IMPLICAÇÕES ECONÔMICAS E SOCIAIS DE CENÁRIOS DE MITIGAÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO BRASIL ATÉ 2030

IES-Brasil
Cenários de Mitigação

Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas

Cenários de Emissão de GEE do Setor de Tratamento de Resíduos

Relatório Técnico

Autores:

Saulo Machado Loureiro, Carolina B. S. Dubeux (Centro Clima/COPPE/UFRJ) e Victor Zveibil

Citação:

LOUREIRO, S.M.; ZVEIBIL, V.; e DUBEUX, C.B.S. (2015). Cenários do Setor de Resíduos. In: LA ROVERE, E. L. et al. – Implicações Econômicas e Sociais de Cenários de Mitigação de Gases de Efeito Estufa no Brasil até 2030: Projeto IES-Brasil, Forum Brasileiro de Mudanças Climáticas – FBMC. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2016.

EQUIPE DO PROJETO IES-Brasil

FORUM BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS – COORDENAÇÃO INSTITUCIONAL

Luiz Pinguelli Rosa – Coordenador Geral
Neilton Fidelis – Coordenador Executivo

CENTRO CLIMA/COPPE/UFRJ – COORDENAÇÃO TÉCNICA

Emilio Lèbre La Rovere – Líder de Pesquisa e Modelagem
William Wills – Coordenador de Pesquisa e Modelagem Macroeconômica
Carolina Burle Schmidt Dubeux, Amaro Olímpio Pereira Junior e Sergio Henrique Ferreira da Cunha –
Coordenadores de Estudos Setoriais
Isabella da Fonseca Zicarelli – Assistente de Coordenação

ECOSYNERGY – EQUIPE DE FACILITAÇÃO

Barbara C. P. Oliveira – Líder de Processo e Facilitação
Sergio Marcondes
Luisa Santos Sette Câmara Moreira

EQUIPE DE MODELAGEM MACROECONÔMICA

William Wills, Carolina Grottera, Romulo Neves Ely – Centro Clima/COPPE/UFRJ
Julien Lefevre – CIRED/CNRS (*Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Dévéloppement*)

EQUIPE DE ESTUDOS SETORIAIS

Setor de Agricultura, Floresta e Outros Usos da Terra (AFOLU): Marcelo Melo Ramalho Moreira, Leila
Harfuch, Willian Kimura, Luciane Chiodi Bachion, Rodrigo Lima, Wilson Zambianco e André Nassar – Agroicone; Carolina B. S. Dubeux e Michele K.C. Walter – Centro Clima/COPPE/UFRJ
Setor Energético: Amaro Olímpio Pereira Junior, Sergio Henrique Ferreira da Cunha, Thauan Santos, Mariana Weiss, Larissa Albino da Silva Santos e Patricia Turano de Carvalho – Centro Clima/COPPE/UFRJ
Setor Industrial: Shigueo Watanabe Jr, Roberto Kishinami e Ana Toni – CO_2 Consulting
Setor de Resíduos: Saulo Machado Loureiro e Carolina B.S. Dubeux – Centro Clima/COPPE/UFRJ e Victor Zveibil
Setor de Transporte: Amaro Olímpio Pereira Junior, Luan Santos e Luiza Di Beo Oliveira – Centro Clima/
COPPE/UFRJ

EQUIPE DE COMUNICAÇÃO

Roberta Nadalutti La Rovere

GERÊNCIA ADMINISTRATIVA

Charlotte Heffer – Gerente de Projeto
Mariana Portellada – Assistente Administrativa
Yuri Ramos Alves – Estagiário

Sumário

Introdução **7**

1. Cenário de Plano Governamental (CPG) **20**

1.1. Premissas Utilizadas na Modelagem **21**

1.2. Medidas de mitigação já incluídas no CPG **22**

1.2.1. Resíduos Sólidos 22

1.2.2. Efluentes Líquidos 25

1.3. Resultados Finais **26**

2. Cenários de Mitigação Adicional (MA) **27**

2.1. Cenário de Mitigação Adicional 1 (MA1) **32**

2.1.1. Medidas de mitigação já previstas no CPG cujo alcance foi ampliado 32

2.1.2. Novas medidas de mitigação 32

2.1.3. Resultados alcançados no MA1 32

2.2. Cenário de Mitigação Adicional 2 (MA2) **33**

2.2.1. Medidas de mitigação já previstas no MA1 cujo alcance foi ampliado. 33

2.2.2. Novas medidas de mitigação 34

2.2.3. Resultados alcançados no MA2 34

3. Análise Comparativa dos Cenários CPG, MA1 e MA2 ..... **34**

ANEXO METODOLÓGICO **38**

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **49**

Figuras

Figura 1. Destino final do resíduo sólido coletado no Brasil - 2010..... 10

Figura 2. Destinação dos resíduos sólidos no Brasil e na União Europeia, por tipo de tratamento, em 2005 13

