Norte e Nordeste, com 85,5% e 89,3% (respectivamente) do resíduo sendo destinados a lixões. As menos problemáticas (porém ainda longe do ideal) são as regiões Sul e Sudeste, com 15,8% e 18,7% do resíduo sendo disposto em lixões.

2.2 Emissão de metano por aterros sanitários

De acordo com EPA (2006b), no mundo o setor de resíduos como um todo é o responsável pela emissão de 15% dos gases de efeito estufa excetuando-se o gás carbônico e os gases destruidores da camada de ozônio, sendo o terceiro maior setor neste tipo de emissão. Perde somente para atividades agropastoris (emissões de metano e óxido nitroso oriundas principalmente de preparação do solo, fermentação entérica, cultivo de arroz, esterco e queimadas da vegetação natural), com 59%, e geração de energia (emissões de metano e óxido nitroso oriundas da queima incompleta dos combustíveis tanto fósseis quanto renováveis), com 22%.

Analisando as fontes individuais (sem dividir por setores), a emissão oriunda de aterros é a quarta maior fonte deste tipo de emissão, perdendo apenas para a preparação dos solos, fermentação entérica e queima de combustíveis fósseis (EPA, 2006b). A Figura 2 ilustra a quantidade de emissões por fontes no setor de resíduos, onde se notam os aterros com aproximadamente 800 MtCO₂e/ano.

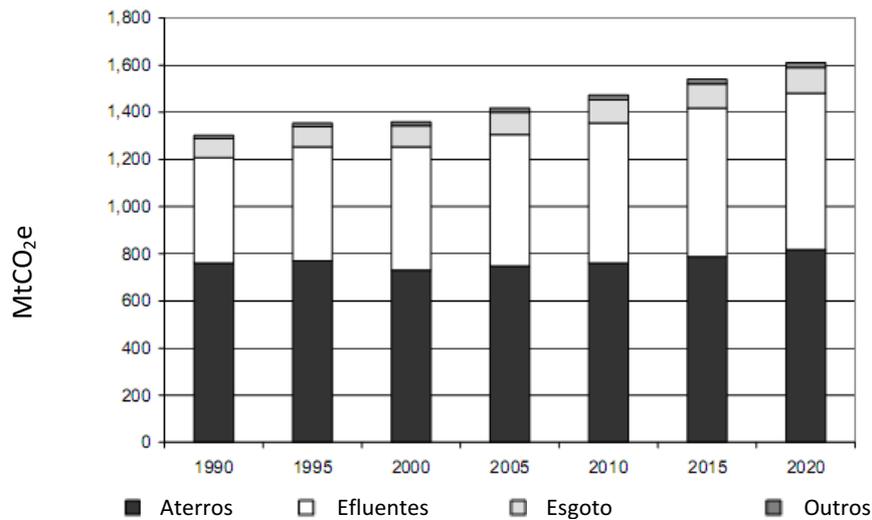


Figura 2 – Emissões totais do setor de Resíduos por fontes.
Fonte: EPA (2006b).

Estes números podem ser ainda maiores, de acordo com Themelis e Ulloa (2007), podendo chegar a quase 1.200 MtCO₂e/ano.

No Brasil, de acordo com o segundo inventário nacional de emissões (MCT, 2010), realizado utilizando dados até 2005, a quantidade de emissões nacionais oriundas de aterros sanitários pode ser vista na Figura 3.

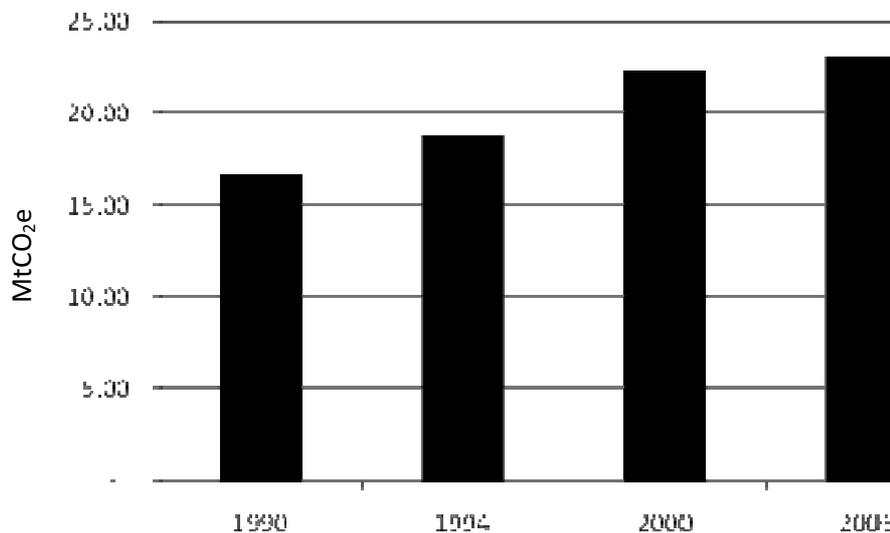


Figura 3 – Emissões oriundas de aterros sanitários no Brasil.
Fonte: MCT (2010).

Como pôde ser visto, as emissões de aterros no Brasil são pequenas em comparação às emissões globais de metano oriundas de aterros, representando aproximadamente 3%. Entretanto, as informações precisam ser relativizadas, já que

não utilizam a totalidade de resíduos no Brasil. Ao invés disto utiliza-se a quantidade de resíduos depositados, levando em consideração a forma de deposição. No cálculo, a disposição em lixões é considerada como “empilhamento” e não “aterramento” e a degradação biológica ocorrida em uma pilha de resíduo é diferente de uma degradação que acontece em algo aterrado. Na pilha, o modelo considera haver maior contato do resíduo com o ar (ou seja, uma maior relação superfície/volume), tornando o ambiente menos anaeróbico e conseqüentemente com um potencial menor de geração de metano. Além disso, os aterros que já possuem programa de captação e queima de resíduos foram excluídos da conta. Como muitas cidades dispõem os resíduos em lixões e vários dos maiores aterros possuem programas de destruição de metano, este valor na realidade encontra-se bastante subestimado. Mesmo com estas ressalvas, houve um aumento de quase 30% até 2005.

Apesar disto, o Brasil não possui legislação específica obrigando a queima de metano em aterros sanitários. Apenas em 2010 foi sancionada pelo Governo Federal a lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010 (Brasil, 2010a), que:

“Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências”.

Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), em seu artigo 15º, *“A União elaborará, sob a coordenação do Ministério do Meio Ambiente, o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, com vigência por prazo indeterminado e horizonte de 20 (vinte) anos, a ser atualizado a cada 4 (quatro) anos (...)”.*

Neste Plano Nacional de Resíduos Sólidos precisam estar incluídas algumas metas básicas. Entre elas, encontra-se:

“IV - metas para o aproveitamento energético dos gases gerados nas unidades de disposição final de resíduos sólidos”

Os artigos 16º e 17º da PNRS tratam da elaboração dos Planos Estaduais de Resíduos Sólidos, que também possuem objetivo de estabelecimento de metas para aproveitamento dos gases de aterro.

Quanto a prazos, o artigo 54º fala que existe um prazo de quatro anos a partir da data de publicação da lei para dispor adequadamente os resíduos; ou seja, em 2 de agosto de 2014 não deverá existir mais lixões no país. Além disto, o artigo 55º

estabelece que os Planos Estaduais e Municipais de Resíduos Sólidos devem estar em vigor dois anos após a publicação da lei (ou seja, em 2 de agosto de 2012).

Posteriormente foi publicado o decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010 (Brasil, 2010b), que

“Regulamenta a Lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências.”

Por meio deste decreto, ficam estabelecidas as bases para criação do Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Este plano deve – de acordo com o artigo 47º, item I – ter uma proposta preliminar pronta e divulgada, acompanhada dos estudos que a fundamentam, em até 180 dias a partir da publicação do decreto (ou seja, em 21 de Junho de 2011), para entrar em consulta pública por 60 dias.

Em suma, é possível que ainda em 2011 o Brasil passe a possuir regulações sobre captação de metano em aterros. A captura deste gás já vem sendo bastante explorada no mundo há algum tempo. De acordo com a EPA (2006a), em 2000 as emissões de metano oriundas de aterros sanitários de RSU superaram as 730 milhões de toneladas de CO₂ (MtCO₂e).

2.3 Custos com limpeza pública

É estimado que custos com limpeza urbana possam chegar a 15% do orçamento dos municípios (PWC, 2010). A

Figura 4 exhibe o gasto com limpeza pública em algumas cidades no Brasil e no Mundo (eixo esquerdo) e também a quantidade de resíduos gerado por habitante (eixo direito), ambos por ano.

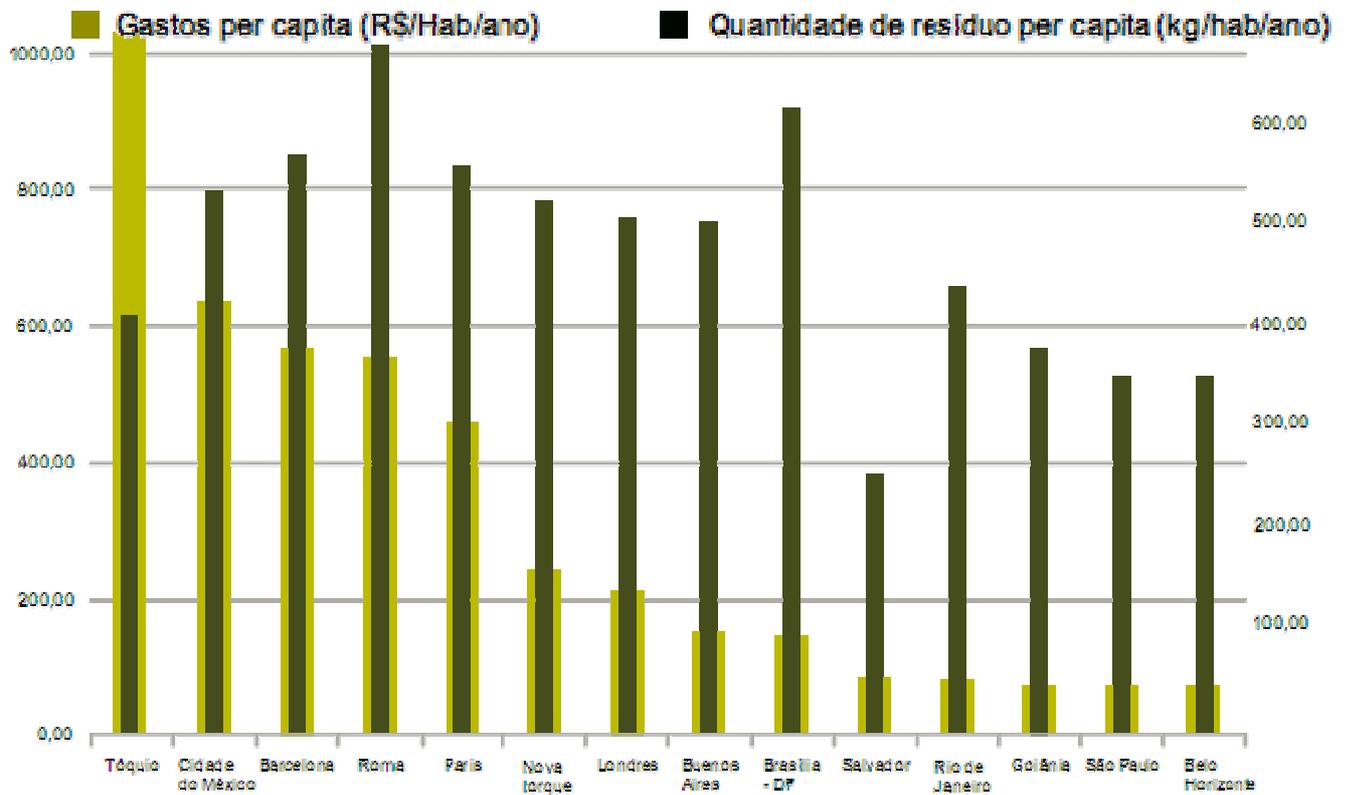


Figura 4 – Gastos com serviços de limpeza urbana e geração de resíduos per capita.
 Fonte: Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS (2008) *apud* PWC, 2010.

Entretanto, para uma idéia mais relativizada do real gasto com limpeza urbana feito por estas cidades, a Figura 5 mostra os gastos com limpeza pública relativizados pela quantidade de resíduo produzido.

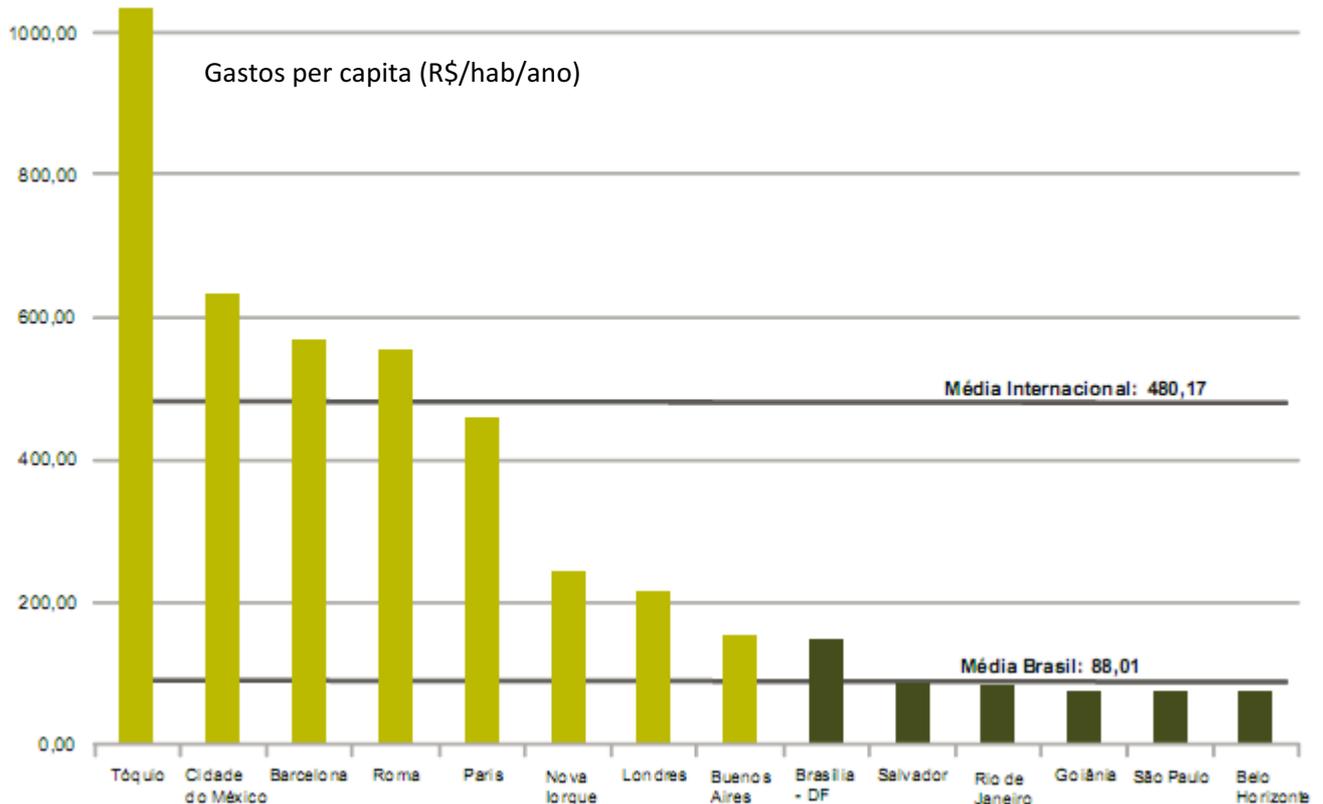


Figura 5 – Comparação de gastos per capita dos serviços de limpeza urbana nas cidades com a quantidade de resíduo per capita.

Fonte: PWC, 2010.

Nota-se claramente que as cidades brasileiras ainda precisam aumentar seus gastos com limpeza pública se houver o objetivo de alcançar patamares internacionais de gerenciamento de RSU. Com o desenvolvimento da economia, a tendência é o aumento de produção de resíduos per capita e, conseqüentemente, haverá aumento ainda maior de gastos. Existem algumas formas de também obter receita oriunda dos resíduos, e uma delas é através da utilização do biogás, embora gerando custos adicionais. De acordo com ICLEI (2009), as opções atualmente viáveis no Brasil para minimização de custos através da utilização do biogás são:

- ⌘ Geração de energia elétrica, para uso no próprio aterro, em indústrias próximas ou consumidores distantes. Neste último caso, por meio da venda e distribuição dessa energia via rede já existente;

- ✘ Geração de energia térmica (calor), útil em processos como secagem de lixiviado e usos industriais diversos;
- ✘ Uso como combustíveis veiculares, para abastecimento da frota de caminhões de coleta de lixo e veículos públicos; e
- ✘ Uso na iluminação pública, por meio do uso de postes abastecidos diretamente com o biogás.

Para coleta e queima do metano, é preciso instalar vários equipamentos. O modelo de custos utilizado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) estima a utilização de um dreno de captação de biogás para cada 4.000 m². O custo de instalação recomendado total do sistema de captura é de US\$ 19.000,00 fixos acrescidos de US\$ 8.756,00 por dreno. Soma-se a isto o custo anual de manutenção e mão de obra, estimado em 10% do custo de instalação. Como benefícios citados estão a redução de emissão de metano, a redução de compostos orgânicos voláteis e a redução de odores (EPA, 2006)

Já para a instalação de sistemas de utilização deste biogás associados ao sistema de captura, é necessária a instalação de mais equipamentos e os custos vão depender do modo de utilização escolhido. Basicamente, excluindo-se as especificidades, é preciso instalar filtro, compressor e desidratador ao custo de US\$ 180.000,00 (para uma produção de gás de 28.000 m³/dia de biogás). Ainda, se o plano envolver aumento do comprimento de tubulações de gás (para levar a um consumidor, por exemplo), estima-se gasto adicional de US\$ 264.000,00 por cada 1,6 km (EPA, 2006).

Como no Brasil os gastos com limpeza pública ainda são insuficientes, seria ingenuidade pensar que os municípios estariam dispostos a arcar com o acréscimo de gasto oriundo do aproveitamento do biogás. Mesmo em um modelo de terceirização dos serviços de disposição de resíduos, a empresa ganhadora da licitação dificilmente absorveria estes gastos adicionais sem uma compensação financeira. Seja qual for o tipo de minimização dos custos escolhido, uma forma de viabilizar os gastos com instalação dos equipamentos é necessária. O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), um método de flexibilização previsto no Protocolo de Quioto, é uma das formas de se alcançar a viabilidade deste tipo de projeto. Entretanto, os custos inerentes a este tipo de projeto são altos devido a sua grande

burocracia, o que torna necessário uma quantidade mínima de resíduos gerando metano para tornar o projeto de MDL viável.

2.4 O mercado voluntário de emissões e o MDL

Os certificados de redução de emissão eventualmente gerados por um aterro sanitário podem ser negociados para gerar receita adicional. Existem alguns mercados para serem realizadas negociações com papéis oriundos do Brasil. No mercado voluntário, até o final de 2010 a mais importante bolsa era a *Chicago Climate Exchange* (CCX), dona de praticamente metade do total de negociações voluntárias em 2009 (41,4 MtCO₂e), sendo a outra metade negociada através do Mercado de Balcão (Hamilton et al., 2010). Como a CCX teve suas atividades encerradas no fim de 2010 devido a uma longa inatividade, o mercado voluntário atualmente enfrenta um momento de bastante instabilidade, com basicamente negociações sendo feitas através de balcão.

Outra possibilidade é o mercado regido pelo Protocolo de Quioto, que possui regras mais rígidas, mas também uma maior liquidez em seus papéis. Os créditos de carbono podem ser negociados em vários países, sendo o *European Union Emissions Trading Scheme* (EU ETS), a bolsa europeia para negociação de certificados de emissões, a mais importante bolsa no mundo. Neste último, projetos brasileiros podem participar através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL).

Para ser negociado, todo certificado de redução de emissão precisa obedecer a algumas regras, exatamente para ser comparável a outro certificado do mesmo tipo. No mercado voluntário, os principais padrões utilizados são o VCS, responsável por 35% dos certificados voluntários em 2010, e o CAR, que possuiu em 2010 a uma fatia de 31% (Hamilton et al., 2010). Já para o Protocolo de Quioto, precisam ser obedecidas as rígidas normas do MDL.

O MDL é concebido no artigo 12 do Protocolo de Quioto e é hoje a principal forma de obtenção de receitas através de redução de emissões. Ele concede às Partes Anexo I (os países desenvolvidos, que possuem metas de redução de emissão de GEE) o direito de utilizar as Reduções Certificadas de Emissões (RCEs), resultantes de projetos realizados em Partes não-Anexo I (países em

desenvolvimento, que não possuem metas). Entretanto, as RCEs só podem ser utilizadas para contribuir com o cumprimento de uma pequena parte de seus compromissos quantificados de limitação e redução de emissões. O objetivo do MDL deve ser assistir às Partes não-Anexo I a atingir o desenvolvimento sustentável e contribuir para o objetivo final da Convenção, e ao mesmo tempo assistir às Partes Anexo I a atingir seus compromissos quantificados de limitação e redução de emissões (ONU, 1998). Assim, é permitido a qualquer país Anexo I adquirir créditos de carbono oriundos de projetos que visem reduzir emissões de GEE em qualquer país não-Anexo I.

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo é um mecanismo de flexibilização do Protocolo de Quioto e também o único modo de países em desenvolvimento estarem envolvidos neste protocolo. Ele foi criado como uma forma de fomentar investimentos oriundos de países desenvolvidos em países em desenvolvimento. Como, segundo as normas do Protocolo, são concedidos créditos de carbono apenas a medidas que reduzam voluntariamente as emissões de GEE, estes investimentos estarão também auxiliando no desenvolvimento sustentável e mais limpo destes países. Ao contrário do que é dito nos meios de comunicação, a idéia do MDL não surgiu de uma proposta brasileira para o Protocolo, já que tal proposta propunha apenas a criação de um “Fundo não-Anexo I de Desenvolvimento Limpo”, através do qual os países desenvolvidos financiariam projetos em países em desenvolvimento (MCT, 1997), não tendo nenhuma referência, portanto, a um mecanismo de comércio de emissões e/ou a uma flexibilização das metas.

De acordo com Jung (2006), a maioria dos países mais atrativos para o MDL se encontra na América Latina e Ásia e, uma vez que consigam formar suas estruturas institucionais para o MDL, os grandes países tendem a dominar o mercado. Isto já está sendo visto, com China e Índia sendo os grandes líderes neste tipo de projeto.

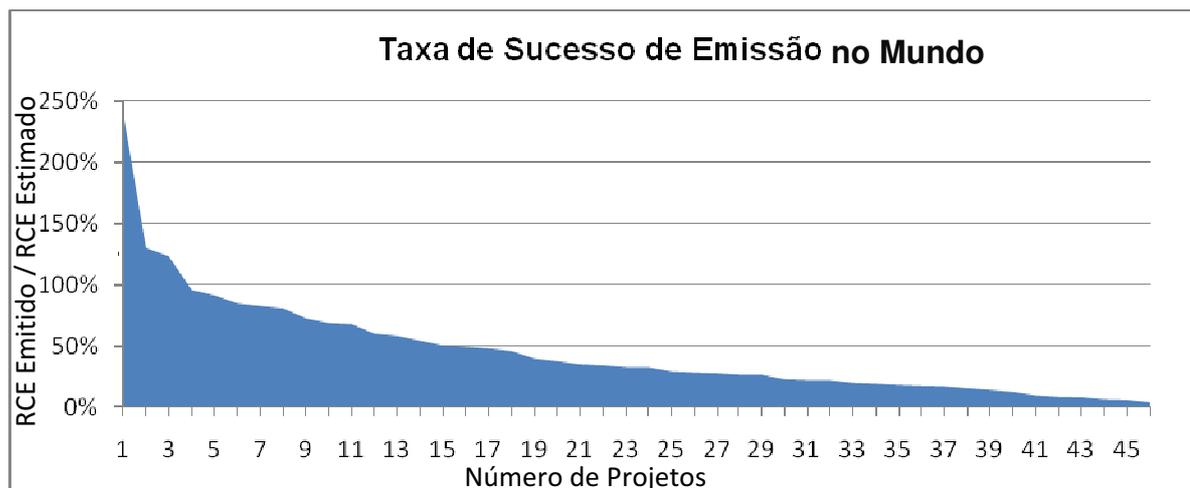
Analisando-se a base de dados do PNUMA sobre projetos de MDL pode-se notar que havia 154 projetos registrados envolvendo aterros até 01 de Março de 2010, como mostrado na Tabela 5. Os dois primeiros grupos de projetos (Queima de gás e Geração elétrica) são os tipos que possuem créditos emitidos dentro do Protocolo de Quioto. Portanto, ficam limitados a 137 os projetos a serem analisados, sendo que destes apenas 46 emitiram Créditos de Carbono.

Tabela 5 – Quantidade de projetos de MDL registrados por tipos

Tipo de projeto	Registrados	Emitidos	Aproveitamento
Todos os projetos de aterro	154	46	29,87%
Projetos de queima de gás	67	27	40,30%
Projetos de geração elétrica	70	19	27,14%
Projetos de compostagem de resíduos de aterro	12	0	0,00%
Projetos de combustão de resíduos de aterro	5	0	0,00%
Projetos de Queima + Projetos de Geração	137	46	33,58%

Fonte: Modificado da base de dados PNUMA até 01 de Março de 2010.

Dos projetos que emitiram créditos de carbono, como podemos notar na Figura 6 refletindo os RCEs emitidos em relação aos RCEs estimados, a grande maioria deles obteve uma taxa de sucesso inferior ao inicialmente estimado. Pode ser notado que apenas 4 projetos obtiveram uma eficiência de 100% ou mais na primeira emissão de créditos e apenas 15 com eficiência superior a 50%.

**Figura 6** – Taxa de sucesso da primeira emissão dos projetos de MDL registrados que já emitiram créditos.

Fonte: Modificado da base de dados PNUMA até 01 de Março de 2010.

Os projetos de MDL de aterros encontraram inúmeras dificuldades no decorrer do tempo. O reflexo deste fato pode ser demonstrado na Figura 7, onde nota-se que até 2006 uma boa proporção dos projetos que iniciava a validação eram registrados (as linhas caminham juntas). A partir de 2006 há um desajuste desta proporção, com menos projetos entrando em validação e sendo registrados. Isto pode ser reflexo de uma maior dificuldade de implantação de projetos com esta tecnologia. O número de projetos que iniciaram a validação em 2009 não é mostrado devido a não haver tempo suficiente para registro até o início de 2010.

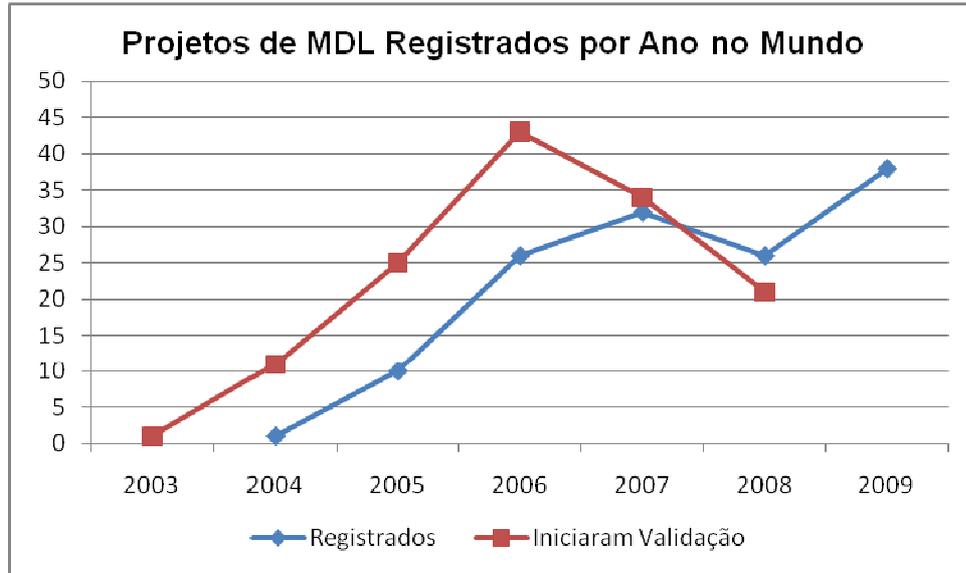


Figura 7 – Projetos registrados no Conselho Executivo do MDL divididos por ano de registro e entrada em validação.

Fonte: Modificado da base de dados PNUMA até 01 de Março de 2010.

2.5 Situação brasileira no MDL em projetos de aterros.

Existem 25 projetos registrados no MDL em solo brasileiro e destes apenas 16 possuem créditos emitidos (PNUMA, 2010). Na Tabela 6 pode ser vista a relação destes projetos, bem como informações básicas sobre os mesmos. Encontram-se ordenados por taxa de sucesso de emissão de créditos (na primeira emissão). Dos 16 projetos listados abaixo, 6 compreendem geração de eletricidade através da queima do biogás e 10 não mencionam utilização do biogás para este fim.

Tabela 6 – Projetos de MDL de queima de gás de aterro sanitário desenvolvidos no Brasil e que possuem créditos emitidos.

Ref.	Título Original do Projeto	Estado	Geração de energia?	Nome do Aterro	Registro no MDL
1	ESTRE's Paulínia Landfill Gas Project (EPLGP)	SP	Não	CGR Paulínia	03/03/2006
2	Estre Pedreira Landfill Gás Project (EPLGP)	SP	Não	CDR Pedreira	12/02/2008
3	Terrestre Ambiental Landfill Gás Project	SP	Não	CGR Piaçaguera	06/05/2008
4	ESTRE Itapevi Landfill Gas Project (EILGP)	SP	Sim	CGR Itapevi	17/08/2007
5	Onyx landfill gas recovery project - Trémembé, Brazil (NM21)	SP	Não	Aterro Onyx SASA	24/11/2005
6	São João Landfill Gas to Energy Project	SP	Sim	Aterro Sanitário Sítio São João	02/07/2006
7	Bandeirantes Landfill Gas to Energy Project (BLFGE).	SP	Sim	Aterro Bandeirantes	20/02/2006
8	CTRVV Landfill emission reduction project	ES	Não	CTR Vila Velha	28/05/2008
9	Landfill gas to energy project at Lara landfill, Mauá	SP	Sim	Aterro Lara	15/05/2006
10	Caieiras landfill gas emission reduction	SP	Não	CTR Caieiras	09/03/2006
11	Anaconda Landfill Gas Project	SP	Não	Aterro Sanitário Anaconda	15/12/2006
12	Aurá Landfill Gas Project	PA	Não	Aterro Sanitário do Aurá	30/04/2007
13	Brazil NovaGerar landfill gas to energy project (NM5)	RJ	Sim	CTR Nova Iguaçu	18/11/2004
14	Salvador Da Bahia landfill gas management project (NM4)	BA	Não	Aterro Metropolitano Centro de Salvador	15/08/2005
15	Canabrava Landfill Gas Project	BA	Não	Aterro Canabrava	08/04/2007
16	Brazil MARCA landfill gas to energy project	ES	Sim	Aterro MARCA	23/01/2006

Fonte: Modificado da base de dados PNUMA até 01 de Março de 2010. Os nomes dos aterros foram retirados diretamente do DCP registrado em <http://cdm.unfccc.int>.

A taxa de sucesso da primeira emissão destes projetos, refletindo os RCEs emitidos em relação aos RCEs estimados, pode ser vista na Figura 8 (cuja numeração do eixo horizontal segue a mesma encontrada na Tabela 6), notando-se que a tendência mundial destes tipos de projeto é confirmada. Apenas 3 projetos alcançaram 80% do esperado na primeira emissão de créditos.

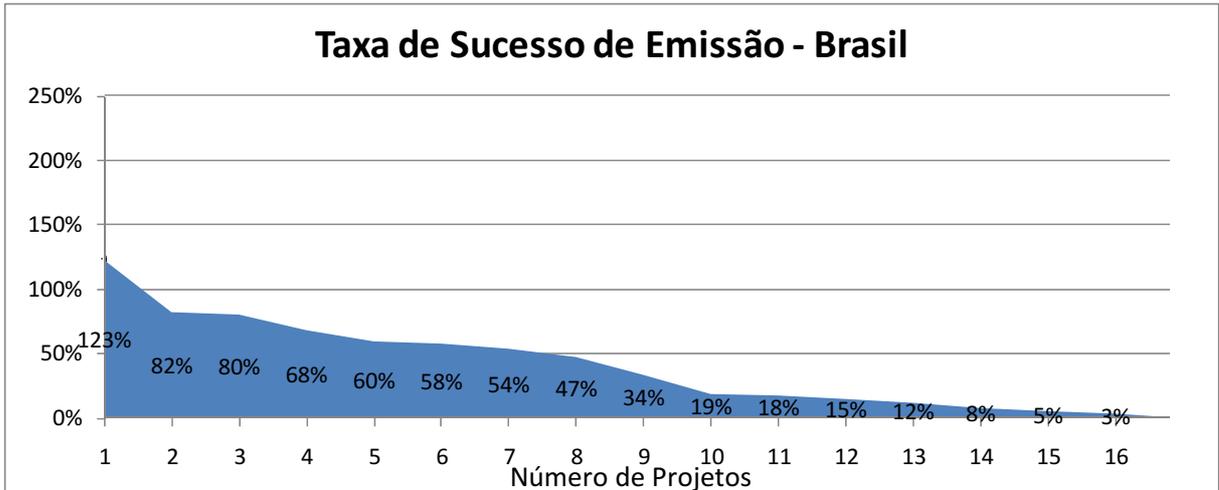


Figura 8 – Taxa de sucesso da primeira emissão dos projetos de MDL registrados no Brasil que já emitiram créditos.

Fonte: Modificado da base de dados PNUMA até 01 de Março de 2010.

3 ESTIMATIVAS DE EMISSÃO DE METANO POR ATERROS

De acordo com Ballik (2008), existem quatro razões principais para estimativas de geração de metano em aterro não condizerem com a realidade. Apesar de ser um estudo feito enfocando projetos de MDL, as razões citadas e alguns dos motivos podem ser extrapolados para os demais aterros. São eles:

a) As constantes mudanças nas regras do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

Desde o registro do primeiro projeto de MDL (em 2004), as regras para os projetos que envolvem metano (e principalmente projetos de aterros) vem mudando dramaticamente. Esta mudança foi mais acentuada a partir do final de 2005, quando consolidaram as metodologias referentes a aterros em apenas uma (chamada ACM0001, para mais detalhes ver item 3.1), e três novas versões desta metodologia foram lançadas em um espaço de apenas seis meses. Cada vez que uma nova versão de metodologia é lançada, a anterior perde a validade e os projetos que a estão utilizando precisam ser atualizados, com consequentes atrasos. Tudo isso acarretou, inevitavelmente, uma maior rigidez e rigorosidade ao monitoramento não só dos novos projetos, mas também dos projetos existentes. Isto quer dizer que um sistema de monitoramento que poderia estar perfeitamente dentro das regras poderia não estar mais em um espaço muito curto de tempo.

b) Superestimação na época de negociação de contratos

Os cálculos de estimativa realizados na fase inicial do projeto, onde estão se negociando os principais contratos, podem não estar utilizando os valores mais conservadores. Isto ocorre porque o projeto precisa ser o mais atraente possível financeiramente, já que normalmente depende de financiamentos para ocorrer. Em uma fase mais posterior, quando se tem uma noção maior do empreendimento, números mais reais podem ser utilizados. Como resultado obtém-se normalmente uma redução dos números estimados.

c) Práticas de gerenciamento e disposição de resíduos divergentes.

Os sistemas de captura e destruição de gás de aterro são normalmente criados para assegurarem alta performance em aterros que operam de acordo com as melhores práticas. Devido a diversos fatores, modificações podem ser necessárias nestes sistemas para adaptá-los à realidade do aterro. Isto pode levar a atrasos na implantação do sistema e/ou a operação do equipamento em condições sub-ótimas. Ambos refletem negativamente na captura real de metano, tornando os cálculos iniciais superestimados.

d) Aplicação não apropriada de modelos de geração/emissão de gases de aterro.

A abordagem utilizada pelos modelos, através de dados obtidos em laboratório e utilizando condições diferentes das do aterro em questão, pode ser uma grande fonte de incerteza associada às estimativas de emissões. Além disso, os poucos estudos realizados *in loco* foram executados em aterros sanitários de países desenvolvidos operando em condições ótimas. Ou seja, quando são usados para estimar a geração de metano em aterros de países em desenvolvimento tanto dados de laboratório quanto dados obtidos em aterros operando excepcionalmente bem, o resultado pode não chegar próximo à realidade.

Isto ocorre porque, em países em desenvolvimento, a operação dos aterros não possui o mesmo grau de eficiência; a composição do resíduo é bastante diferente entre países; as condições reais e laboratoriais podem não ser as mesmas; e as condições ambientais também diferem, já que os países desenvolvidos apresentam normalmente climas temperados enquanto países em desenvolvimento possuem clima mais próximo do tropical, o que aumenta a precipitação nos aterros. McDougall (2009) comenta que o problema para os modelos de previsão comportamental para aterros esbarram na heterogeneidade de cada local, já que resultados de experimentos controlados em bancada não podem ser integralmente extrapolados para aterros.

Kwon et al. (2009) afirma que o desenvolvimento de coeficientes mais apropriados para o modelo do IPCC é urgente para reduzir os riscos da geração de RCEs em aterros sanitários.

3.1 Histórico das metodologias utilizadas pelo MDL

Até hoje, a metodologia mais utilizada por projetos de MDL envolvendo recuperação de gás de aterro sanitário (GAS) é a ACM0001. Esta metodologia, apresentada adiante, consolida (e substitui, não podendo mais ser utilizada) quatro outras metodologias anteriormente válidas. Segue uma breve explicação de cada uma delas e suas características básicas.

- a) AM0002 - (*“Greenhouse gas emission reductions through landfill gas capture and flaring where the baseline is established by a public concession contract”* ou Redução de emissão de gás estufa através de captura e queima de gás de aterro sanitário onde a linha de base é estabelecida através de um contrato de concessão pública)

Esta metodologia se originou da proposta de nova metodologia NM0004, realizada pela ICF Consulting para o Aterro de Salvador. Apenas um projeto conseguiu registro utilizando esta metodologia, exatamente o projeto envolvendo o aterro de Salvador. O fato de somente o projeto para o qual a metodologia foi feita foi registrado utilizando-a indica que era demasiadamente específica. Desde a primeira versão da AM0002, ela foi atualizada duas vezes, praticamente uma vez por ano, até seu cancelamento. As versões e suas épocas de validade, com o número de páginas de cada uma entre parênteses, foram:

- ✘ Versão 1 (10) – 23 de Setembro de 2003 a 28 de Novembro de 2005
- ✘ Versão 2 (13) – 29 de Novembro de 2005 a 21 de Dezembro de 2006
- ✘ Versão 3 (13) – 22 de Dezembro de 2006 a 01 de Novembro de 2007

A metodologia visa a implementação de projetos de aterro sanitário que possuam especificados nos contratos de concessão a quantidade de metano a ser queimada, sem produção de eletricidade. A linha de base, ou seja, o que seria feito no aterro se não houvesse o projeto de MDL, seria a queima do metano em uma quantidade previamente estabelecida no contrato. A redução de emissão se dá ao haver queima efetiva de metano em uma quantidade de superior à contratada. A

quantidade de créditos de carbono é o valor excedente de metano queimado, ou seja, metano que seria queimado em contrato subtraído do metano efetivamente queimado resultando na quantidade de créditos de carbono.

A metodologia é simples em sua primeira versão, requeria o monitoramento apenas da quantidade de resíduo recebida pelo aterro, da quantidade de gás queimado, da percentagem de metano no gás e do número de horas que o queimador operou. Para a segunda versão, foram incluídos o monitoramento da eficiência do queimador e temperatura e pressão do gás. Já para a terceira versão, foi inserida a necessidade de se monitorar a emissão de projeto ocasionada pela queima do metano, utilizando-se a ferramenta.

Apenas o projeto para o qual a metodologia foi elaborada foi registrado utilizando-a, indicando que era demasiadamente específica.

- b) AM0003 - (*"Simplified financial analysis for landfill gas capture projects"* ou Análise financeira simplificada para projetos de captura de gás de aterro sanitário)

Esta metodologia foi originada da proposta de nova metodologia NM0005, feita pela EcoSecurities Ltd. para o projeto do aterro de Nova Iguaçu. Cinco projetos foram registrados utilizando esta metodologia como base (NovaGerar, MARCA, Paulínia, Lara e um aterro na Bolívia). Tal número de projetos registrados indica que era mais abrangente que a metodologia anterior (AM0002). Mas, ainda assim, é pouco para justificar a sua existência. Desde sua aprovação, possuiu quatro atualizações até seu cancelamento. As versões e suas épocas de validade, com o número de páginas de cada uma entre parênteses, foram:

- ✧ Versão 1 (11) – 12 de Janeiro de 2004 a 07 de Julho de 2005
- ✧ Versão 2 (10) – 08 de Julho de 2005 a 12 de Outubro de 2005
- ✧ Versão 3 (11) – 30 de Setembro de 2005 a 21 de Dezembro de 2006
- ✧ Versão 4 (12) – 22 de Dezembro de 2006 a 01 de Novembro de 2007

Com esta metodologia foi registrado o primeiro projeto de MDL de aterro no mundo (aterro de Nova Iguaçu). Bastante parecida com a AM0002, já que a redução de emissão é calculada através da queima total do gás excluindo-se a quantidade de

metano que obrigatoriamente seria queimada na ausência desta iniciativa. Entretanto, ao contrário da AM0002, esta metodologia permite a produção de eletricidade com o gás.

A metodologia, em sua primeira versão, estabelece 20% como padrão de gás que já seria queimado se não houvesse o projeto e, além disso, requer o monitoramento da quantidade de gás a ser queimado, quantidade de eletricidade gerada, taxa de calor do gerador, eficiência do queimador e fração de metano no gás de aterro. Para a versão 2 foi incluído o valor de densidade do metano. Na versão 3, passou a ser obrigatório o monitoramento de temperatura e pressão do gás. Já para a quarta versão foi inserida a necessidade de se monitorar a emissão de projeto ocasionada pela queima do metano, utilizando-se a ferramenta metodológica específica para este fim.