Figura 3. Evolução das emissões totais dos cenários no Setor de Resíduos de 1990 a 2030 35

Figura 4. Variação das emissões nos cenários de mitigação adicional (MA1 e MA2) em relação ao cenário de plano governamental (CPG) - 2020 e 2030..... 36

Tabelas

Tabela 1. Evolução das emissões de GEE pelo tratamento de resíduos no Brasil (10^3t) – 1990-2010 9

Tabela 2. Fração dos municípios por tipo de destino de resíduos sólidos (%) - 1989-2008 11

Tabela 3. Emissões per capita dos resíduos sólidos em vários países (kgCO_2e/habitante) 1990-2010. 13

Tabela 4. População (milhões de habitantes) 21

Tabela 5. Evolução das emissões do Setor de Resíduos por fonte emissora (tCO_2e) – 2010-2030 27

Tabela 6. Medidas inicialmente elencadas no Setor de Resíduos nos MA – 2020-203027

Tabela 7. Medidas de mitigação e alcances considerados nos cenários do Setor de Resíduos por porte de cidades, até 2030 30

Tabela 8. Medidas de mitigação adicional ampliadas a partir do CPG (MA1) 32

Tabela 9. Medida de mitigação adicional adotadas a partir do Planares (MA1) 32

Tabela 10. Custo de mitigação no setor de resíduos sólidos, no MA1 32

Tabela 11. Medidas de mitigação adicional ampliadas a partir do cenário de mitigação adicional 1 (MA2) 33

Tabela 12. Custo de mitigação no setor resíduos sólidos, no MA2 34

Tabela 13. Emissões totais dos cenários no setor de resíduos (Mt CO_2e) 35

Tabela 14. Fatores de Correção do Metano (FCM) e respectivos Fatores de Emissão (FE) 48

Introdução

No presente capítulo será avaliado o setor de tratamento de resíduos no Brasil. Este setor se divide em dois subsetores principais: resíduos sólidos e efluentes. No subsetor de resíduos sólidos, foram pesquisados os resíduos urbanos (RSU), industriais (RSI) e de serviços de saúde (RSS), todos classe II-A (não perigosos e não inertes[1]). Não são contabilizados os resíduos perigosos, pois estes são armazenados conforme legislação e normas específicas e não são emissores de gases estufa, exceto quando encaminhados para tratamento térmico por incineração. No subsetor de efluentes foram pesquisados os esgotos domésticos e comerciais bem como efluentes industriais orgânicos.

Foram construídos três cenários de emissão, sendo o primeiro com base nas atuais políticas de governo – Cenário de Plano Governamental (CPG), e mais dois cenários de mitigação adicional – Cenário de Mitigação Adicional 1(MA1) e Cenário de Mitigação Adicional 2 (MA2), onde se introduziram novas políticas e medidas de mitigação, sendo o MA2 mais ousado que o MA1[2].

Para a construção desses cenários, foram estimados custos de investimento e de operação de tratamento de resíduos, com base nas informações dos planos nacionais de resíduos sólidos e de saneamento básico.

No que se refere aos resíduos sólidos, atualmente, o aterramento responde por 98% da destinação final, seguido da reciclagem com pouco mais de 1% e dos tratamentos térmicos (incineração) e biológicos (compostagem) que juntos não respondem nem por 0,1% do total.

O aterramento, seja a céu aberto, controlado, sanitário ou mesmo não categorizado, provoca a geração de gases de efeito estufa, principalmente do metano (CH_4) pela da decomposição anaeróbica do lixo orgânico. Tal condição faz com que um aterro sanitário gere mais CH_4 que um depósito a céu aberto[3]. Os tratamentos térmico e biológico são fontes de emissão de CO_2, N_2O e CH_4, para resíduos de origem não biogênica. Em relação à reciclagem, a parcela que

[1]Norma ABNT NBR 10.004:2004

[2]Cada cenário de mitigação foi ainda estimado com a adoção de uma taxa sobre as emissões de GEE (CO_2, CH_4 e N_2O) provenientes da queima de combustíveis fósseis, nos níveis de 20 e de 100 US$ / t CO_2e, respectivamente, conforme modelagem macroeconômica que forneceu novos valores de PIB à análise deste setor, alterados em razão da referida taxa. Entretanto, como os resultados do Setor de Resíduos praticamente não se alteraram em função da adoção de taxas de carbono, o presente relatório apenas apresenta os resultados dos cenários sem taxa.