- c) AM0010 - (*“Landfill gas capture and electricity generation projects where landfill gas capture is not mandated by law”* ou Projetos de captura de gás de aterro sanitário e geração de eletricidade onde a captura do gás de aterro sanitário não é exigida por lei)

Esta metodologia teve origem na proposta de nova metodologia NM0010, elaborada pelo Banco Mundial para um aterro na África do Sul. Dois projetos foram registrados utilizando-a como base, ambos situados na mesma cidade da África do Sul. Este é mais um exemplo de metodologias com aplicação restrita, já que apenas os projetos para os quais a metodologia foi desenvolvida foram registrados utilizando a mesma. Possui apenas uma versão, que segue abaixo juntamente com sua data de validade e o número de páginas entre parênteses.

- ✧ Versão 1 (09) – 13 de Julho de 2004 a 01 de Novembro de 2007

Esta metodologia é essencialmente similar à AM0003 e envolve também a destruição de metano e geração de eletricidade. A diferença é que, ao invés de se excluir do gás total queimado a quantidade que teria sido queimada na ausência do projeto (por força de lei ou outro motivo), esta divisão é feita através dos próprios “poços” de captura de gás. Ou seja, são estabelecidos quantos pontos de captura de

gás são necessárias para alcançar o valor contratual ou legal, e o metano queimado nos poços adicionais constituem redução de emissão.

Os requerimentos de monitoramento são similares à AM0003, sendo necessário determinar os seguintes parâmetros: quantidade de gás coletado (individualizado para poços de linha de base e poços de projeto), fração de metano no gás, eficiência de combustão, quantidade de eletricidade gerada e quantidade de eletricidade vendida.

- d) AM0011 - (*“Landfill gas recovery with electricity generation and no capture or destruction of methane in the baseline scenario”* ou Recuperação de gás de aterro com geração de eletricidade com cenário de linha de base não contendo captura ou destruição de metano)

Esta metodologia possui origem na proposta de nova metodologia NM0021, feita pela Onyx para o aterro de Tremembé. Seis projetos foram registrados utilizando esta metodologia como base, mas no Brasil foi registrado apenas o projeto do aterro de Tremembé (os demais são três na Argentina, um na África do Sul e um na Costa Rica). Este número de projetos registrados torna esta metodologia a mais bem sucedida do grupo das metodologias substituídas pela ACM0001, sendo mais aproveitada por outros projetos. Desde sua primeira versão foi atualizada duas vezes, em um padrão muito parecido com a AM0002. As versões e suas épocas de validade, com o número de páginas de cada uma entre parênteses, foram:

- ✧ Versão 1 (10) – 13 de Julho de 2004 a 12 de Outubro de 2005
- ✧ Versão 2 (10) – 30 de Setembro de 2005 a 21 de Dezembro de 2006
- ✧ Versão 3 (10) – 22 de Dezembro de 2006 a 01 de Novembro de 2007

As principais diferenças desta metodologia para as demais de aterro são a previsão da utilização do gás para evaporação do lixiviado e o requerimento de não haver exigência legal ou contratual para queima do gás. Compreende também a destruição do gás e a geração de eletricidade. Entretanto, não é permitido solicitar créditos pela substituição da eletricidade da rede pela eletricidade gerada pelo gás.

Desde sua primeira versão, esta metodologia requer o monitoramento de vários parâmetros. São eles: quantidade de gás coletado, fração de metano no gás,

quantidade de gás utilizado para evaporação do lixiviado, quantidade de gás utilizado para geração de eletricidade, quantidade de gás destruído, quantidade de eletricidade gerada, eficiência da combustão, temperatura e pressão do gás, temperatura e horas de operação do queimador. A segunda versão possui apenas uma alteração editorial. A versão 3 traz, como nas demais metodologias, o cálculo e monitoramento de emissão de projetos oriundos da queima do metano através da ferramenta especificamente criada para este cálculo.

- e) ACM0001 - (atualmente “*Consolidated baseline and monitoring methodology for landfill gas project activities*” ou Metodologia consolidada de linha de base e monitoramento para atividades de projeto de gás de aterro sanitário)

Esta metodologia teve origem no momento que foi estabelecida a consolidação de todas as metodologias citadas anteriormente. Ou seja, como existia neste momento quatro metodologias tratando da mesma tecnologia e essencialmente similares, assumiu-se que a melhor solução seria a unificação das mesmas em apenas uma, utilizando os pontos positivos de cada. Objetivou-se, assim, fazer com que algumas metodologias ainda não muito bem sucedidas dessem origem a apenas uma, mas que fosse mais abrangente e que pudesse ser utilizada por um maior número de projetos. O objetivo foi alcançado já que, até 01 de Março de 2010, 110 projetos haviam sido registrados utilizando-a (PNUMA, 2010). Sem dúvida, devido a tal quantidade de projetos registrados, pode ser considerada a mais bem sucedida.

A Tabela 7 ilustra as informações básicas sobre esta metodologia, tais como validades, versões, número de páginas e ferramentas utilizadas por cada uma das versões.

Tabela 7 – Informações básicas sobre todas as versões da metodologia ACM0001.

Versão	Número de Páginas	Início da Validade	Fim da Validade	Tempo de Validade (Dias)	Tempo de Validade (Meses)
1	11	02/07/2004	11/10/2005	466	15,5
2	11	29/09/2005	17/05/2006	230	7,7
3	12	18/05/2006	26/07/2006	69	2,3
4	14	27/07/2006	20/12/2006	146	4,9
5	13	21/12/2006	05/07/2007	196	6,5
6	20	06/07/2007	01/11/2007	118	3,9
7	21	02/11/2007	13/12/2007	41	1,4
8	23	14/12/2007	15/08/2008	245	8,2
9	25	16/08/2008	26/02/2009	194	6,5
10	25	27/02/2009	10/07/2009	133	4,4
11	25	11/07/2009	Em vigor	-	-

Fonte: <http://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/203B03KT6N8QCC0R1C56DFOF9OYO2T/view.html>

Esta foi a primeira consolidação de metodologias no MDL, onde várias metodologias que possuem o mesmo objetivo e/ou tratam da mesma tecnologia são unidas, formando uma metodologia consolidada. A consolidação de metodologias é uma atividade do Painel de Metodologias do MDL que, apesar de buscar simplificar e otimizar a aplicação das metodologias, faz com que em alguns casos a metodologia consolidada contradiga a própria metodologia utilizada para realizar a consolidação.

O monitoramento de informações utilizadas para cálculo de redução de emissões obtidas de projetos que utilizem esta metodologia é bastante complexo atualmente. Entretanto, as primeiras versões da ACM0001 utilizavam poucos parâmetros, bem similares à AM0011, com a adição do requerimento de monitorar a legislação aplicável à queima de gás de aterro na localidade do projeto. Posteriormente vários parâmetros foram adicionados à lista de itens monitorados através do aumento de complexidade da metodologia e também da adição de mais componentes (como obtenção de créditos através de produção de eletricidade utilizando o gás do aterro – o que não era possível nas primeiras versões).

A partir da versão 7 (com início da validade em 02/11/2007) teve início a utilização da “Ferramenta para determinar emissões evitadas de metano oriundas da disposição de resíduos em um local de disposição de resíduos sólidos” (EB, 2008). Ferramentas são um acessório utilizado por metodologias dentro do MDL quando um cálculo pode ser aplicado da mesma forma para diferentes metodologias. Esta

ferramenta em questão foca no cálculo da emissão de metano de linha de base para resíduos dispostos em aterro. Ela pode tanto ser utilizada por metodologias de aterro quanto para metodologias que envolvam queima de resíduos de biomassa para produção de energia, por exemplo, já que o resíduo de biomassa emitiria metano caso não existisse o projeto e o resíduo fosse disposto em aterro.

3.2 Modelo utilizado para estimativa de emissão de metano

O método de cálculo mais utilizado atualmente para estimar a geração de metano por um aterro sanitário é o Método de Decaimento de Primeira Ordem (*First Order Decay Model* – FOD). A principal referência para a forma atual de estimativa de geração de metano em aterros é o cálculo utilizado pelo Guia para Inventários Nacionais de Gases Estufa (IPCC, 1996), que é a versão revisada do primeiro guia, apresentado em 1995.

De acordo com o IPCC (1996), vários métodos foram utilizados para estimar emissões em aterros, mas existem muitas variações entre os mesmos e poucos podem ser aplicados para regiões ou países inteiros. O guia descreve duas formas de estimar a produção de metano: a Metodologia de Produção Resultante Teórica de Gás (*Theoretical Gas Yield Methodology*), modificada, e a Metodologia de Cinética de Primeira Ordem (*First Order Kinetics Methodology*).

A primeira metodologia de cálculo de redução de emissão de gases estufa aprovada pelo Conselho Executivo do MDL foi a AM0002. Esta metodologia utiliza, para estimativa de emissão de metano, o modelo FOD como sugerido pelo IPCC (1996). A equação utilizada na primeira versão da AM0002 (válida a partir de Setembro de 2003), baseada inteiramente na equação proposta pelo IPCC (1996), segue abaixo:

$$CH4_{projected,y} = k * L_0 * \sum_{t=0,y} WASTE_{contract,t} * e^{-k(t-y)}$$

Onde:

$CH4_{projected,y}$ (tCH ₄)	Quantidade de metano projetada para ser gerada no período
L_0	Taxa de geração de metano (depende da fração orgânica do resíduo, é fixado durante a validação. Valor utilizado pelo primeiro projeto 180 Nm ³ /h)
k	Taxa de decomposição (depende da temperatura e umidade do resíduo, é fixado durante a validação. Valor utilizado pelo primeiro projeto 0,12 – significando meia vida de 6 anos)
$WASTE_{contract,t}$	Quantidade de resíduo disposta no ano atual
t	Ano atual
y	Ano de deposição do resíduo

A motivação da equação acima é claramente objetivando um cálculo simplista e flexível de geração de metano, deixando para a auditoria de validação os principais parâmetros. Um erro na equação foi corrigido na versão seguinte do relatório, publicada em 2006 (IPCC, 2006). Nesta nova versão, uma clara preferência pelo modelo FOD pode ser notada.

As razões dadas pelo modo de estimar as emissões de metano adotado pelo IPCC (2006) foram as seguintes:

- ✘ O método descreve a reação de FOD de uma forma matematicamente mais exata do que os métodos anteriormente usados pelo IPCC;
- ✘ É de fácil entendimento;
- ✘ É de fácil utilização em uma planilha;
- ✘ Fornece, como um subproduto, uma estimativa de alterações do carbono estocado no aterro.

Segundo o IPCC (2006), a transformação de material degradável em metano e gás carbônico em aterro ocorre através de uma série de reações em cadeia e em paralelo. Um modelo completo seria provavelmente muito complexo e possuiria muitas variáveis de acordo com as condições no aterro. Entretanto, observações laboratoriais e de campo em dados de geração de metano sugerem que o processo de decomposição pode ser aproximado através da cinética de primeira ordem (Hoeks, 1983 *apud* IPCC, 2006), o que tem sido amplamente aceito.

O modelo de Decomposição de Primeira Ordem possui basicamente duas partes principais: a primeira, pré-exponencial, descreve a quantidade de metano produzida durante toda a vida útil do aterro; a segunda, exponencial, descreve como este metano é gerado no decorrer do tempo.

O modo de cálculo simplificado fornecido pelo IPCC (2006) já evoluiu. Atualmente, o modelo mais recente utilizado para estimativa de emissão de metano por aterros é o descrito na “Ferramenta para determinar emissões evitadas de metano oriundas da disposição de resíduos em um local de disposição de resíduos sólidos”, da forma abaixo:

$$BE_{CH_4,SWDS,y} = \varphi * (1 - f) * (1 - OX) * \frac{16}{12} * F * DOC_f * MCF * \sum_{x=1}^y \sum_j W_{j,x} * DOC_j * e^{-k_j * (y-x)} * (1 - e^{-k_j})$$

Onde:

$BE_{CH_4,SWDS,y}$	Emissões de metano que deixaram de ser emitidas durante o período do ano x ao ano y (tCO ₂ e)
φ	Fator de correção devido a incertezas do modelo (0,9)
f	Fração de metano capturado no aterro e que já não seria emitido para a atmosfera
OX	Fator de oxidação – quantidade de metano oxidado no solo ou cobertura do aterro
$\frac{16}{12}$	Conversão de Carbono (12) para Metano (16)
F	Fração volumétrica de metano no biogás (0,5)
DOC_f	Fração de Carbono Orgânico Degradável (DOC) a ser decomposto (0,5)
MCF	Fator de correção de metano
$\sum_j W_{j,x}$	Quantidade de resíduo orgânico tipo j que não gerou metano no aterro no ano x
DOC_j	Fração de Carbono Orgânico Degradável no resíduo orgânico tipo j
k_j	Taxa de decomposição para o resíduo tipo j
j	Tipo de resíduo, categorizado
x	Ano durante o período: x vai desde o primeiro ano do projeto (x=1) até o ano y para o qual as emissões estão sendo calculadas (x=y)
y	Ano para o qual as emissões de metano estão sendo calculadas

Este modelo é utilizado tanto pelo MDL quanto por outros tipos de projetos envolvendo redução de emissões de GEE. Entre esses, pode ser citado o *Climate Action Reserve* (CAR), dos Estados Unidos, que o utiliza para estimar a produção de metano pela decomposição de resíduos alimentares e efluentes agro-industriais, mas não para aterros.

Algumas variáveis da equação anterior possuem seu número padrão já estabelecido. Os parâmetros que se encontram nesta situação e que possuem o referido número entre parênteses são o fator de correção devido a incertezas do modelo, a fração volumétrica de metano no biogás e a fração de carbono orgânico degradável a ser decomposto. Outras variáveis também já possuem valores pré-estabelecidos, mas precisam ser escolhidos dependendo da situação. Entre estas últimas, encontram-se o fator de oxidação, o fator de correção de metano, a fração

de carbono orgânico degradável no resíduo orgânico e a taxa de decomposição. Os parâmetros restantes, incluindo principalmente $\sum_j W_{j,x}$ e f , não possuem valor padrão por serem projetos-específicos, não podendo ser padronizados.

3.3 Parâmetros de entrada do modelo

Cada valor padrão descrito para cada parâmetro possui uma história e um motivo. Entretanto, todos eles são discutíveis, já que podem não refletir as realidades de um local em particular ou de um aterro em particular. O próprio IPCC (2006), em várias passagens, sugere a utilização de valores específicos como uma forma de dar segurança à estimativa e, assim, minimizar o erro. Estes parâmetros são descritos a seguir.

3.3.1 ox (*Fator de oxidação*):

O fator de oxidação normalmente é considerado como insignificante em cálculos de emissão de metano por aterros sanitários. Isso é devido, principalmente, ao cálculo atual ser baseado em um estudo para um aterro específico, nos Estados Unidos (Czepiel et al., 1996 *apud* Spokas et al, 2009). Entretanto, alguns exemplos recentes podem mostrar que este fator pode alcançar valores superiores a 35% (Chanton et al., 2009 *apud* Spokas et al, 2009).

De acordo com o IPCC (2006), este parâmetro é muito incerto. É difícil medir, varia consideravelmente com a espessura e natureza da camada de cobertura, com as condições atmosféricas e climáticas, com o fluxo de metano e com o escape de metano através de rachaduras/fissuras na camada de cobertura. Estudos de campo e laboratoriais que determinam oxidação de metano apenas através de camadas de solo uniformes e homogêneas podem levar a estimativas de oxidação em camadas de cobertura que não condizem com a realidade dos aterros.

Os valores recomendados para utilização neste parâmetro em projetos de MDL são:

- ✖ 0,1 para aterros cobertos com material oxidante (solo ou composto, por exemplo). Ou seja, 10% do metano gerado é oxidado no próprio aterro antes da sua emissão;
- ✖ 0 (zero) para aterros cobertos por outro tipo de material. Ou seja, não há oxidação e todo metano gerado é emitido para a atmosfera.

Ao utilizar um valor de 0,35 ao invés de 0,1 sugerido pelo IPCC já podemos obter um valor sensivelmente mais baixo para o potencial de metano emitido pelo aterro.

3.3.2 MCF (*Fator de correção de metano*)

Este parâmetro busca corrigir a produção de metano de acordo com a operação e profundidade do aterro. O racional é que aterros não gerenciados produzem menos metano quando comparados com aterros gerenciados. Isto ocorre devido a uma maior porção do resíduo sendo decomposta aerobicamente nas camadas superiores de um aterro sem gerenciamento. Os valores recomendados para utilização em projetos de MDL são:

- ✖ 1,0 para aterros de operação controlada e anaeróbicos, ou seja, a produção de 100% do metano possível a ser produzido. Para ser encaixado neste tipo, o aterro precisa possuir uma disposição controlada do resíduo (resíduo direcionado a áreas de deposição específicas, certo grau de controle sobre catadores e sobre incêndios) e deve incluir pelo menos um dos seguintes itens: material de cobertura, compactação mecânica ou nivelamento dos resíduos. A incerteza estimada para este valor, segundo o IPCC (2006) é - 10%;
- ✖ 0,5 para aterros com operação controlada e semi-anaeróbicos. Precisa haver disposição controlada do resíduo e deve incluir todas as seguintes estruturas para introdução de ar nas camadas de resíduos: cobertura de material permeável, sistema de drenagem do lixiviado, tancagem reguladora³ e

³ Termo traduzido do inglês "*regulating pondage*".

sistema de ventilação de gases. A incerteza estimada para este valor, segundo o IPCC (2006) é $\pm 20\%$;

- ✖ 0,8 para aterros com operação não controlada e profundidade maior ou igual a 5 metros. Esta categoria envolve todos os aterros que não podem ser caracterizados como gerenciados e que possuem profundidade superior a 5m. A incerteza estimada para este valor, segundo o IPCC (2006) é $\pm 20\%$;
- ✖ 0,4 para aterros com operação não-controlada e profundidade inferior a 5 metros. Esta categoria envolve todos os demais aterros. A incerteza estimada para este valor, segundo o IPCC (2006) é $\pm 30\%$.

O próprio IPCC (2006) indica que os valores deste parâmetro podem não representar a realidade do aterro por serem baseados em estudos experimentais e parecer de especialistas, não tendo sido efetivamente medido em campo sob condições reais. Além disso, outro fator que também pode ser considerado como ponto fraco destes valores é a dificuldade na classificação entre os tipos de aterros. Como exemplo, pode ser citado o fato de a divisão de profundidade entre aterros profundos e rasos (5m) ser também baseado em opinião de especialista. A descrição de aterros de operação controlada (MCF=1) é excessivamente abrangente e pode englobar aterros de diferentes qualidades e complexidades operacionais, o que gera discrepâncias graves nos resultados. Devido a todas estas razões citadas, a incerteza nos valores pode ser bastante grande.

3.3.3 DOC_j (*Fração de Carbono Orgânico Degradável no resíduo orgânico tipo j*)

Para a utilização deste parâmetro deve-se, primeiramente, classificar o resíduo por tipos. Esta classificação deve-se a diferenças na quantidade de carbono biodegradável para cada tipo de resíduo. A recomendação para utilização no MDL, representada por “valor para peso úmido/valor para peso seco”, é a seguinte:

- ✖ 0,43/0,5 para madeira e produtos de madeira;
- ✖ 0,4/0,44 para celulose, papel e papelão (excetuando-se lodo de estação de tratamento);

- ✖ 0,15/0,38 para comida, resíduos de comida, bebida e tabaco (excetuando-se lodo de estação de tratamento);
- ✖ 0,24/0,30 para resíduos têxteis;
- ✖ 0,2/0,49 para resíduos de parques e jardins;
- ✖ 0/0 para vidro, plástico, metal e outros inertes (já que não possuem carbono biodegradável ou biodegradam-se muito lentamente).

A incerteza estimada pelo IPCC (2006) para este parâmetro é de $\pm 20\%$. Também segundo o mesmo trabalho (IPCC, *op. cit.*), existem poucos estudos sobre este parâmetro e diferentes tipos de papel, alimento, madeira e têxteis podem apresentar valores bastante diferentes, sendo influenciados também por diferentes valores de umidade. Além disso, a fração de carbono orgânico degradável para resíduos industriais são ainda menos conhecidos.

Outra fonte de incerteza se dá devido a composição do resíduo ser bastante variável entre países e até mesmo dentro do próprio país (entre populações urbanas e rurais, entre moradores com diferentes rendas e entre estações do ano).

3.3.4 k_j (Taxa de decomposição para o resíduo tipo j)

Para este parâmetro, é preciso definir tanto o tipo de resíduo quanto o clima do local. Basicamente, existem duas divisões utilizadas, já que existe uma grande diferença entre locais em regiões secas e úmidas. No MDL, são utilizadas definições diferentes para regiões secas e úmidas dependendo da média de temperatura. Em locais quentes (temperatura média anual superior a 20°C), uma região seca é a que possui precipitação média histórica anual inferior a 1000 mm. Já para localidades frias (temperatura média anual igual ou inferior a 20°C), a distinção entre seca e úmida é dada pela razão entre a precipitação média anual e a evapotranspiração potencial – maior que 1 significa úmida, menor significa seca. As categorias de tipo de resíduo são similares às do parâmetro acima (DOC_j), sendo esta divisão necessária devido a diferentes tipos de resíduo possuírem diferentes velocidades de decomposição (e conseqüentemente de produção de metano).

Para localidades com temperaturas anuais médias superiores a 20°C (chamadas de regiões tropicais), os seguintes valores (representados por “região seca/região úmida”) são recomendados:

- ✘ 0,085/0,4 para resíduos de decomposição rápida – comida, restos de comida, lodo de esgoto, bebidas e tabaco;
- ✘ 0,065/0,17 para resíduos de decomposição moderada – demais resíduos orgânicos putrescíveis e resíduos de parques e jardins;
- ✘ 0,045/0,07 para parte dos resíduos de decomposição lenta como celulose, papel, papelão (excetuando-se lodo de estação de tratamento) e resíduos têxteis;
- ✘ 0,025/0,035 para a outra parte dos resíduos de decomposição lenta como madeira, produtos de madeira e palha.

Para locais possuidores de temperatura anual média igual ou inferior a 20°C (chamados de regiões boreais e temperadas), a categorização é rigorosamente a mesma, mas os valores são os seguintes (também representados por “região seca/região úmida”):

- ✘ 0,06/0,185 para resíduos de decomposição rápida – comida, restos de comida, lodo de esgoto, bebidas e tabaco;
- ✘ 0,05/0,01 para resíduos de decomposição moderada – demais resíduos orgânicos putrescíveis e resíduos de parques e jardins;
- ✘ 0,04/0,06 para parte dos resíduos de decomposição lenta como celulose, papel, papelão (excetuando-se lodo de estação de tratamento) e resíduos têxteis;
- ✘ 0,02/0,03 para a outra parte dos resíduos de decomposição lenta como madeira, produtos de madeira e palha.

As principais fontes de incerteza destes valores são devido a dificuldade de mensuração de taxas de decomposição em condições equivalentes àquelas apresentadas em um aterro real. Ainda, como existe variação considerável na meia-vida dependendo da composição do resíduo, do clima e da tipologia de aterro, é difícil selecionar valores representativos para um país inteiro.

3.3.5 Fator de correção devido a incertezas do modelo (ϕ)

No modelo utilizado de decaimento de primeira ordem, foi convencionado estabelecer um fator de correção de 0,9. Na ferramenta onde consta este parâmetro, é citado como referência um artigo que não pôde ser encontrado. Entretanto, outras fontes podem ser consultadas e resultam em números parecidos. A própria CQNUMC possui um guia técnico que trata sobre incertezas (UNFCCC, 2003). Nele consta o número que deve ser utilizado para o desconto de incertezas em cálculos de linha de base para Disposição de Resíduos Sólidos no Solo: 0,89. Isto corresponde, segundo o mesmo documento, a uma incerteza de cálculo de 40%.

3.3.6 Fração volumétrica de metano no biogás (F)

Segundo o IPCC (2006), a maioria do resíduo em um aterro de resíduos sólidos gera um gás com aproximadamente 50% de metano. Apenas material que inclua quantidade substancial de gordura ou óleo pode gerar gás com uma quantidade significativamente maior do que 50% de metano. O valor desta fração pode, na realidade, variar entre 0,5 e 0,55 (IPCC, *op. cit.*). Portanto, o fator de incerteza é considerado baixo para este parâmetro.

3.3.7 Fração de Carbono Orgânico Degradável (DOC) a ser decomposto (DOC_f)

Este parâmetro busca refletir no cálculo o fato de alguns carbonos orgânicos não degradarem, ou degradarem muito lentamente, sob condições anaeróbicas no aterro. Não é levado em consideração o DOC lixiviado do aterro, já que normalmente esta parcela é inferior a 1%. Entretanto, pode passar de 10% em locais com muita precipitação (Matsufuji et al., 1996 *apud* IPCC 2006). Não é usado valor diferenciado por tipo de resíduo, já que não há estudos conclusivos. A incerteza neste parâmetro é muito alta, exatamente devido à falta de estudos e à dificuldade em replicar as condições reais do aterro em ambiente experimental.

3.3.8 Resumo sobre incertezas do modelo

Através de uma simulação utilizando o método Bayesiano associado com a técnica de Monte Carlo, Lo et al. (2005) avaliou as incertezas dos parâmetros na fórmula de estimativa de geração de metano em aterros sanitários. Como pode ser visto na Tabela 8, os parâmetros que apresentaram a maior contribuição de incerteza na variância total foram o DOC (65,5%), F (20,2%) e MCF (6,5%). Quando comparados com a avaliação de incertezas feita pelo IPCC, fica a impressão de que é possível haver espaço para melhorias e ajustes na percepção de incerteza sobre estes parâmetros.

Tabela 8 – Contribuições de cada parâmetro para a variância na estimativa.

Parâmetros e entradas do modelo	Incerteza (%)	
	Lo et al. (2005)	IPCC (2006)
Fração de Carbono Orgânico Degradável (DOC)	65,5	20
Fração do CH₄ no biogás (F)	20,2	Baixa
Fator de Correção do Metano (MCF)	6,5	10-30
Fração do DOC a ser decomposto (DOCF)	3,7	Alta
Fator de Oxidação (OX)	0,2	Alta

Pequenas variações nos valores dos parâmetros da fórmula utilizada podem resultar em alterações drásticas nos resultados. Devido a isto, deve ser extremamente encorajada a utilização de números reais monitorados para os resíduos locais nas condições mais próximas as reais possível.

Além da incerteza associada diretamente aos parâmetros do modelo, o próprio modo de cálculo utilizado pelo IPCC é descrito como assumindo conversão total do resíduo e reatividade química espacial homogênea (Meraz et al., 2004). Existem sugestões de modelos modificando o modelo inicial proposto por Hoeks (1983 *apud* IPCC, 2006) e utilizado pelo IPCC através de uma abordagem fractal, ou seja, considerando a natureza heterogênea da fermentação (levando em conta o transporte ineficiente de nutrientes hidrolisados através da zona de reação da metanogênese e a interface sólido-líquido). Meraz et al. (2004) afirma que não há dados de campo disponíveis que permitam uma validação quantitativa de nenhuma equação para cálculo de metano devido a:

- ⌘ Ninguém foi capaz de determinar convincentemente a eficiência final de fermentação em um aterro; a hipótese de 100% de conversão não é aceitável porque em aterros muito compactados é comum encontrar resíduos em sua forma original após anos.
- ⌘ Não há uma determinação satisfatória da eficiência dos sistemas de captação de gases; geralmente é assumido, sem nenhuma justificativa, que apenas metade do gás produzido é captada.

A Figura 9 apresenta uma comparação entre as equações utilizadas para estimar produção de metano em aterros. “*USEPA equation*” é a utilizada pelo IPCC em 1996, “*Hoeks equation*” é a utilizada pelo IPCC em 2006 e a “*Fractal-like equation*” é a proposta pelo autor do trabalho.

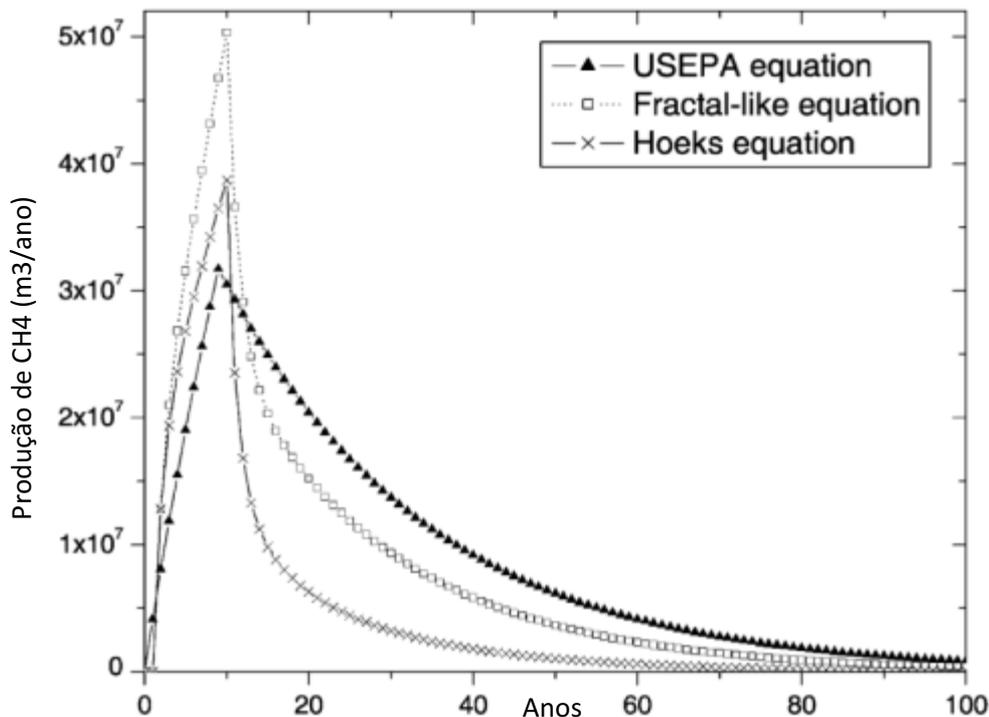


Figura 9 – Comparação entre o resultado de diferentes equações para produção de metano em aterro.

Fonte: Meraz et al. (2004)

Entretanto, mesmo a equação proposta fornece valores de produção de metano superiores aos encontrados por Hoeks (1983 *apud* IPCC, 2006), nos remetendo ao mesmo problema de superestimação do metano produzido. Porém, é um indicativo de que ainda há espaço para ajustes no modelo.

O Banco Mundial também constatou que poderia haver problemas na aplicação desta fórmula, contratando uma pesquisa exatamente abordando este

assunto. Segundo Stege (2009), os parâmetros e as constantes utilizadas são utilizados para modelagem de produção de biogás em aterros de países desenvolvidos (principalmente Estados Unidos) e os problemas na utilização deste modelo são os seguintes:

- ✧ Devido ao modelo aplicar apenas um único valor médio para a taxa de decomposição do resíduo (k), não é possível incluir as variações desta taxa no decorrer do tempo. Resíduos sólidos em países em desenvolvimento contêm tipicamente algo em torno de 50% de resíduos alimentícios que degradam muito rapidamente, deixando materiais orgânicos que se decompõem muito lentamente. Uma vez que o aterro é fechado e a disposição de resíduos cessa, a taxa de decomposição média irá diminuir rapidamente, resultando em taxas de geração de biogás muito mais baixas em alguns anos. Desta forma, o modelo tende a superestimar a geração de metano em aterros fechados, ou aterros onde a instalação dos poços é restrita a áreas já fechadas e cobertas. Esta fonte de erro pode ser amplificada em áreas de clima úmido com alta taxa de decomposição;
- ✧ Se 50% do resíduo disposto no aterro for resíduo alimentício, com 70% de umidade, a maioria dos valores para L_0 deveriam variar em torno de 60 a 85 m^3 de metano por tonelada (Mg) de resíduo. Muitos projetos avaliados no estudo apresentaram valores superiores a esta faixa recomendada, chegando até 160 m^3 /Mg ou maiores.

Esta pesquisa revelou uma tendência para todos os países: a performance decrescia até 2006, quando voltava a aumentar. Estes declínios na recuperação de metano em aterros que foram projetados para apresentar aumentos significativos na recuperação do gás contribuíram para o péssimo desempenho em 2006. Os aumentos projetados na recuperação sugerem que os modelos assumiram expansões do sistema de coleta nestes aterros. Entretanto, o declínio que se viu pode ser um indício de que as expansões efetivamente não ocorreram, enquanto problemas com a operação dos poços pode ter piorado.

Alguns modelos com ênfase regional estão surgindo como possibilidades para ser utilizados com mais sucesso na estimativa de geração de metano. Uma iniciativa que merece destaque é o Programa de Assistência para Metano de Aterros (do

inglês *Landfill Methane Outreach Program* ou LMOP) da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (US EPA). Este é um programa voluntário que busca auxiliar a redução da emissão de metano oriunda de aterros através de encorajar a captura e utilização do biogás. Diversos modelos regionais e nacionais estão em fase de desenvolvimento, podendo ser consultados em <http://www.epa.gov/lmop/international/tools.html>. Infelizmente ainda não há modelos específicos para o Brasil, mas tudo indica que poderá haver um em poucos anos.

3.4 Hipóteses para baixa eficiência / inconsistências na estimativa

Alguns outros fatores, além da utilização dos parâmetros padrão do IPCC na fórmula do modelo, podem influenciar a estimativa e resultar em uma informação errada quando comparada com o real monitoramento de gases. Dentre estes fatores, merecem destaque os pontos a seguir.

3.4.1 *Operação do aterro*

A qualidade de operação dos aterros pode variar substancialmente entre países. Por mais que a tecnologia esteja difundida mundialmente, o custo de capital não é homogêneo quando se trata de gerenciamento de resíduos. A disposição financeira das diferentes sociedades para lidar com este tema é extremamente variável.

É possível encontrar bons exemplos em alguns países da Europa e nos Estados Unidos, onde todos (ou a grande maioria) dos aterros possuem um sistema confiável de captação e destruição de gases. Entretanto, pode ser apresentado um número ainda maior de países que não possuem a menor preocupação com este tipo de prática.

Entretanto, nos aterros com boas práticas de gerenciamento também pode haver problemas operacionais. Falhas na captação dos gases ocorrem devido aos mais diversos motivos. Os aterros brasileiros que possuem projetos de MDL possuem níveis operacionais bastante elevados e nem por isso escaparam de apresentarem inúmeros problemas com relação a captação e queima dos gases, culminando com sérios atrasos no recebimento de receita dos créditos de carbono.

Até mesmo em uma operação considerada ótima podem ser encontrados outros problemas que influenciem na geração/captação de metano. Meraz et al. (2004) afirma que não há informações confiáveis sobre a eficiência do sistema de captura de metano e, além disso, a influência do conteúdo de água livre⁴ pode ser de suma importância. Como valores altos de água livre beneficiam a produção de metano, irrigação e/ou recirculação do lixiviado são encorajados e uma compactação moderada (menor que 800 kg/m³) promove o aumento do conteúdo de água livre através do aumento das forças de capilaridade do sistema. Enquanto isso, alta compactação (maior que 800 kg/m³) não é recomendada devido a redução do conteúdo de água livre pela destruição do espaço poroso do aterro (Meraz et al., 2004).

Já segundo Stege (2009), muitos aterros de países em desenvolvimento não alcançam a eficiência de captura apresentadas em aterros de países desenvolvidos, o que resulta em eficiência subótima da captação de gás. Os principais problemas encontrados no sistema de coleta foram altos níveis de lixiviado e a impossibilidade na instalação de poços em áreas ainda com disposição de resíduos ativa devido a problemas de segurança. Além disso, segundo o mesmo trabalho, por motivos diversos o cronograma previsto para instalação dos poços é normalmente difícil de alcançar. As projeções de recuperação futura de metano precisam assumir um cronograma realístico para instalação do sistema e demais instalações necessárias.

3.4.2 *Variação de umidade devido a chuvas, composição do resíduo e/ou lixiviado.*

Um dos fatores que pode levar a diferenças entre previsões e realidade na geração de metano é a recirculação de lixiviado. Inúmeros estudos já foram realizados sobre esta prática e há argumentos plausíveis defendendo ser esta uma prática benéfica para a operação do aterro. Conforme citado no item anterior, Meraz et al. (2004) afirma que o conteúdo de água livre possui importância primordial para a geração de metano em aterros. Entretanto, uma investigação mais minuciosa precisa ser feita para se avaliar a influência do lixiviado na produção de metano.

⁴ Conteúdo de água livre (ou *free water content*) é definido por Meraz et al. (2004) como sendo a água presa por capilaridade no rejeito e camadas de cobertura intermediárias, bem como água percolando pelo aterro e se movendo para cima através do gradiente de fluxo de evapotranspiração.

A acumulação de lixiviado é classificada como um problema praticamente universal em países em desenvolvimento, de acordo com Stege (2009). Isto ocorre especialmente em locais muito chuvosos, mas mesmo aterros situados em locais com precipitação moderada apresentam este tipo de problema devido à alta umidade do resíduo e à acumulação da chuva na massa devido à cobertura limitada do solo e drenagem superficial insuficiente.

De acordo com Bayard et al. (2009), o objetivo da recirculação de lixiviado é manter a umidade do resíduo em um aterro em torno de 50%, o que pode resultar em uma maior metanogênese e geração de metano entre três e quatro vezes superior a um resíduo com umidade entre 30 e 40%. Entretanto, segundo o mesmo autor, esta prática pode inibir a metanogênese através da acumulação de ácidos graxos voláteis e amônia, além de poder acarretar também problemas operacionais.

Segundo Sanphoti et al. (2006), a recirculação de lixiviado alcança o seu objetivo máximo quando iniciada após a estabilização do aterro, aumentando tanto a taxa de produção de metano quanto a sua produção total. Conseqüentemente, a capacidade de lidar com lixiviado de cargas orgânicas mais elevadas neste aterro é maior e é sugerido a utilização de lixiviado de aterros novos em aterros antigos para maximizar os resultados. Entretanto, o estudo é feito com reatores pequenos em laboratório e com condições controladas. Além disso, um dado interessante obtido foi a antecipação significativa do início da fase de metanogênese do aterro através da adição constante de água na fase inicial, durante a acidogênese. Menos de 40 kg de resíduo (sem material reciclável, apenas com orgânicos) foi utilizado para simular o aterro e a estabilização dos resíduos se deu entre 180 e 230 dias a partir do fechamento do reator.

Budka et al. (2009), em quatro grandes células de aterro (entre 45 e 70 mil toneladas de resíduo cada) mostrou grande diferença na velocidade de decomposição do resíduo quando utilizada a recirculação de lixiviado (Tabela 9). Os resultados são exibidos para uma célula sem recirculação e três células com recirculação de lixiviado.

Tabela 9 – Velocidade de reação para diferentes tipos de resíduos.

Tipos de resíduo quanto a velocidade de degradação	k (ton/ano)				
	Sem Recirculação	Recirculação			Valores IPCC Região Úmida
		1	2	3	
Rápida	0,40	1,73	5,20	1,73	0,40
Média	0,23	1,16	2,31	1,85	0,17
Lenta	0,05	0,53	0,80	0,53	0,07

Fonte: Modificado de Budka et al. (2009).

Quando comparados os valores obtidos por Budka et al. (2009) e os valores recomendados para utilização pelo IPCC (2006) para projetos de MDL em regiões úmidas, nota-se claramente que os últimos são muito próximos dos valores obtidos pelo primeiro para uma célula sem recirculação de lixiviado. Ou seja, no caso de haver a recirculação, é possível haver uma degradação do resíduo de forma muito mais rápida (entre 6 e 13 vezes mais rápida, em média) do que a velocidade esperada pelo modelo recomendado pelo IPCC (*op. cit.*).

Apesar do aumento da produção de biogás obtido através da recirculação de lixiviado, Budka et al. (2009) não encontrou correlação entre a quantidade de biogás produzido e a quantidade de lixiviado injetado, mostrando que não necessariamente a quantidade de lixiviado influencia na produção de biogás.

Bayard et al. (2009) comparou, em três reatores de laboratório (aproximadamente 1m de diâmetro por 1,3m de altura), três formas distintas de realizar a recirculação de lixiviado: saturação total do reator experimental por um dia, com posterior drenagem passiva e nenhuma adição posterior de lixiviado – R1; recirculação controlada de 22 L por semana de lixiviado ($6 \text{ L.dia}^{-1}.\text{ton peso seco}^{-1}$) – R2; recirculação controlada de 5,5 L por semana de lixiviado ($1,5 \text{ L.dia}^{-1}.\text{ton peso seco}^{-1}$) – R3. Os resultados obtidos mostraram que, ao final de 173 dias, R1 havia produzido 60% do biogás esperado para a quantidade de resíduo no reator. Entretanto, a produção de biogás neste reator ainda estava alta no fim do experimento, mostrando que ainda havia uma quantidade significativa a ser produzida. Enquanto isso, R2 e R3 já apresentaram curva de produção de biogás bastante descendente ao final dos 173 dias, com produção de 90% e 36% do esperado, respectivamente. Este resultado mostra que houve uma aceleração considerável da geração de metano ao realizar a recirculação de lixiviado e, como todos os reatores eram iguais, a quantidade recirculada para R3 foi insuficiente para manter uma produção alta de biogás.

Bilgili et al. (2009) analisou a influência da recirculação de lixiviado em dois reatores contendo 175kg de resíduos obtidos em um aterro sanitário de Istambul (Turquia). Os resultados mostraram que após 27 meses de operação a taxa de degradação do resíduo foi aumentada em 32% com a recirculação do lixiviado.

Apesar de a maioria dos trabalhos citados serem realizados com pequenos reatores anaeróbios, diferindo de condições de um aterro sanitário normal, existem

indícios de que a recirculação de lixiviado controlada (realizada com parâmetros específicos) pode acelerar a decomposição dos resíduos.

3.4.3 Velocidade de decomposição do resíduo

De acordo com Themelis e Ulloa (2007), através de balanço de massa é possível obter um valor de emissão teórica de 0,149 t CH₄/t RSU⁵. De acordo com as conclusões deste artigo, pode ser assumido que, sob as condições corretas, pelo menos 50% do metano latente no RSU pode ser gerado dentro de um ano de tempo de residência do resíduo no aterro, enquanto o aterro não é coberto e a chuva pode penetrar na massa.