3 Na realidade, somente as camadas mais profundas de um lixão geram metano.

contribui para evitar emissões é muito pequena, pois se deve apenas à reutilização de papel e papelão, e em quantidades desprezíveis.

Em relação aos efluentes líquidos, tanto o tratamento dos esgotos quanto do lodo produzido, sob condições anaeróbias, resulta na produção de CH_4, sendo que a quantidade de gás produzida dependerá das características do efluente, da temperatura e do tipo de tratamento empregado. O principal fator determinante da geração de metano é a quantidade de matéria orgânica degradável, medida através da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e da demanda química de oxigênio (DQO). Quanto maior a DBO ou DQO, maior a produção de metano. Em relação à temperatura, a produção do metano aumenta, principalmente em climas quentes e em sistemas sem o controle adequado deste parâmetro.

O óxido nitroso está associado à degradação dos componentes nitrogenados presentes no esgoto/efluente (ureia, nitrato e proteínas) e aos processos que envolvem o tratamento, principalmente nos sistemas terciários, que são capazes de remover estes compostos nitrogenados. Emissões diretas de N_2O são geradas tanto nos processos de nitrificação (processo aeróbio que converte amônia e outros compostos nitrogenados em nitrato – NO_3) e denitrificação (processo anaeróbio em que o nitrato é convertido em nitrogênio gasoso – N_2), pois são um produto intermediário de ambos os processos. As emissões de N_2O podem ocorrer tanto nas plantas de tratamento quanto no corpo d'água receptor do efluente.

Com base nas considerações acima, foram calculadas as emissões dos respectivos gases das diferentes fontes segundo as seguintes formas de tratamento de resíduos sólidos e efluentes líquidos:

- Aterramento (CH_4)
- Compostagem ou tratamento biológico (CH_4 e N_2O)
- Incineração ou tratamento térmico (CO_2, CH_4 e N_2O)
- Lançamento in natura (CH_4 e N_2O)
- Fossas sépticas (CH_4)
- ETEs – primário, aeróbio, anaeróbio, lodos (CH_4 e N_2O)
- Fossas sépticas e latrinas (CH_4)

Sabe-se que o CO_2 emitido pela decomposição dos resíduos sólidos e efluentes, quando de origem biogênica, não causa impacto no clima, considerando que o mesmo é sequestrado para a produção da safra agrícola seguinte, portanto não sendo contabilizadas essas emissões do CO_2.

As quantidades de RSI e RSS que são destinados a aterramento e à incineração estão estimadas juntamente com RSU. A geração de resíduos sólidos, em sua totalidade, varia conforme a evolução do PIB. Para efluentes, a produção da carga orgânica é estimada em função de coeficientes per capita multiplicados pela evolução da população atendida.

No que se refere ao tratamento de esgotos industriais reflete aumentos das atividades mais produtoras de carga orgânica cujo tratamento gera metano, sendo que, em 2010, o setor de cerveja foi responsável por 62% das emissões, seguido do setor de leite cru, com 14% (MCTI, 2010). Embora a maior carga orgânica gerada pela indústria seja o vinhoto do setor sucroalcooleiro, ele é aplicado diretamente no solo e não gera emissões de metano. A Tabela 1 apresenta a evolução das estimativas de emissões dos GEE relativos ao tratamento de resíduos no Brasil.

Tabela 1. Evolução das emissões de GEE pelo tratamento de resíduos no Brasil (10^3t) – 1990-2010

GEE (10^3t)	1990	2000	2005	2010	Variação (%) 1990/2010
CH_4	1.173,6	1.754,1	2.117,3	2.651,9	126,0
CO_2	19,0	96,0	130,0	178,0	836,8
N_2O	4,3	5,7	6,6	7,2	66,7
CO_2e	25.997,6	38.699,1	46.639,3	58.100,0	139,9

Fonte: III Inventário Brasileiro de Emissões dos GEE, versão para consulta pública (MCTI, 2015).