Ainda, segundo uma pesquisa divulgada no mesmo artigo (Barlaz et al., 2004 *apud* Themelis e Ulloa, 2007), em biorreatores anaeróbios sob condições controladas, a reação de metanogênese obteve pico em menos de 100 dias e estava praticamente completa em aproximadamente 320 dias. Tal pesquisa resultou em uma liberação de 0,153 t CH₄/t biomassa, ficando bem próximo ao valor teórico. Para um aterro recebendo 286.000 t/ano a produção de metano pode variar entre 0 e 90 Nm³/minuto (Barlaz et al., 2002 *apud* Themelis e Ulloa, 2007). Assumindo que a maior parte do metano é liberada no primeiro ano após a deposição e também uma taxa intermediária de 45 Nm³/min, chega-se a 0,12 t CH₄/t RSU. Este valor já é bastante próximo do esperado teórico total.

Já Feuillade et al. (2009) encontrou produção da maior parte de metano de seus reatores (23m³ e aproximadamente 11 ton de resíduo cada reator) entre 6 e 50 meses após a deposição dos resíduos.

Ou seja, é possível haver uma maior produção de metano ainda durante a fase na qual o aterro ainda não possui os drenos em plena operação. Se isto ocorrer, uma boa parte do metano pode estar escapando antes mesmo de ser coletado, deixando as estimativas teóricas (que não levam este fator em consideração) defasadas desde sua fase inicial. Deste modo, tanto a idade quanto a composição do resíduo são muito importantes para a definição da quantidade de metano a ser gerada.

⁵ Para um RSU contendo 69,5% de biodegradáveis, assumindo 60% de conteúdo orgânico seco. Resulta em 417 kg (2,86 kmol) de C₆H₁₀O₄/t RSU. 4 kmol CH₄ é igual a 22,4 Nm³.

3.4.4 Captura do biogás

Por mais que estudos sejam feitos e que melhores projetos de aterros sanitários sejam elaborados a cada dia, como o biogás é capturado através dos drenos, este gás não é captado na sua totalidade. Themelis e Ulloa (2007) reportam dados de 25 aterros da Califórnia, nos quais se estima uma captura de $43 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{t RSU}$ e uma perda de $82 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{t RSU}$.

Isso mostra que para uma estimativa de emissão de metano em aterros fornecer valores próximos aos realmente observados, esta perda de metano na captura precisa ser levada em consideração. Praticamente o dobro do metano capturado é perdido nos aterros pesquisados pelos autores citados acima. Não é plausível imaginar, neste caso, que seja algum problema operacional, já que aterros situados na Califórnia em teoria possuem bom gerenciamento. Se direcionarmos este conhecimento para países em desenvolvimento, será possível constatar que existe baixa performance do sistema de captura do gás. Tal desempenho é motivado por baixa experiência em projetar, construir e operar um sistema de coleta de biogás. Mesmo quando desenvolvedores experientes estão envolvidos, aterros em países em desenvolvimento apresentam condições que dificultam as taxas esperadas de captura de biogás (Stege, 2009).

Dois problemas para a captura do biogás merecem destaque, segundo Stege (*op. cit.*). O primeiro deles é a dificuldade de manter o cronograma de instalação do sistema conforme inicialmente estabelecido, devido a várias razões. Este atraso resulta em uma falta de sincronia com as estimativas, já que a estimativa é reflexo do cronograma esperado, resultando em uma curva de projeção irregular ao invés de uma que aumente continuamente até o fechamento do aterro. O segundo problema é a precipitação e geração do lixiviado, já que as bombas são capazes apenas de retirar o excesso de umidade de uma área limitada ao redor do poço e não atuam no aterro por completo.

Adicionalmente, a cobertura do aterro também pode exercer influência na eficiência de captura do biogás. Em um estudo (Spokas et al., 2006) que foi utilizado como base para o desenvolvimento dos guias atuais para valores padrão de

eficiência de captura pela Agência de Meio Ambiente da França foram observados os seguintes valores para sistemas ativos de coletas de biogás:

- ✘ 35% de eficiência para uma célula de aterro operacional;
- ✘ 65% de eficiência para uma célula com cobertura temporária;
- ✘ 85% de eficiência para uma célula com cobertura final de argila;
- ✘ 90% de eficiência para uma célula com cobertura final de geomembrana.

4 ESTUDOS DE CASO: ALGUNS PROJETOS DE MDL NO BRASIL

Todas as informações descritas neste capítulo sobre os projetos de MDL, como descrito no item 1 deste trabalho, foram obtidas através dos meios oficiais que viabilizam os dados sobre este tipo de projeto. Optou-se por apresentar apenas as informações obtidas na respectiva página da internet de cada um (citada como nota de rodapé abaixo de cada sub-item deste capítulo). Desta forma, podem ocorrer diferenças na quantidade de dados apresentados, já que a descrição não é homogênea e alguns possuem mais informação disponível do que outros.

4.1 Projeto Onyx de Recuperação de Gás de Aterro

Localizado na cidade de Tremembé, São Paulo, Brasil. De acordo com o DCP registrado, o aterro é dividido em duas áreas de disposição: Aterro 1, área existente com capacidade de 850.000 m³ que não é mais usada para a disposição de resíduos; Aterro 3, nova área com capacidade total de 1.700.000 m³ e planejamento para recebimento de aproximadamente 180.000 toneladas/ano de resíduos municipais e comerciais (vida útil estimada até 2012)⁶.

O equipamento de recuperação de gás de aterro possui uma capacidade total de 2400 m³/h, sendo em teoria mais do que suficiente para queimar o volume projetado de gás recuperado, o qual é usado principalmente no local para a evaporação de resíduos líquidos do aterro (lixiviado). A geração de eletricidade não foi levada em consideração para a atividade de projeto de MDL proposta. A construção do projeto foi iniciada em dezembro de 2000 e finalizada em março de 2001.

Este projeto utilizou a metodologia aprovada AM0011. Esta metodologia foi proposta pelos próprios desenvolvedores deste projeto especificamente para o mesmo. Esta metodologia refere-se à fórmula de cálculo proposta pelo IPCC 1996 para estimativas. Entretanto, segundo o DCP, em tradução livre:

“As emissões de linha de base oriundas de gás de aterro do projeto são determinadas ex-post através do monitoramento da quantidade de gás

⁶ <http://cdm.unfccc.int/Projects/DB/DNV-CUK1126082019.35/view>

extraído do aterro. Desta forma, as estimativas ex-ante de emissões de linha de base tal como consta neste DCP não são tão relevantes. Entretanto, para facilitar as vendas futuras de RCEs deste projeto, esta metodologia fornece orientações para estimar as reduções de emissão. Os usuários desta metodologia devem ficar livres para utilizar outros métodos de estimativa.”

As estimativas de produção de metano são realizadas para este projeto através da equação apresentada abaixo:

$$Q_x = L_0 R (e^{-kc} - e^{-kt})$$

Onde:

Q_x = Metano total emitido no ano x (m^3 /ano)

L_0 = Quantidade potencial teórica de metano gerada (m^3 /ton). Esta quantidade é dependente do resíduo e pode variar desde menos de 100 a mais de 200 m^3 /ton.

R = Taxa de disposição do resíduo (ton/ano)

t = tempo desde a abertura do aterro (anos)

c = tempo desde o fechamento do aterro (anos)

k = taxa de geração do gás de aterro (ano^{-1}).

Segundo o DCP, valores de k podem variar desde menos de 0,005 a 0,4 por ano. Valores mais altos de k são associados com maior umidade. Em caso de um aterro existente, a quantidade atual de metano emitido do aterro pode ser estimado através de medições da vazão do metano em vários locais e extrapolando estes dados para o aterro como um todo. Utilizando esta informação, uma estimativa mais precisa de k pode ser feita. Ainda, o DCP fornece uma estimativa de conteúdo orgânico de cada tipo de resíduo utilizado nos cálculos, conforme Tabela 10.

Tabela 10 – Conteúdo de carbono orgânico por tipo de resíduo para o projeto Onyx.

Tipo de Resíduo	Conteúdo de Carbono Orgânico Médio (kg/ton)
Resíduo Sólido Municipal	240
Resíduo Industrial e Comercial	120
Lodo Biológico	400
Areia de Fundação	0
Resíduo Inerte	0

Fonte: DCP registrado.

Informações básicas sobre a geração de créditos de carbono por ano podem ser encontradas na Tabela 11, onde são apresentados os dados monitorados (representados pela sigla “RCEs”) comparados com os dados estimados (representados pela sigla “DCP”).

Tabela 11 – Informações sobre RCEs do Projeto Onyx de Recuperação de Gás de Aterro.

Ano	RCEs (tCO ₂ e)	DCP (tCO ₂ e)	Status	Quando
2003	21.954	36.661	Emitido	15/3/2007
2004	30.656	45.267	Emitido	15/3/2007
2005	40.988	47.764	Emitido	15/3/2007
2006	46.320	58.407	Retirado	3/10/2008
2007	42.319	71.153	Aguardando	26/9/2010

Fonte: Informações públicas disponível nos históricos de monitoramento do projeto no website do Conselho Executivo do MDL da CQNUMC.

Como pode ser notado, a geração de RCEs ficou um pouco abaixo do esperado em todos os anos. Entretanto, conforme pode ser visto na Figura 10, esta diferença foi de no máximo 41% (em 2007).

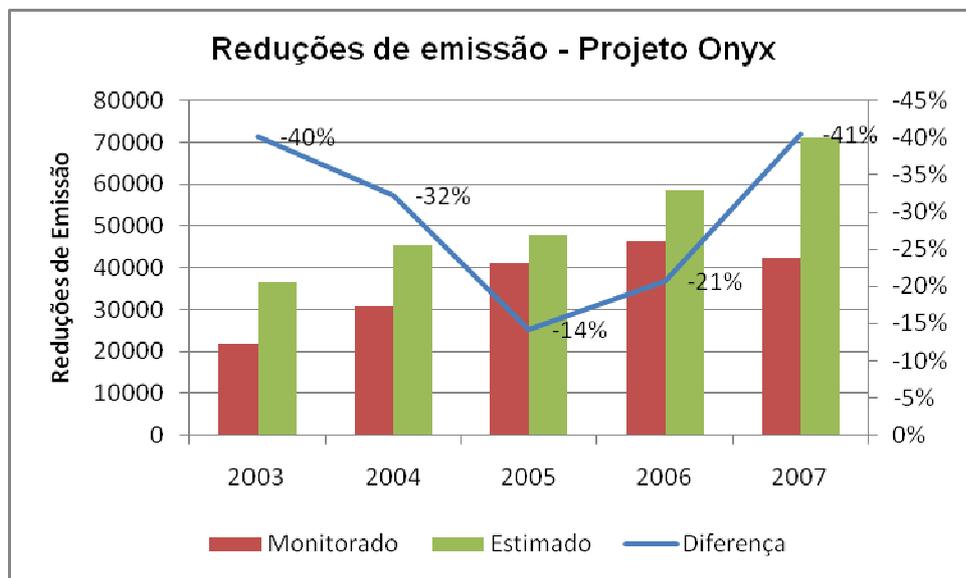


Figura 10 – Gráfico representando a evolução das reduções de emissão monitoradas e estimadas do Projeto Onyx de Recuperação de Gás de Aterro.

4.2 Projeto NovaGerar - Projeto de Energia a partir de Gases de Aterro Sanitário

Este aterro está localizado na cidade de Nova Iguaçu, Rio de Janeiro, Brasil. Envolve a captura e destruição do biogás, bem como a produção de eletricidade (projetada em 12MW de capacidade instalada) de um antigo lixão (o Lixão da Marambaia) e um novo aterro (o Aterro Sanitário de Adrianópolis). O novo aterro é conhecido por Central de Tratamento de Resíduos (CTR) Nova Iguaçu⁷.

Atualmente, o CTR Nova Iguaçu é dividido em quatro células, sendo a captura feita em apenas uma. É estimado o recebimento de aproximadamente 2.000 toneladas de RSU por dia. O projeto de MDL envolve também a captura e destruição do metano produzido no antigo lixão, que hoje se encontra desativado.

Este projeto utilizou a metodologia aprovada AM0003. Esta metodologia foi proposta pelos próprios desenvolvedores deste projeto especificamente para o mesmo. Esta metodologia refere-se à fórmula de cálculo proposta pelo IPCC 1996 para estimativas. Entretanto, o DCP não cita nenhuma fórmula para linha de base. De acordo com este documento citado, em tradução livre:

“Devido à natureza do processo de monitoramento e cálculo das reduções de emissão mais apropriado para este projeto, a fórmula (...) não pode ser diretamente utilizada para completar a tabela (...).

Baseado em uma variedade de pressuposições no que diz respeito ao volume de resíduos e taxa de deposição, perfil de geração de metano, coleta de gás de aterro entre outros, a redução de emissões projetada é mostrada (...). Por favor, note que (...) é somente uma estimativa grosseira dos valores esperados.”

Informações básicas sobre a geração de créditos de carbono podem ser encontradas na Tabela 12, onde são apresentados os dados monitorados (representados pela sigla “RCEs”) comparados com os dados estimados (representados pela sigla “DCP”).

⁷ <http://cdm.unfccc.int/Projects/DB/DNV-CUK1095236970.6/view>

Tabela 12 – Informações sobre RCEs do Projeto NovaGerar - Projeto de Energia a partir de Gases de Aterro Sanitário.

Ano	RCEs (tCO ₂ e)	DCP (tCO ₂ e)	Status	Quando
2004	0	68.931	Emitido	23/07/2008
2005	0	179.547	Emitido	23/07/2008
2006	0	228.303	Emitido	23/07/2008
2007	67.303	277.813	Emitido	23/07/2008
2008	81.530	327.549	Emitido	04/01/2010
2009	82.606	379.126	Aguardando	21/10/2010

Fonte: Informações públicas disponível nos históricos de monitoramento do projeto no website do Conselho Executivo do MDL da CQNUMC.

Devido a problemas operacionais, não houveram dados monitorados durante os 3 primeiros anos do projeto, o que comprometeu bastante seu desempenho. Entretanto, mesmo após o início do monitoramento, nota-se uma baixa eficiência de geração de créditos. No melhor ano até hoje (2008), a geração de créditos de carbono foi 75% menor do que a esperada para o mesmo ano (Figura 11).

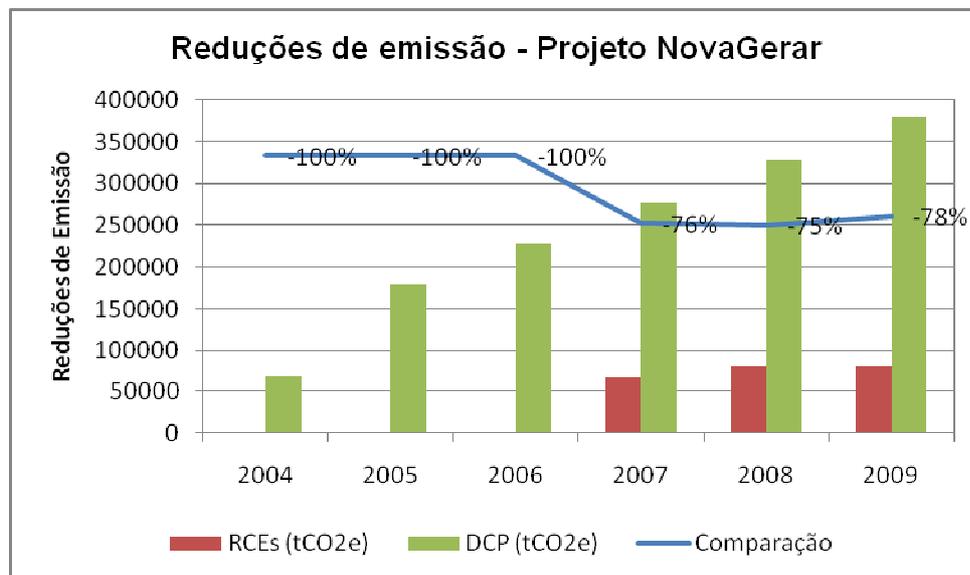


Figura 11 – Gráfico representando a evolução das reduções de emissão monitoradas e estimadas do Projeto NovaGerar - Projeto de Energia a partir de Gases de Aterro Sanitário.

4.3 Projeto de Gás do Aterro de Bragança - EMBRALIXO/ARAÚNA

Este aterro está localizado em Bragança Paulista, São Paulo, Brasil. A tecnologia utilizada na atividade de projeto consiste basicamente em um sistema de drenos verticais interconectados a tubos, que por sua vez são conectados aos

equipamentos de sucção e queima. De acordo com o DCP, todos os equipamentos foram feitos no Brasil⁸.

O aterro possui uma área total de 145.224 m². A disposição de resíduos é documentada desde 1990, com previsão de fechamento do aterro em 2015. A média histórica de deposição de resíduos é de 144 ton/dia.

Este projeto utiliza a metodologia ACM0001 versão 05 para efeitos de estimativa de emissão de metano. Esta metodologia já é a mais recente utilizada até hoje, entretanto ainda não possuía a forma mais atual de estimar emissões de metano (através da ferramenta específica para este fim).

Para estimativa de emissão de metano na linha de base, o projeto utiliza a equação abaixo:

$$CH_4 = \sum_x [(A * k * MSW_T(x) * L_0(x)) * e^{-k(t-x)}]$$

Onde:

t = Ano do inventário

x = anos para os quais dados de entrada devem ser inseridos

k = taxa de geração de metano constante (1/ano)

A = fator de normalização que corrige o somatório $(1 - e^{-k})/k$

$MSW_T(x)$ = Resíduo municipal total gerado no ano x

L_0 = potencial de geração de metano (kg CH₄/ton de resíduo)

Já para cálculo do L_0 , é utilizada a seguinte equação:

$$L_0 = MCF * DOC(x) * DOC_F * \frac{16}{12}$$

Onde:

MCF = Fator de correção de metano (%)

DOC(x) = Carbono orgânico degradável no ano x (Gg C/Gg resíduo)

DOC_F = fração de DOC que efetivamente se torna biogás: $0,14 * T(^{\circ}C) + 0,28$

16/12 = Conversão de C em CH₄

⁸ <http://cdm.unfccc.int/Projects/DB/DNV-CUK1182151832.44/view>

Os parâmetros sensíveis, nestas fórmulas, são L_0 e k . Algumas opções de valores para estas variáveis são mencionadas no DCP, e as escolhas dos mesmos são baseadas em literatura por não haver medição/ensaio no local.

Para k , assume-se que a localização do aterro é em local úmido, gerando um valor entre 0,1 e 0,35. 0,1 é o escolhido. Já para L_0 , é citado que a literatura disponibiliza valores entre 4,4 e 194 kg CH_4 /ton de resíduo, sendo utilizado um valor de 117 kg CH_4 /ton de resíduo.

Este projeto não possui nenhum crédito efetivamente emitido. Possui um pedido de emissão que se encontra atualmente em estado de revisão, significando que alguma explicação satisfatória precisa ser fornecida ao Conselho Executivo do MDL para poder haver a emissão real dos créditos. Entretanto, na Tabela 13 pode ser vista a quantidade de créditos que está sendo solicitada e a quantidade esperada para o mesmo período, onde são apresentados os dados monitorados (representados pela sigla “RCEs”) comparados com os dados estimados (representados pela sigla “DCP”).

Tabela 13 – Informações sobre RCEs do Projeto de Gás do Aterro de Bragança - EMBRALIXO/ARAÚNA.

Ano	RCEs (tCO ₂ e)	DCP (tCO ₂ e)	Status	Quando
2008	21496	66008	Em revisão	25/10/10
2009*	32192	55039	Em revisão	25/10/10

* até Outubro

Fonte: Informações públicas disponível nos históricos de monitoramento do projeto no website do Conselho Executivo do MDL da CQNUMC.

Pode ser notado um aumento relevante do primeiro para o segundo ano de monitoramento. Isto contribui para diminuir a diferença na média entre os dois anos, sendo de quase 55%. Na Figura 12 encontra-se a representação de cada ano.

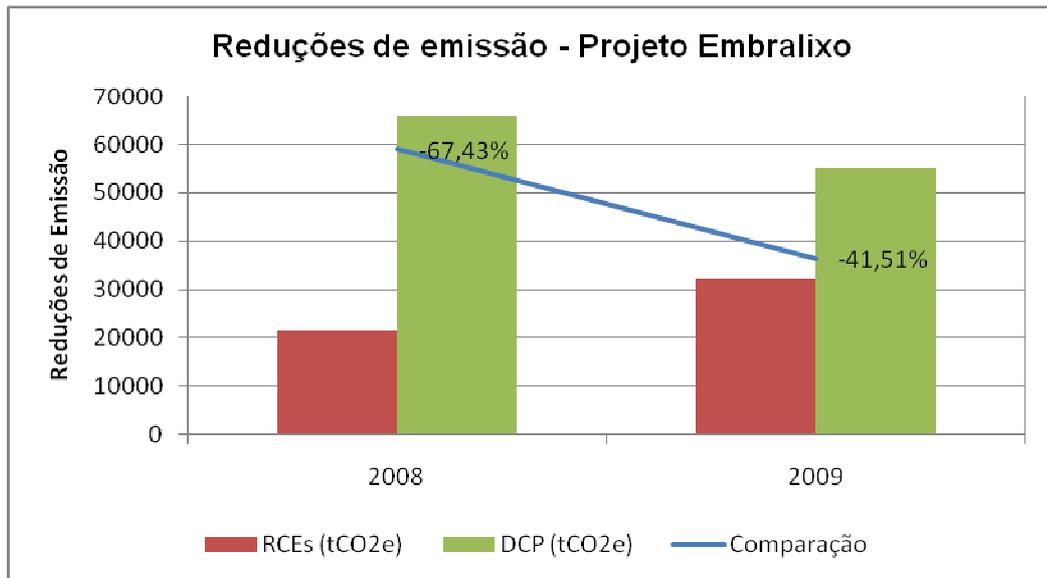


Figura 12 – Gráfico representando a evolução das reduções de emissão monitoradas e estimadas do Projeto de Gás do Aterro de Bragança - EMBRALIXO/ARAÚNA.