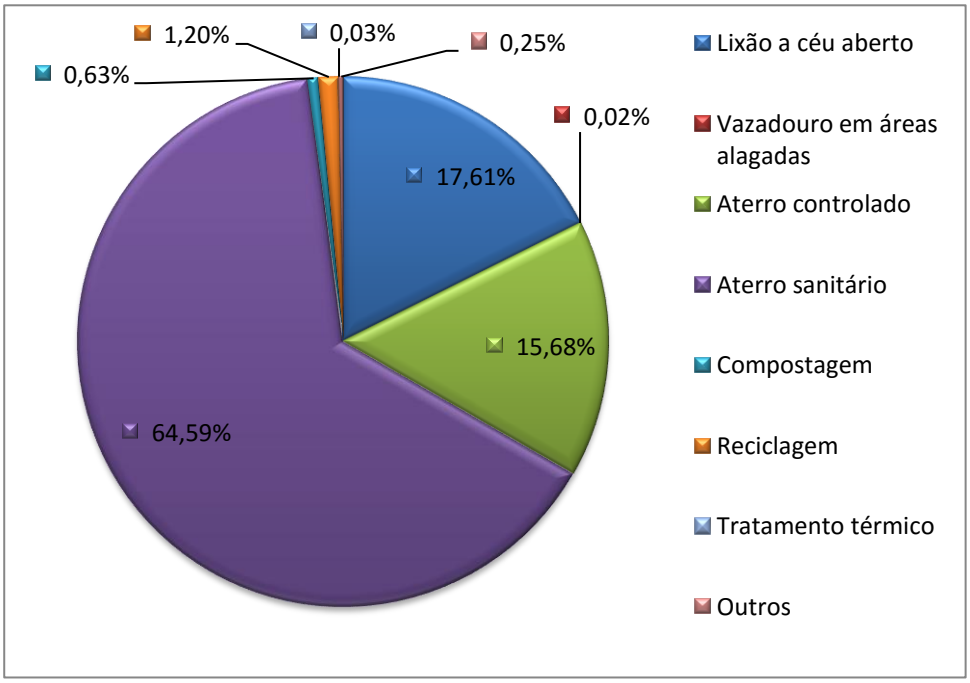
Para se calcular as emissões do setor de resíduos, foram considerados, em termos do crescimento socioeconômico, os seguintes parâmetros: produção de resíduos (sólidos e efluentes), composição dos resíduos e formas de tratamento dos resíduos (ver detalhes no anexo metodológico). Tanto no caso de resíduos sólidos quanto de efluentes, as parcelas destinadas a cada opção de destinação, que são determinantes para a formação de GEE, foram definidas em conjunto com o CEC.

Em 2010, a média brasileira de geração de resíduos, de acordo com o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2010 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS, 2011) foi de 1,213 kg/hab.dia, com uma eficiência de coleta de 89%,

portanto com uma taxa de coleta de 1,079 kg/hab.dia. Porém, existe uma variação deste valor considerando as regiões, os Estados da Federação e os municípios, devido principalmente ao nível de renda da população. No Estado do Rio de Janeiro, por exemplo, essa média de coleta é de 1,295 kg/hab.dia e, na cidade do Rio de Janeiro, sobe para 1,861 kg/hab.dia[4].

De acordo com a última Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (IBGE, 2010), no Brasil a situação da destinação dos resíduos sólidos urbanos era preocupante, quando de cerca das 240 mil toneladas desses resíduos produzidos diariamente, mais da metade era lançado a céu aberto, em corpos d'água ou áreas de proteção ambiental.

A **Figura 1** apresenta as principais formas de tratamento e destino final dos RSU no Brasil, por unidade de massa dos resíduos sólidos coletados, com base nos resultados obtidos pela Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB) de 2008.



Fonte: Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (IBGE, 2010).

Figura 1. Destino final do resíduo sólido coletado no Brasil - 2010

[4]No presente estudo, o ano base considerado para a aplicação da metodologia foi 2010, a partir do qual foram construídos os cenários até 2030.

Com referência ao cenário do tratamento e da disposição final dos resíduos sólidos, verificam-se avanços importantes em termos de massa dos resíduos coletados visto que a maior parte já se destina a aterros sanitários devidamente licenciados e operados, atendendo principalmente às cidades médias, grandes e de áreas metropolitanas.