4.4 Projeto de Energia de Gases de Aterro Sanitário da Empresa MARCA

O projeto localiza-se na cidade de Cariacica, Espírito Santo, Brasil. Envolve um sistema de coleta de gás, sistema de drenagem de lixiviado, equipamento queimador de gás e uma planta modular de geração de eletricidade (com capacidade final esperada de 11MW). O objetivo é gerar eletricidade através do gás, queimando o excedente no queimador com capacidade para processar 2000 m³/h⁹.

Utilizou a metodologia AM0003 versão 3, que é um aprimoramento da metodologia feita e utilizada para o projeto NovaGerar.

Segundo o DCP, as estimativas foram realizadas utilizando o modelo de Decaimento de Primeira Ordem do EPA (EUA). Entretanto, não é fornecida nenhuma referência à fórmula utilizada ou à fonte para obtenção da mesma. É mencionado ainda, em tradução livre, que:

“ Não é aplicável estimar as emissões de gases de efeito estufa, porque o projeto utiliza cálculo ex-post das emissões de linha de base, diretamente monitorando e calculando as reduções de emissão.”

Este projeto possuiu apenas uma emissão de créditos até hoje, envolvendo um grande período. Entretanto, apesar de o projeto ter o período de obtenção de

⁹ <http://cdm.unfccc.int/Projects/DB/DNV-CUK1132565688.17/view>

créditos a partir de Julho de 2004, a operação só teve início realmente em Abril de 2007. Isto é refletido na obtenção de créditos do projeto, como pode ser visto na Tabela 14, onde são apresentados os dados monitorados (representados pela sigla “RCEs”) comparados com os dados estimados (representados pela sigla “DCP”).

Tabela 14 – Informações sobre RCEs do Projeto de Energia de Gases de Aterro Sanitário da Empresa MARCA.

Ano	RCEs (tCO ₂ e)	DCP (tCO ₂ e)	Status	Quando
2004	0	50259	Emitido	06/01/2010
2005	0	130578	Emitido	06/01/2010
2006	283	157776	Emitido	06/01/2010
2007	9522	182387	Emitido	06/01/2010
2008	31125	204655	Emitido*	06/01/2010
2009	40664	224804	Monitorando	25/10/2010

* até Julho

Fonte: Informações públicas disponível nos históricos de monitoramento do projeto no website do Conselho Executivo do MDL da CQNUMC.

Além dos vários problemas técnicos apresentados pelo projeto nos primeiros anos do período de obtenção de créditos, a operação continua ainda não sendo exatamente o esperado. No ano de 2010 (citado como exemplo, mas não incluído por ter sido um ano totalmente atípico), é esperada a geração de pouco mais de 6.000 RCEs. Isto reflete a baixíssima eficiência de geração de créditos. Vários problemas tanto na captura (normalmente relacionado ao lixiviado), operação (quebra e mau funcionamento do queimador ou do sistema de controle do queimador) e monitoramento (sistema apresentando mau funcionamento, medidores com defeito) contribuíram para uma média de quase 90% de diferença (a partir do início de operação), como pode ser visto na Figura 13.

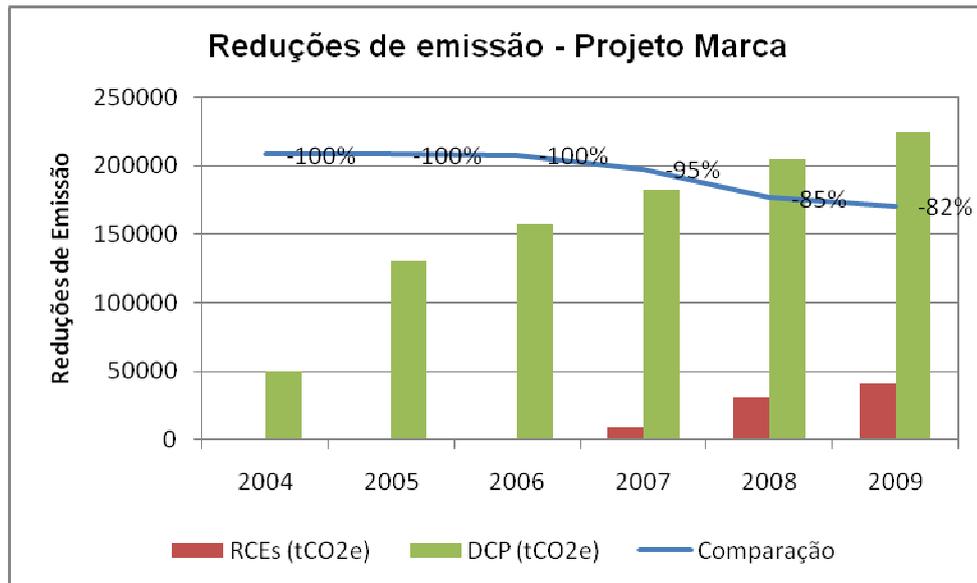


Figura 13 – Gráfico representando a evolução das reduções de emissão monitoradas e estimadas do Projeto de Energia de Gases de Aterro Sanitário da Empresa MARCA.

4.5 Projeto Vega Bahia - Projeto de Gás de Aterro de Salvador da Bahia

Localizado na cidade de Salvador, Bahia, Brasil. O projeto envolve a instalação de equipamentos para captura e destruição de metano com capacidade de processar 6250 m³/h (com possibilidade de expansão para até 46250 m³/h em 2020). O Aterro Metropolitano do Centro ou Aterro de Salvador, como é conhecido, situa-se na área metropolitana de Salvador e possui uma área total de 2.500.000 m², com 600.000 m² reservados para deposição de resíduos. O aterro possui uma capacidade total de 18.000.000 m³ e recebe aproximadamente 850.000 ton de resíduos domésticos por ano¹⁰.

A metodologia utilizada pelo projeto foi a AM0002, desenvolvida especificamente para o mesmo.

A seguinte fórmula foi utilizada para estimativa de emissão de metano:

$$CH_4_{projected,y} = k * L_0 * \sum_{t=0,y} WASTE_{contract,t} * e^{-k(t-y)}$$

Onde:

L_0 = taxa de geração de metano (Nm³/ton de resíduo)

k = taxa de decomposição

¹⁰ <http://cdm.unfccc.int/Projects/DB/DNV-CUK1117823353.4/view>

É uma equação simples, onde L_0 depende da fração orgânica do resíduo que entra no aterro e k depende da temperatura e umidade do resíduo. Entretanto, o cálculo para o projeto é realmente feito através do gás de aterro projetado para geração em determinado tempo de acordo com o contrato de concessão do aterro. O próprio contrato estima a geração de gás de aterro e o DCP apenas utilizou uma taxa de 50% de metano no gás de aterro projetado no contrato para obtenção das estimativas de geração de créditos de carbono.

Apesar de já haver vários eventos abertos na página da internet da CQNUMC sobre verificações deste projeto (ou seja, várias auditorias realizadas para emissão de créditos de carbono), apenas uma emissão foi bem sucedida e já teve fim, envolvendo o ano de 2004. Como pode ser visto na Tabela 15, onde são apresentados os dados monitorados (representados pela sigla “RCEs”) comparados com os dados estimados (representados pela sigla “DCP”), os demais pedidos de emissão ainda não foram concluídos.

Tabela 15 – Informações sobre RCEs do Projeto Vega Bahia - Projeto de Gás de Aterro de Salvador da Bahia.

Ano	RCEs (tCO ₂ e)	DCP (tCO ₂ e)	Status	Quando
2004	45988	564310	Emitido	30/10/2005
2005	269863	614392	Aguardando	25/10/2010
2006	525781	663335	Aguardando	25/10/2010
2007	423841	716442	Aguardando	25/10/2010
2008	544764	741768	Aguardando	25/10/2010
2009	472659	786263	Aguardando	25/10/2010

Fonte: Informações públicas disponível nos históricos de monitoramento do projeto no website do Conselho Executivo do MDL da CQNUMC.

Como o segundo pedido de emissão (envolvendo o ano de 2005) possui um relatório na página da internet datado de 2006 e não possui ainda desfecho para este pedido, leva-se a acreditar que haja algum problema para obtenção dos créditos. Utilizando-se dos números constantes nos relatórios de monitoramento, pôde-se observar que a eficiência de geração de créditos de carbono não está alta, possuindo diferença média em torno de 46%. A Figura 14 ilustra esta eficiência.

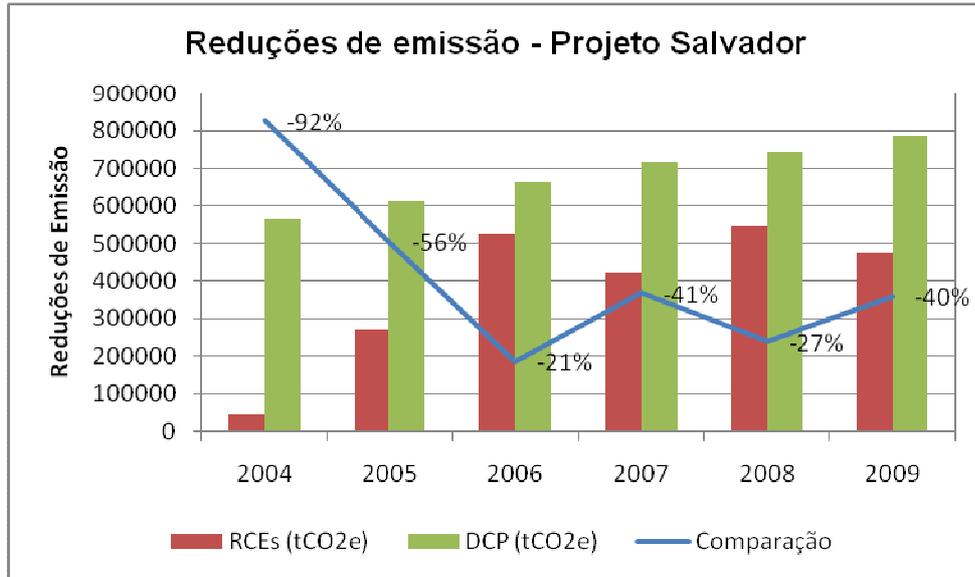


Figura 14 – Gráfico representando a evolução das reduções de emissão monitoradas e estimadas do Projeto Vega Bahia - Projeto de Gás de Aterro de Salvador da Bahia.

4.6 Projeto Bandeirantes de gás de Aterro e Geração de Energia em São Paulo, Brasil

O aterro localiza-se em São Paulo, São Paulo, Brasil. O objetivo do projeto é explorar o gás produzido no Aterro Bandeirantes, utilizando-o para geração de eletricidade. De acordo com o DCP registrado, o aterro possui uma nota 8,8 de 10 em uma pontuação da CETESB (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental), a autoridade ambiental do Estado de São Paulo, mostrando que as condições de operação são adequadas¹¹.

A geração de energia envolve a instalação de 24 motores, totalizando 22MW de capacidade instalada. O aterro cobre uma área de 1.350.000 m² e é dividido em 5 células, com três delas tendo operado de 1978 a 1995 e as duas restantes entre 1996 e 2006. Portanto, o projeto é dividido em duas fases: a captura do biogás das três células antigas e, posteriormente, das duas células mais novas, com início previsto para 2005. Nos últimos anos antes do fechamento do aterro, é previsto o recebimento de aproximadamente 1.850.000 toneladas de resíduo por ano.

A metodologia utilizada para este projeto foi a ACM0001 versão 2, com a ACM0002 sendo utilizada para a parcela de geração de eletricidade renovável. Este

¹¹ <http://cdm.unfccc.int/Projects/DB/DNV-CUK1134130255.56/view>

projeto utiliza exatamente a mesma equação utilizada pelo projeto Onyx, conforme abaixo:

$$Q_x = L_0 R (e^{-kc} - e^{-kt})$$

Onde:

Q = Metano gerado no ano atual (ton/ano)

L_0 = Potencial de geração de metano (ton/ton de rejeito).

R = Taxa de aceitação de resíduo média anual durante o tempo de operação (ton/ano)

k = constante de geração de metano (1/ano).

t = tempo desde a abertura do aterro (anos)

c = tempo desde o fechamento do aterro (anos)

Entretanto, é utilizada uma fórmula um pouco modificada para levar em conta variações na disposição do resíduo:

$$Q_{T,x} = k * R_x * L_0 * e^{-k(T-x)}$$

Onde:

$Q_{T,x}$ = Quantidade de metano gerada no ano atual (T) pelo resíduo R_x

x = Ano de entrada do resíduo

R_x = Quantidade de resíduo disposta no ano x (ton)

T = Ano atual

Com exceção da primeira emissão de créditos, todas as subseqüentes foram realizadas envolvendo um período relativamente curto por verificação, apresentando períodos de 6, 3 e até 2 meses. Como o projeto é bem grande, viabiliza a periodicidade curta de cada verificação. Isto resulta em uma quantidade relativamente grande de emissões, conforme pode ser visto na Tabela 16, onde são apresentados os dados monitorados (representados pela sigla "RCEs") comparados com os dados estimados (representados pela sigla "DCP").

Tabela 16 – Informações sobre RCEs do Projeto Bandeirantes de gás de Aterro e Geração de Energia em São Paulo, Brasil

Ano	RCEs (tCO ₂ e)	DCP (tCO ₂ e)	Status	Quando
2004	530836	748624	Emitido	18/04/2007
2005	530836	1086919	Emitido	18/04/2007
2006	608635	1364960	Emitido	18/04/2007
			Emitido	27/12/2006
			Emitido	25/05/2007
2007	726764	1236153	Emitido	14/12/2007
			Emitido	13/02/2008
			Emitido	21/04/2008
2008	599052	1120186	Emitido	07/08/2008
			Emitido	27/10/2008
			Emitido	28/11/2008
			Emitido	26/06/2009
			Emitido	20/07/2009
2009	366875	1015780	Emitido	20/07/2009
			Emitido	17/12/2009
			Emitido*	14/04/2010
			Aguardando	28/10/2010

* até Setembro.

Fonte: Informações públicas disponível nos históricos de monitoramento do projeto no website do Conselho Executivo do MDL da CQNUMC.

Entretanto, apesar de utilizar esta diferente estratégia que funciona muito bem para manter o fluxo de emissão de créditos, a eficiência de emissão não foi boa, apresentando uma média de aproximadamente 48% de diferença, como pode ser visto na Figura 15.

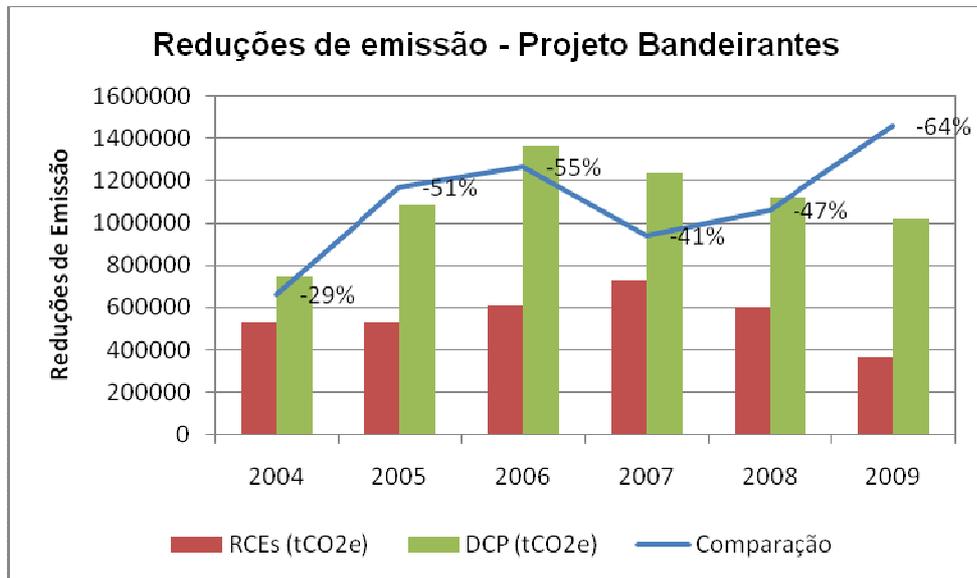


Figura 15 – Gráfico representando a evolução das reduções de emissão monitoradas e estimadas do Projeto Bandeirantes de gás de Aterro e Geração de Energia em São Paulo, Brasil.

4.7 Projeto de Recuperação de Gás de Aterro ESTRE - Paulínia (PROGAE)

O projeto localiza-se na cidade de Paulínia, São Paulo, Brasil. Envolve a instalação de um sistema ativo de recuperação de gás e um queimador de gás de aterro. O CGR Paulínia possui área de 705.000 m² e capacidade para 6.500.000 toneladas de resíduo. A classificação da CETESB fornece uma nota de 9,8 em 10 para este aterro¹².

O aterro localiza-se entre as cidades de São Paulo e Campinas. Segundo o DCP, irá receber aproximadamente 2.500 toneladas de resíduo por dia, com planos de expansão para dobrar sua capacidade.

A metodologia utilizada para o projeto foi a AM0003 versão 2, mesma metodologia utilizada pelos aterros Marca e NovaGerar. Este projeto utiliza, para realização de estimativas, a fórmula abaixo já bastante citada neste trabalho:

$$Q_x = L_0 R (e^{-kc} - e^{-kt})$$

¹² <http://cdm.unfccc.int/Projects/DB/DNV-CUK1134989999.25/view>

A descrição da fórmula é rigorosamente igual à encontrada para o projeto Bandeirantes (item 4.6).

Este projeto utiliza também a estratégia de realizar verificações sobre um período curto de monitoramento, não passando de 6 meses geralmente. Como pode ser visto na Tabela 17, onde são apresentados os dados monitorados (representados pela sigla “RCEs”) comparados com os dados estimados (representados pela sigla “DCP”), já houve 7 pedidos de emissão de créditos para este projeto.

Tabela 17 – Informações sobre RCEs do Projeto de Recuperação de Gás de Aterro ESTRE - Paulínia (PROGAE).

Ano	RCEs (tCO ₂ e)	DCP (tCO ₂ e)	Status	Quando
2006	45104	169747	Emitido	10/05/2007
2007	174029	194131	Emitido	12/02/2007
			Emitido	27/06/2008
2008	231740	215757	Emitido	27/06/2008
			Emitido	01/07/2009
			Emitido	30/07/2009
2009	266773	234937	Emitido	30/07/2009
			Emitido	11/11/2009
			Aguardando	13/11/2010
2010*	351155	251949	Aguardando	13/11/2010

* até Outubro.

Fonte: Informações públicas disponíveis nos históricos de monitoramento do projeto no website do Conselho Executivo do MDL da CQNUMC.

No Brasil, este é o projeto que apresenta os melhores resultados em relação à estimativa. A eficiência do projeto vem aumentando bastante desde a primeira emissão, com uma acentuada queda na diferença entre valores estimados e realmente monitorados (Figura 16). Para 2010, está sendo pedido até outubro um valor quase 40% superior às estimativas. Isto culmina com uma média de emissão de apenas 5% abaixo do estimado, podendo chegar a aproximadamente 12% acima do estimado se excluída a primeira emissão.

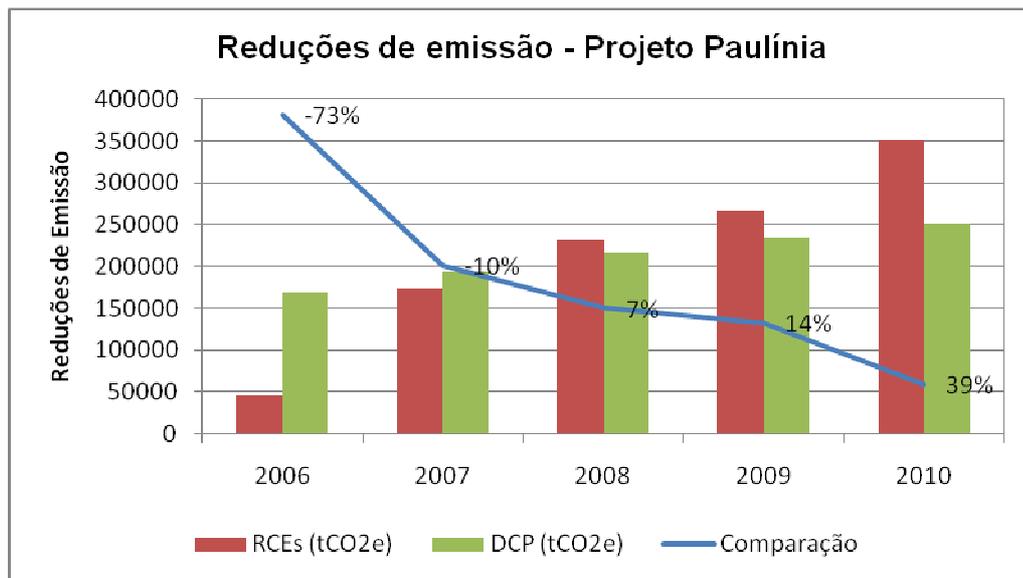


Figura 16 – Gráfico representando a evolução das reduções de emissão monitoradas e estimadas do Projeto de Recuperação de Gás de Aterro ESTRE - Paulínia (PROGAE).

Entretanto, conforme explicado no relatório de monitoramento da terceira verificação, foi instalado um queimador adicional para o gás de aterro do projeto (além dos dois já existente, totalizando três queimadores), resultando em potencial para queimar 6.500 Nm³/h. Já no relatório de monitoramento da quinta verificação é explicado que houve uma duplicação na quantidade de resíduos por dia depositados no aterro, aumentando de 2.500 ton/dia (valor esperado) para 5.000 ton/dia.

4.8 Projeto de Gás de Aterro CDR Pedreira (PROGAEP)

Mais um projeto localizado na cidade de São Paulo, São Paulo, Brasil. Consiste em queima do gás de aterro produzido no Centro de Disposição de Resíduos (CDR) Pedreira. O aterro utilizou uma região de mineração para ser instalado, e possui uma área total de 562.052 m² e capacidade para receber 16,7 milhões de toneladas de resíduo. Estimava-se o recebimento de aproximadamente 360 ton/dia na época do registro¹³.

O projeto não prevê produção de eletricidade. Utilizou a metodologia ACM0001 versão 5 para realização de cálculos e descrição dos demais detalhes do

¹³ <http://cdm.unfccc.int/Projects/DB/DNV-CUK1179394615.79/view>

projeto. O projeto Pedreira utiliza a fórmula baseada no IPCC 1996, mas com uma representação um pouco diferente, conforme pode ser visto abaixo:

$$LFG_{\text{flared},y} = CE \times \frac{k \times R_y \times L_0 \times \sum_{i=y}^T \sum_{j=y}^i [e^{-k(i-j)}]}{F}$$

Onde:

- $LFG_{\text{flared},y}$ = Quantidade de biogás queimada no ano y
 CE = Eficiência de coleta do gás (%)
 k = Constante de decomposição (1/ano)
 R_y = Quantidade de resíduo disposta no ano y (kg)
 L_0 = Potencial de geração de metano ($m^3_{CH_4}/mg_{\text{resíduo}}$)
 T = Ano atual
 y = Ano de disposição do resíduo
 F = Fração de metano no biogás (%)

Entretanto, apesar de ser mencionado no DCP que o IPCC 1996 foi utilizado como base, a fórmula não está bem descrita, dificultando sua reprodução. Este projeto possui apenas uma emissão já certificada. Além desta, possui ainda outras duas verificações em aberto, como pode ser visto na Tabela 18, , onde são apresentados os dados monitorados (representados pela sigla “RCEs”) comparados com os dados estimados (representados pela sigla “DCP”).

Tabela 18 – Informações sobre RCEs do Projeto de Gás de Aterro CDR Pedreira (PROGAEP).

Ano	RCEs (tCO ₂ e)	DCP (tCO ₂ e)	Status	Quando
2008	119991	119338	Emitido	18/12/2008
			Aguardando	13/11/2010
2009	180504	149587	Aguardando	13/11/2010
2010*	92847	70833	Aguardando	13/11/2010

* até Maio.

Fonte: Informações públicas disponíveis nos históricos de monitoramento do projeto no website do Conselho Executivo do MDL da CQNUMC.

Este é o único projeto de todos os avaliados que a estimativa ficou sempre abaixo dos dados monitorados. Ou seja, os créditos de carbono para este projeto

foram sempre acima do estimado. Como mostra a Figura 17, desde a primeira verificação a comparação entre redução de emissão monitorada e redução de emissão estimada resulta em um maior número monitorado (na primeira verificação, 1%). Isto resulta em uma média de redução de emissão monitorada aproximadamente 17% acima do valor estimado, contando toda a informação disponível.

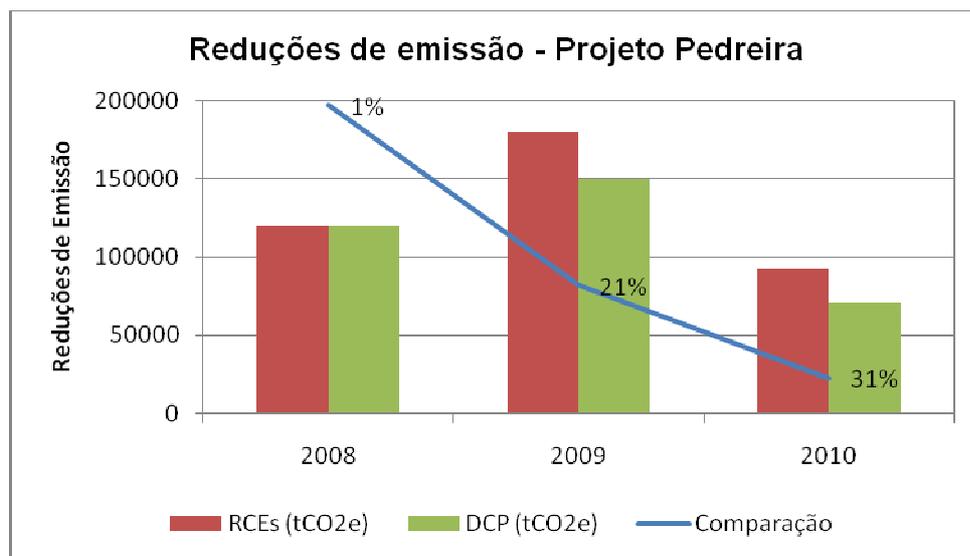


Figura 17 – Gráfico representando a evolução das reduções de emissão monitoradas e estimadas do Projeto de Gás de Aterro CDR Pedreira (PROGAEP).

Este resultado bastante positivo do projeto é consequência de um significativo aumento no recebimento de resíduos. O cálculo de estimativa do projeto foi feito com uma quantidade de recebimento de resíduos variável, mas alcançando no máximo menos de 3.500 ton/dia de resíduo. Entretanto, de acordo com o relatório de monitoramento para a terceira verificação, atualmente o aterro recebe aproximadamente 15.000 ton/dia de resíduo. Isto se deu devido ao acidente com o aterro São João (O Globo, 2007), que estava no fim de sua vida útil e foi fechado permanentemente.

4.9 Projeto de Redução de Emissões de Biogás, Caieiras - Brasil

Projeto desenvolvido no aterro localizado no Município de Caieiras, zona metropolitana de São Paulo, SP. envolve a instalação de equipamento de coleta e destruição do metano com capacidade de 200 m³/h em 2005, expandindo sua

capacidade para 48.000 m³/h em 2024. Este equipamento consistirá em tubos conectados aos poços de drenagem levando a queimadores enclausurados capazes de promover a completa queima e destruição do metano. O projeto também propõe a aumentar o volume de disposição do CTR Caieiras pela otimização da decomposição do resíduo, por conseguinte, aumentando a vida útil do aterro e postergando a necessidade de uma nova área. O CTR tem uma área total de 3.500.000 m², sendo que 1.620.000 m² será preservado formando uma área de transição, conforme legislação municipal. Parte da área está no município de Franco da Rocha, na qual não será utilizada para atividades do CTR, completando a área a ser preservada. Estima-se o recebimento aproximado de 1.460.000 toneladas de resíduos por ano. A capacidade total de disposição de resíduos no aterro é 60.000.000 toneladas e não é esperado o fechamento do mesmo antes de 2030¹⁴.

O projeto utiliza a metodologia ACM0001 versão 2. É descrito no DCP que havia possibilidade da venda do biogás para indústrias locais. As premissas utilizadas para estimar o metano a ser destruído no decorrer do projeto seguem descritas abaixo.

Foi usado o MCF para aterro bem gerenciado, com valor de 1. Medições *in loco* mostraram que o biogás possui 40 a 50% de CH₄, resultando em um valor de , 50% para o parâmetro F. Além disso, uma meia vida de 9 anos foi escolhida, resultando em um valor para k de 0,08. Para L0 foi calculado um valor de 0,083 Gg CH₄/Gg de resíduo ou 116 m³ CH₄/ton de resíduo.

Mais um projeto que possui apenas uma emissão de créditos finalizada, apesar de possuir mais três já sendo processadas como pode ser visto na Tabela 19, onde são apresentados os dados monitorados (representados pela sigla “RCEs”) comparados com os dados estimados (representados pela sigla “DCP”).

¹⁴ <http://cdm.unfccc.int/Projects/DB/DNV-CUK1134509951.62/view>

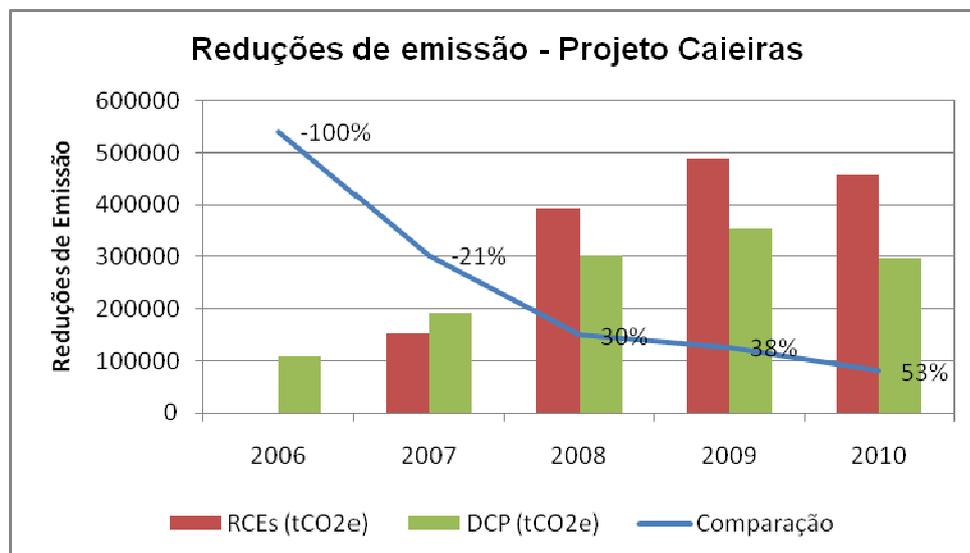
Tabela 19 – Informações sobre RCEs do Projeto Redução de Emissões de Biogás, Caieiras - Brasil.

Ano	RCEs (tCO ₂ e)	DCP (tCO ₂ e)	Status	Quando
2006	0	108522	Emitido	10/04/2008
2007	152521	192974	Emitido Aguardando	10/04/2008 13/11/2010
2008	392634	301427	Aguardando	13/11/2010
2009	488353	353636	Aguardando	13/11/2010
2010	455759	297571	Aguardando*	13/11/2010

* até Setembro

Fonte: Informações públicas disponíveis nos históricos de monitoramento do projeto no website do Conselho Executivo do MDL da CQNUMC.

O aproveitamento de emissão de créditos deste projeto é muito bom. A partir do terceiro ano de operação do projeto a geração de créditos esteve sempre acima do esperado. Isto resultou em uma diferença média (excluindo-se o primeiro ano) entre metano emitido e metano estimado de 25% acima do esperado. A evolução destes números por ano pode ser vista na Figura 18.

**Figura 18** – Gráfico representando a evolução das reduções de emissão monitoradas e estimadas do Projeto de Gás de Aterro CDR Pedreira (PROGAEP).

O motivo do baixo aproveitamento na primeira emissão de créditos (envolvendo o primeiro ano de operação e parte do segundo) foi devido ao atraso nas obras de instalação do projeto, que só tiveram início real de operação em 2007. Neste primeiro ano efetivo de operação ocorreram vários problemas operacionais, o

que também é esperado para este tipo de projeto. Entretanto, a partir de 2008 os problemas operacionais ficaram dentro da normalidade.

Aparentemente este projeto é um bom exemplo de estimativa bem feita, já que não pode ser notada nenhuma alteração na operação atual do aterro em relação ao previsto no DCP. Ou seja, se o aterro está operando como esperado e a geração de créditos está próxima da estimada, considera-se um caso de sucesso.

4.10 Resumo comparativo entre os casos citados

Como claramente pôde ser notado em quase todos os casos mencionados no presente trabalho, apenas quando houve algum fator externo a previsão foi próxima da realidade. A Tabela 20 fornece informações comparativas entre os aterros.

Os três únicos aterros que apresentaram performance similar à esperada foram os de Paulínia, Pedreira e Caieiras. Os dois primeiros exatamente pelo fato de estarem recebendo uma quantidade de resíduos muito maior do que o valor utilizado para elaboração do cálculo. Como há pouca semelhança entre estes dois aterros (utilizaram metodologias diferentes para os cálculos estimados, foram registrados em períodos diferentes e possuem tamanhos diferentes), é muito provável que apenas este fator externo tenha sido o causador deste resultado. Caieiras parece ser um caso a parte, já que houve problemas na fase inicial do projeto mas aparentemente os últimos anos tem mostrado uma geração de metano muito próxima da estimada.

Em seguida, o aterro de Tremembé (Onyx) foi o que apresentou historicamente o melhor desempenho de emissões. O DCP disponível não estabelece claramente como foi realizada a estimativa de redução de emissões, mas dá a entender que valores de campo, obtidos através de experiências anteriores com este aterro, foram utilizados na fórmula de decaimento de primeira ordem para obtenção do número estimado. Além disto, o projeto de créditos de carbono envolve duas áreas do aterro e uma delas já estava fechada na época de elaboração do DCP, reforçando a possibilidade de utilização de informações reais do aterro.

O próximo bloco envolve os aterros de Salvador, Bandeirantes e Bragança Paulista (Embralixo). Todos estes aterros mostraram performance próxima de 50%, o que os caracteriza como apresentando resultados médios para bom. Os aterros

envolvidos neste bloco já começam a apresentar, além de problemas de estimativas, algumas questões técnicas e/ou operacionais.

Para o aterro de Salvador, nota-se uma geração de créditos extremamente baixa para o primeiro ano do projeto. De acordo com o Relatório de Monitoramento do primeiro período de monitoramento¹⁵, houve inúmeros problemas tanto com o monitoramento quanto na operação dos equipamentos envolvidos na queima. No aterro Bandeirantes ocorreu um problema com o monitoramento do projeto que lhe custou quase 40.000 RCEs na primeira emissão, mas isto não é suficiente para explicar as diferenças na estimativa, levando a crer que os cálculos estimados sejam o principal fator para a diferença. O projeto de MDL de Embralixo ainda não possui nenhum crédito de carbono emitido, já que o primeiro pedido de emissão de créditos está sob revisão no Conselho Executivo do MDL¹⁶ devido a problemas de monitoramento da eficiência do queimador; entretanto, é possível estabelecer claramente que a diferença entre estimativas e dados reais se deu devido a três fatores: vazão do gás menor do que a esperada, concentração de metano menor do que a esperada e também devido a problemas técnicos/operacionais¹⁷.

No bloco com a maior diferença encontram-se os aterros de Adrianópolis, Marambaia (estes dois juntos formando o projeto de NovaGerar) e Cariacica (Marca). Todos apresentaram uma média de diferença histórica entre estimativa e realidade superior a 70%. O aterro Marambaia é um caso a parte, pois foi concebido como um lixão, totalmente sem planejamento, e a captura de gás deste “aterro controlado” é um constante desafio e não poderia obedecer aos mesmos modelos de estimativa para aterros sanitários. Tanto Adrianópolis quanto Marca apresentaram inúmeros problemas operacionais no início de sua operação, resultando em perda de aproximadamente três anos. Porém, o valor apresentado na Tabela 20 leva em conta este fato e utiliza como base apenas o período nos quais existe informação disponível. Isto é um indicador de que o principal fator que influencia a baixa eficiência destes aterros é realmente a estimativa realizada.

A média de diferença encontrada nos nove aterros investigados, que se encontram desenvolvendo projetos de MDL, foi de 39%, significando que a estimativa ficou em média 39% acima dos dados efetivamente observados ou

¹⁵ <http://cdm.unfccc.int/UserManagement/FileStorage/MY4VC2XN2MD05GF95ESL5GLZ82NHBN>

¹⁶ <http://cdm.unfccc.int/Projects/DB/DNV-CUK1182151832.44/iProcess/LRQA%20Ltd1260370846.43/view>

¹⁷ <http://cdm.unfccc.int/UserManagement/FileStorage/AT0FR2WGDNJMSY9BK4V67H3PILX1OQ>

monitorados. Este valor é inferior à média para todos os projetos deste tipo no Brasil, que é de 43%. Se observados todos os projetos de MDL do mundo, a média continua próxima da brasileira, em torno de 45% (PNUMA, 2010).

De acordo com Stege (2009), utilizando dados de projetos de MDL desde 2003 até 2009, a performance média encontrada foi de 50,2% para todos os projetos do mundo e 59% para o Brasil¹⁸.

¹⁸ A performance média obtida para este trabalho foi realizada através da média das performances de emissão de créditos constante em PNUMA (2010). A diferença observada entre o presente estudo e o trabalho desenvolvido por Stege (2009) deve-se a possível diferença metodológica entre os dois trabalhos.

Tabela 20 – Comparação entre as informações básicas utilizadas para realização de estimativa nos aterros citados e seus resultados.

Informações	Símbolo	Unidade	Embraliço	Marambaia	Adrianópolis	Onyx	Bandeirantes	Salvador	Marca	Paulínia	Pedreira	Caieiras
Metodologia	-	-	ACM0001	AM0003	AM0003	AM0011	ACM0001	ÃM0002	AM0003	AM0003	ACM0001	ACM0001
Versão	-	-	5	1	1	1	2	1	3	3	5	2
Eletricidade	-	Sim/Não	Não	Não	Não	Não	Sim	Não	Sim	Não	Não	Não
Data de Registro	-	Data	15/10/2007	18/11/2004	18/11/2004	24/11/2005	20/02/2006	15/08/2005	23/01/2006	03/03/2006	12/02/2008	09/03/2006
Início do Período de Obtenção de Créditos	-	Data	01/01/2008	01/07/2004	01/07/2004	01/01/2003	23/12/2003	01/01/2004	01/07/2004	14/09/2006	12/02/2008	31/03/2006
Período emitido ou em fase de emissão	-	Meses	22	72	72	60	82	72	49	50	28	54
Quantidade média anual esperada de créditos	ER _y	tCO _{2e} /ano	66.399	104.676	942.084	70.063	1.070.629	664.674	231.405	212.558	186.315	770.932
Tamanho Total do Aterro	-		145.224 m ²	n/a	1.200.000 m ²	2.550.000 m ³	1.350.000 m ²	600.000m ²		705.000 m ²	562.025m ²	60.000.000m ³
Taxa de deposição média de resíduos no aterro	-	ton/dia	144	330	2.000	493	5.068	2.329	1.000	1.637	360	4.000
Taxa de geração de CH ₄	k	1/ano	0,1	0,1	0,1	0,005 a 0,4	0,105	0,12	0,1	0,12	0,1	0,08
Potencial de geração de CH ₄	L ₀	m ³ CH ₄ /ton resíduo	117	112*	112*	100 a 200	77*	180	112*	80*	84*	116
Percentual de CH ₄ no gás	F	%	50	50	50	50	n/a	50	50	n/a	n/a	50
Eficiência de captura do gás	-	%	70	85	85	50 a 80	80	75 a 80	75	80	65	80
Diferença média entre emitido e estimado	-	%	-54%	-93%	-75%	-30%	-48%	-46%	-87%	-5%	17%	25%

* Valor convertido de outras unidades (“libra/pé cúbico” e “tonelada de metano/tonelada de resíduo”) para a unidade apresentada.

Fonte: DCPs disponíveis na página da internet do Conselho Executivo do MDL <http://cdm.unfccc.int>

4.11 Opiniões de especialistas

Foram consultados alguns profissionais cujos trabalhos são relacionados ao tema desta pesquisa, ou seja, que estejam atuando (ou atuaram) em projetos de aterros, que já tenham realizado estimativa de emissão de metano e que tenham intimidade com projetos de MDL. Todas as entrevistas foram obtidas no ano de 2010 e são opiniões particulares dos entrevistados, ou seja, as opiniões aqui expressas não podem ser associadas a nenhuma das empresas ou instituições às quais são ligados os entrevistados. O questionário utilizado para obtenção das respostas pode ser encontrado no Anexo I.

De acordo com Barbosa¹⁹ (comunicação pessoal), esta dificuldade de obtenção de valores existe não somente para fatores do modelo, mas também para informações básicas como composição gravimétrica dos resíduos, quantidade depositada e níveis de lixiviado no interior do aterro. Apesar de não serem todas estas variáveis diretamente ligadas com a estimativa de emissões, representa a falta de informações para o desenvolvimento regional de constantes de modelagem. Além disso, segundo Barbosa, os cálculos não levam em consideração os tempos de parada programada e problemas operacionais.

Para Ferrari²⁰ (comunicação pessoal), os parâmetros utilizados nos cálculos são os principais problemas das estimativas, já que os fatores k e L_0 são parâmetros obtidos em laboratório, em condições regionais longe de serem as encontradas nos países em desenvolvimento e há dificuldade de aplicação destes fatores em escala real.

Nascimento²¹ (comunicação pessoal) ressalta que para aterros antigos não havia o cuidado de se provisionar a captura de metano – e este é o caso de vários aterros em países em desenvolvimento. Devido a isso, as drenagens possuem deficiências e a camada de cobertura não possui a qualidade e espessura

¹⁹ Eng. Nuno Barbosa é Engenheiro Químico, Diretor Técnico da Araúna (empresa especializada no desenvolvimento de projetos de créditos de carbono em aterros sanitários), trabalhou em mais de 40 aterros em diversos países do mundo, desde 2001. Diretamente responsável pelo Projeto do aterro de Bragança Paulista.

²⁰ MSc Alexandre Ferrari é Engenheiro Civil, mestre em Geotecnia e Coordenador de destinação final e meio ambiente na Vega Engenharia Ambiental S.A. Trabalha na área desde 1996 e é diretamente responsável pelo Projeto do aterro de Salvador.

²¹ Eng. Tiago Nascimento é Engenheiro Ambiental e Gerente de produção na Biogás Energia Ambiental S.A. Possui cinco anos de experiência em projetos de MDL em aterros. Diretamente responsável pelo Projeto do aterro Bandeirantes.

adequada. Ainda, segundo Nascimento, os modelos são muito generalistas e levam em consideração poucos parâmetros para previsão de emissão. Problemas operacionais também foram apontados como tendo grande influência na geração de metano: mudança da frente de lixo, acúmulo de lixiviado nos poços, recalque do aterro provocando rompimento de poços e acumulando condensado na tubulação, e formação de trincas que comprometem a eficiência do sistema.

Já De Freitas²² (comunicação pessoal) comenta que, como os projetos de MDL no Brasil são relativamente novos e vários são desenvolvidos em aterros bem antigos, praticamente não existiam pesquisas de taxas de emissão de metano naquela época. Para o aterro no qual De Freitas trabalha, os valores utilizados para k e L_0 foram os de outros aterros. Isto é agravado pelo grande número de variáveis, desde composição de resíduos até eficiência de captação, que é praticamente impossível ser 100% corretos principalmente na época pré-operacional. Neste mesmo aterro foi realizado um estudo de fuga de gases por sua superfície para verificar os valores de eficiência de captação do sistema. Entretanto, como são feitas medições pontuais e os resultados extrapolados para todo o aterro, há indicações de que este estudo também não seja 100% confiável.

Candiani²³ (comunicação pessoal), por estar atualmente envolvido em um estudo de emissão de metano em uma célula experimental de um aterro, aponta que também existem dificuldades na estimativa de emissões mesmo através de experimentos. A principal é a dificuldade na escolha da metodologia de trabalho, já que são muitos métodos com diferentes equipamentos de medição. A falta de padronização em relação às medições e modelos de estimativas deixa os experimentos sem parâmetro de análise e comparação. Para o aterro onde trabalha, Candiani afirma que foram realizadas duas medições de escape de metano e uma modelagem baseada nos modelos FOD do IPCC e EPA. As diferenças encontradas foram basicamente em função dos parâmetros do modelo (L_0 e k). Dois outros fatores que também exercem influência considerável são: eficiência do sistema de captação, principalmente em aterros já em pleno funcionamento, pois existe mudança de tubulações frequentes em função da operação regular de deposição do

²² Eng. Fernando de Freitas é Engenheiro civil, Pós-graduado em gestão ambiental e Coordenador operacional da Essencis soluções ambientais. Possui cinco anos de experiência na área de captura e queima de biogás, sendo diretamente responsável pelo Projeto do aterro de Caieiras.

²³ MSc Giovano Candiani é Ecólogo, Mestre em análise ambiental, Doutorando em energia e Analista ambiental na Essencis soluções ambientais. Diretamente responsável pelo Projeto do aterro de Caieiras há 10 anos.

aterro; e também os parâmetros climáticos, que são importantes para a determinação da constante de biodegradação e nem sempre são considerados da forma correta nos modelos.

Ballik²⁴ (comunicação pessoal) ressalta que os cálculos utilizados para estimativas de gás de aterro são concebidos para satisfazer um requisito legal e não para utilização comercial (como no MDL). Não há, portanto, a necessidade do mesmo cuidado com a utilização de parâmetros que reflitam a realidade do aterro. Os principais problemas encontrados por Ballik para elaboração de estimativas foram: incerteza da futura composição e quantidade do resíduo, bem como de seu conteúdo de umidade, incerteza do quanto a impermeabilização irá funcionar. Além disso, nos modelos não é levado em consideração a geometria da célula, se há algum processamento prévio do resíduo e as particularidades na construção/operação em países em desenvolvimento.

Bogner²⁵ (comunicação pessoal) comenta que vários projetos de MDL envolvem uma “curva de aprendizado” dos que estão desenvolvendo os projetos, podendo existir problemas técnicos com o desenho e operação dos projetos. Além disso, afirma que não deveriam ser depositadas tantas esperanças em um modelo de Decaimento de Primeira Ordem principalmente devido a:

- a. O modelo FOD ser apenas um cálculo teórico baseado em informações (frequentemente imperfeitas) sobre o resíduo no local. Além disso, assume que a composição de resíduos no aterro é homogênea, com taxa de decomposição também homogênea, como se fosse um digestor anaeróbico homogeneizado;
- b. Vários desenvolvedores de projetos MDL utilizam valores padrão para L_0 e k , resultando em estimativas de produção de gás muito otimistas.

²⁴ MSc Ina Ballik é Engenheira civil (foco em gerenciamento de resíduos e engenharia ambiental) e Gerente de projetos sênior na EcoSecurities Group plc. Trabalha com projetos de MDL em aterros há mais de 5 anos, tendo experiência com mais de 20 aterros em diversos países.

²⁵ PhD Jean Bogner é presidente da Landfills +, Inc., professora e pesquisadora da Universidade de Illinois (Chicago, Estados Unidos) e coordenadora do capítulo 10 sobre Resíduos do 4º relatório de avaliação do grupo de trabalho III – mitigação de mudanças climáticas – do IPCC (IPCC, 2007).

5 CONCLUSÕES

Os resultados das estimativas de emissão de metano em aterros sanitários em projetos de MDL estão longe de ser satisfatórios. A perda de credibilidade deste tipo de projeto é uma consequência natural deste problema. Porém as discrepâncias são relativamente esperadas devido à forma que se realiza os cálculos preliminares (ex-ante). Para cálculos ex-ante em projetos de aterro no MDL, por exemplo, é recomendada a utilização de valores regionais na fórmula ao invés de utilizar um valor padrão do IPCC. Entretanto os valores regionais para países em desenvolvimento raramente estão disponíveis e a pesquisa de tais valores representa custo adicional para o desenvolvedor do projeto. Isto resulta, invariavelmente, na utilização dos valores padrão para realização dos cálculos, com consequente superestimação.

Além de falhas de modelagem, o padrão operacional dos aterros e as falhas de equipamentos também necessitam ser levados em consideração. Metade dos especialistas consultados apontam problemas operacionais diversos como principais contribuintes da diferença entre estimado e real. Falta de informação sobre níveis de lixiviado no interior do aterro (com possível acúmulo de lixiviado nos poços), deficiências na drenagem (recalque do aterro provocando rompimento de poços e acumulando condensado na tubulação, e formação de trincas que comprometem a eficiência do sistema) e na camada de cobertura são exemplos de problemas mencionados.

A umidade existente no resíduo influencia decisivamente na geração de metano. Manter uma umidade ótima e relativamente constante é um desafio que significa estar próximo ou bem distante da curva de geração de metano estimada através de um modelo matemático. Com uma velocidade alta de geração de metano, a maior parte do mesmo pode ser liberada antes de ser capturada. No caso de uma velocidade baixa, a quantidade de metano gerada pode ficar sempre abaixo do esperado. Em ambos os casos irá haver uma superestimação ocasionada pelo modelo. O sistema instalado para captação do gás frequentemente deixa de coletar todo o gás produzido devido a inúmeros fatores, o que também contribui para os números de metano capturado sendo abaixo do esperado. Em todos estes casos, além de haver uma geração de redução de emissão (e conseqüentemente receita)

abaixo do esperado, há ainda o problema de estar emitindo metano para a atmosfera em um tipo de projeto em que não deveria haver esta prática. O combate ao aquecimento global, função principal deste tipo de iniciativa, pode não atingir totalmente o seu potencial.

Entretanto, de acordo com o apresentado neste trabalho, os problemas do modelo são a principal causa da superestimação de geração de metano. Todos os especialistas consultados apontam os dados de entrada na fórmula responsável pela estimativa como possuindo papel fundamental no fracasso do resultado final. Assim como várias pesquisas citadas no decorrer do trabalho, os fatores k e L_0 são apontados como os principais vilões da estimativa. Quando os números sugeridos pela fórmula são aplicados ao invés de números reais ou pesquisados através de experimentos realizados no local do aterro, há divergências bastante grandes. Em média, o número real é aproximadamente 50% abaixo do estimado.

O desenvolvimento de modelos regionais, que considerem as particularidades de cada local, é primordial para o avanço na quantidade e qualidade de projetos de redução de emissão de metano em aterros sanitários. Informações como temperatura ambiental e composição do resíduo podem variar muito de uma região para outra e, devido a isso, a utilização de valores de entrada padrão no modelo precisa ser desencorajada.

O potencial de obtenção de receita para projetos de redução de emissão em aterros sanitários é grande e extremamente necessário não podendo ser esta tipologia de projeto relegada ao segundo plano como é atualmente. É altamente recomendável a realização de novas pesquisas para tanto atualizar os dados obtidos por este trabalho quanto na contribuição para evolução do modelo de estimativa, adaptando-o para a realidade brasileira. É urgentemente necessária a realização de mais pesquisas na área para serem estabelecidos valores regionais para principalmente k e L_0 .

REFERÊNCIAS

ABNT (2004). NBR 10004: Resíduos sólidos, Classificação. Norma brasileira elaborada pela Comissão de Estudo Especial Temporária de Resíduos Sólidos (CEET) da Associação brasileira de Normas Técnicas (ABNT) baseada no CFR, Title 40, Protection of environmental, Part 260-265, Harzardous waste management.

ABRELPE (2010). Panorama dos resíduos sólidos no Brasil. Relatório preparado pela Associação brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) com dados obtidos em 2009. Disponível em: http://www.abrelpe.org.br/panorama_2009.php. Acesso em: Jan. 2011. 207p.

Ballik, I. (2008). CDM Landfill Gas Projects – A piece of cake? Retrospective on four years of LFG Project Implementation in the Carbon Market. CDM Investment Newsletter 1: 4-6. 3p.

Barlaz, M.A. (2006). Forest products decomposition in municipal solid waste landfills. Waste Management 26: 321-333. 13p.

Bayard, R., Benbelkacem, H., Zhang, Y., Gourdon, R. (2009). Impact of leachate injection modes on landfill gas production. Anais do Sardenia 2009 (décimo-segundo Simpósio Internacional em Gerenciamento de Resíduos e Aterro Sanitário), S. Margherita di Pula, Cagliari, Itália. 5-9 de Outubro de 2009. 11p.

Bilgili, M.S., Demir, A., Varank, G. (2009). Evaluation and modeling of biochemical methane potential (BMP) of landfilled solid waste: A pilot scale study. Bioresource Technology 100: 4976–4980.

Brasil (2010a). Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: http://legislacao.planalto.gov.br/legisla/legislacao.nsf/fraWeb?OpenFrameSeteFrame=frmWeb2eSrc=/legisla/legislacao.nsf/View_Identificacao/Lei%252012.305-2010%3FOpenDocument%26AutoFramed. Acesso em: 14 jan. 2011.

Brasil (2010b). Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010. Regulamenta a Lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências. Disponível em: <http://legislacao.planalto.gov.br/legisla/legislacao.nsf/fraWeb?OpenFrameSeteFrame=frmWeb2eSrc=/legisla/legislacao.nsf/b110756561cd26fd03256ff500612662/990f8adf7a792aad83257803003c8a15%3FOpenDocument%26AutoFramed>. Acesso em: 14 jan. 2011.

Budka, A., Aniel, D., Stoppioni, E. (2009). Leachate reinjection, LFG production, correlation and environmental balance for traditional and bioreactor landfill: results after five management years from a real case study. Anais do Sardenia 2009 (décimo-segundo Simpósio Internacional em Gerenciamento de Resíduos e Aterro Sanitário), S. Margherita di Pula, Cagliari, Itália. 5-9 de Outubro de 2009. 8p.

EB. (2008). Tool to determine methane emissions avoided from disposal of waste at a solid waste disposal site. Ferramenta metodológica preparada pelo Painel de metodologias do Conselho Executivo do MDL (EB). Disponível em: http://cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies/tools/am-tool-04-v5.pdf/history_view. Acesso em: jan. 2011. 9p.

EPA. (2006a). Global Mitigation of Non-CO2 Greenhouse gases. Relatório preparado pela Agência Ambiental dos Estados Unidos (USEPA), Departamento de Programas Atmosféricos. Disponível na página da internet <http://www.epa.gov/nonco2/econ-inv/international.html>. Acesso em Janeiro de 2011. 438p.

EPA. (2006b). Global Anthropogenic Non-CO2 Greenhouse Gas Emissions: 1990-2020. Relatório preparado pela Agência Ambiental dos Estados Unidos (USEPA), Departamento de Programas Atmosféricos. Disponível em: <http://www.epa.gov/nonco2/econ-inv/international.html>. Acesso em: jan. 2011. 274p.

EPA. (2010). Methane and Nitrous Oxide Emissions From Natural Sources. Relatório preparado pela Agência Ambiental dos Estados Unidos (USEPA), Departamento de Programas Atmosféricos. Disponível em: <http://www.epa.gov/methane/sources.html>. Acesso em: jan. 2011. 194p.

Feuillade, G., Parodi, A., Redon, E. (2009). Relation between organic matter properties in leachate and biogas production from MSW landfilling. Anais do Sardenia 2009 (décimo-segundo Simpósio Internacional em Gerenciamento de Resíduos e Aterro Sanitário), S. Margherita di Pula, Cagliari, Itália. 5-9 de Outubro de 2009. 10p.

Hamilton, K., Sjardin, M., Peters-Stanley, M., Marcello, T. (2010). Building bridges: State of the Voluntary Carbon Markets 2010. Relatório preparado pela Ecosystem Marketplace e pela Bloomberg New Energy Finance. 107p.

IBGE (2010). Pesquisa Nacional de Saneamento Básico. Levantamento nacional realizado pelo Instituto brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). 219p.

ICLEI (2009). Manual para aproveitamento do biogás: volume um, aterros sanitários. Governos Locais pela Sustentabilidade (ICLEI), Secretariado para América Latina e Caribe, Escritório de projetos no Brasil, São Paulo. 80p.

IPCC (1996). IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Manual de Referência. Capítulo 6: Resíduos. Versão revisada. 22p.

IPCC (2001). IPCC Third Assessment Report. Disponível em: http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/?src=/climate/ipcc_tar/. Acesso em: jan. 2011.

IPCC (2006). IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. v.5: Resíduos. Capítulo 3: Disposição de Resíduos Sólidos. 40p.

IPCC (2007). IPCC Fourth Assessment Report. Capítulo 10: Gerenciamento de Resíduos. Disponível em: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/en/ch10.html. Acesso em: jan. 2011. 34p.

Jung, M. (2006). Host country attractiveness for CDM non-sink projects. Energy Policy 34: 2173–2184.

Kwon, K.R., Cho, H.S., Kim, J.Y (2009). Two major issues on estimation of CERS potencial in CDM Landfill projects. XII International Waste Management and Landfill Symposium Proceedings. S. Margherita di Pula (Cagliari), Sardenia, Itália. 5 a 9 de Outubro de 2009.

Lo, S.-C., Ma, H.-W., Lo, S.-L. (2005). Quantifying and reducing uncertainty in life cycle assessment using the Bayesian Monte Carlo method. Science of the Total Environment 340: 23-33. 11p.

McDougall, J.R. (2009). Waste heterogeneity: an obstacle to models? Anais do Sardenia 2009 (décimo-segundo Simpósio Internacional em Gerenciamento de Resíduos e Aterro Sanitário), S. Margherita di Pula, Cagliari, Itália. 5-9 de Outubro de 2009. 11p.

MCT (1997). Elementos de um Protocolo para a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima propostos pelo Brasil em resposta ao Mandato de Berlim. Ministério da Ciência e Tecnologia do Brasil. Disponível em: http://www.mct.gov.br/upd_blob/6721.pdf. Acesso em: jan. 2011.

MCT (2010). Inventário brasileiro de Emissões Antrópicas por Fontes e Remoções por Sumidouros de Gases de Efeito Estufa não Controlados pelo Protocolo de Montreal. Parte 2. Segundo inventário preparado pelo Ministério de Ciência e Tecnologia do Brasil (MCT). 280p.

Meraz, R.-L., Vidales, A.-M., Domínguez, A. (2004). A fractal-like kinetics equation to calculate landfill methane production. *Fuel* 83: 73-80. 8p.

ONU (1998). Kyoto protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. Organizações das Nações Unidas, Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança Climática. Disponível em: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>. Acesso em: jan. 2011.

PNUMA (2010). CDM Pipeline Overview. Banco de dados preparado por Jørgen Fenhann, do UNEP Risø Centre. Programa das Nações Unidas sobre Meio Ambiente (PNUMA). Banco de dados atualizado até 01 de Março de 2010. Disponível em: <http://cdmpipeline.org/publications/CDMpipeline.xlsx>. O Globo (2007). Parte do principal lixão de SP desaba em São Mateus. O Globo, matéria publicada em 13 de Agosto de 2007. Disponível em: <http://oglobo.globo.com/sp/mat/2007/08/13/297248498.asp>. Acesso em: jan. 2011.

PWC (2010). Gestão da limpeza urbana: um investimento para o futuro das cidades. Relatório preparado pela PriceWaterhouse Coopers (PWC) para o Sindicato das Empresas de Limpeza Urbana no Estado de São Paulo (SELUR) e da Associação brasileira de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública (ABLP). Disponível em: http://www.selurb.com.br/upload/estudo_selur_2010.pdf. Acesso em: jan. 2011.

Sanphoti, N., Towprayoon, S., Chaiprasert, P., Nopharatana, A. (2006). The effects of leachate recirculation with supplemental water addition on methane production and waste decomposition in a simulated tropical landfill. *Journal of Environmental Management* 81: 27-35. 9p.

Spokas, K., Bogner, J., Chanton, J.P., Morcet, M., Aran, C., Graff, C., Moreau-Le Golvan, Y., Hebe, I. (2006). Methane mass balance at three landfill sites: What is the efficiency of capture by gas collection systems? *Waste Management* 26: 516-525. 10p.

Spokas, K., Bogner, J., Chanton, J., Franco, G. (2009). Anais do Sardenia 2009 (décimo-segundo Simpósio Internacional em Gerenciamento de Resíduos e Aterro Sanitário), S. Margherita di Pula, Cagliari, Itália. 5-9 de Outubro de 2009. 13p.

Stege, G.A. (2009). Methane emission reductions achieved by landfill gas projects in developing countries. Anais do WASTECON 2009. Long Beach, Califórnia, EUA. 21-24 de Setembro de 2009. 6p.

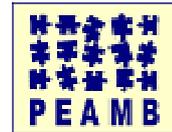
Themelis, N.J. e Ulloa, P.A. (2007). Methane generation in landfills. *Renewable Energy* 32: 1243-1257. 15p.

UNFCCC (2003). Technical guidance on methodologies for adjustments under article 5, paragraph 2, of the Kyoto protocol. Guia elaborado pelo Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice (SBSTA). Disponível em: http://unfccc.int/cop9/latest/sbsta_10_add2b.pdf. Acesso em: jan. 2011.

ANEXO I – Pesquisa de Mestrado



UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO
 Centro de Tecnologia e Ciências
 Faculdade de Engenharia
 Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente
 Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental



Pesquisa de Mestrado

Mestrando: **Thiago Augusto Pimenta Viana**

Orientadora: **El Isabeth Ritter**

PERGUNTAS RELACIONADAS À REALIZAÇÃO DE ESTIMATIVAS DE EMISSÃO DE METANO EM ATERROS SANITÁRIOS E A COMPARAÇÃO DESTAS COM NÚMEROS REAIS DE CRÉDITOS DE CARBONO OBTIDOS ATRAVÉS DE DESTRUIÇÃO DE METANO.

Antes de começar, queira fazer a gentileza de se identificar.

Nome:

Formação:

Cargo e empresa atual:

Experiência e aterros com os quais já trabalhou:

1) Precizou realizar algum tipo de estimativa de emissão de metano para aterros sanitários? Qual(is)?

Resposta:

2) Qual o(s) principal(is) problema(s) encontrados na realização deste cálculo?

Resposta:

3) Especificamente para aterros no qual trabalhou/trabalha: houve alguma particularidade que resultou na diferença (ou semelhança) entre a estimativa e o monitorado? Qual o principal fator que resultou no sucesso/fracasso da estimativa?

Resposta:

4) Qual seriam suas principais sugestões para repetir as experiências de sucesso ou mitigar problemas na elaboração de estimativas de emissão de metano?

Resposta:

5) Como provavelmente é de seu conhecimento, a grande maioria dos aterros pelo mundo que estão envolvidos com projetos de MDL possui uma grande discrepância entre a estimativa de emissões de metano e a quantidade de créditos de carbono efetivamente recebidos. A que se deve esta diferença?

Resposta:

(Favor responder a todas as perguntas com o máximo de detalhes e informações possível. Esta pesquisa será usada apenas para fins acadêmicos. Se quaisquer informações fornecidas não puderem ser divulgadas, favor mencionar na resposta.)

Sobre a Orientadora:

ELISABETH RITTER

D.Sc. Professor Adjunto

Curriculum: <http://lattes.cnpq.br/3448106119318351>

Sobre o Mestrando:

THIAGO VIANA

Curriculum: <http://lattes.cnpq.br/9800520912517656>