Entretanto, quando se tem em conta a totalidade dos municípios, como mais da metade destes ainda deposita seus resíduos em lixões a céu aberto mantém-se no país um grande passivo ambiental e de saúde pública tendo em vista que a decomposição do lixo produz chorume, que contamina o solo, rios e lençóis freáticos, favorecendo condições de instabilidade, com escorregamentos das massas de lixo. De acordo com IBGE (2010), a disposição final dos RSU por unidade de destino nos 5.565 municípios brasileiros ocorre em 51% deles na forma de lixões (a céu aberto), 22% em aterros controlados e apenas 27% em aterros sanitários. A Tabela 2 abaixo apresenta a evolução do destino final dos resíduos no Brasil, referentes às últimas três pesquisas realizadas pelo IBGE, em 1989, 2000 e 2008.

Tabela 2. Fração dos municípios por tipo de destino de resíduos sólidos (%) - 1989-2008

Ano	Destino final dos resíduos sólidos, por unidade de destino dos resíduos (%)		
	Lixão	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: Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (IBGE, 2010).

O relatório de pesquisa do INEA (SEA, 2013) indica que "vazadouros a céu aberto estão presentes em 50,5% dos municípios brasileiros, correspondendo a 19,8% da quantidade total, em massa, dos resíduos sólidos encaminhados para um destino final. Se a comparação for feita com relação à quantidade total coletada, este valor aumentará para 20,4%".

É importante frisar que não há uniformidade na avaliação e classificação de aterros de disposição de resíduos no Brasil, tendo em vista a inexistência de uma padronização federal, fazendo-se necessária a utilização de classificações provenientes de universidades e agenciais ambientais, entre outras instituições. A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) possui uma sistemática para tal, chamada IQR, ou Índice de Qualidade de Aterros de Resíduos, onde vários parâmetros operacionais são avaliados, resultando numa média

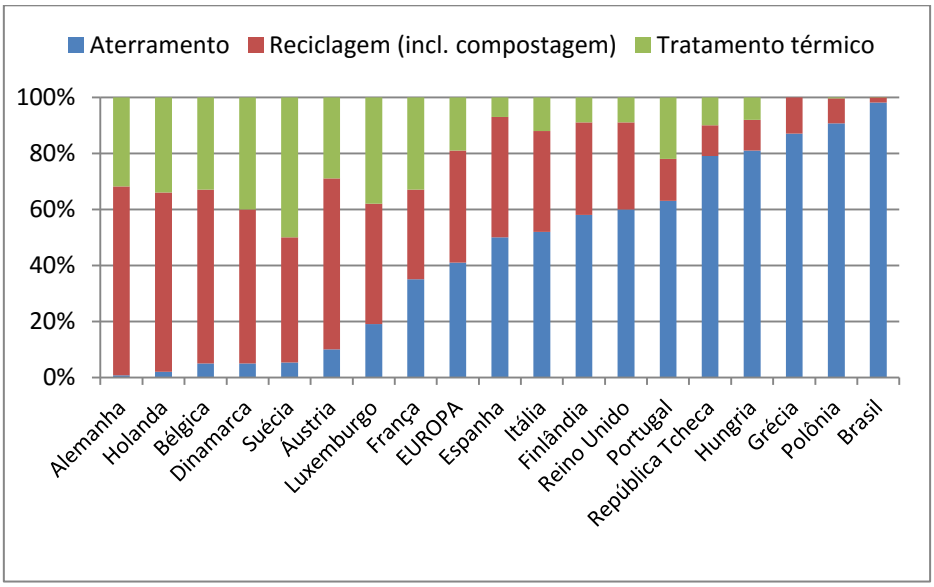
ponderada final que classifica o aterro de acordo com a nota alcançada. A COPPE/UFRJ já realizou alguns estudos nesse sentido, publicando algumas dissertações de mestrado sobre este assunto, onde aperfeiçoou os critérios desses índices, tanto para resíduos urbanos (FARIA, 2002; LOUREIRO, 2005) quanto industriais (MONTEIRO, 2006). Ainda assim, trata-se de uma avaliação multicritério, onde o fator humano predomina no momento do resultado. Ou seja, dois avaliadores com semelhante formação técnica podem chegar a resultados distintos do mesmo aterro.

Com base no III Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa não Controlados pelo Protocolo de Montreal (MCTI, 2015, versão disponibilizada para consulta pública), nos anos de 2005 e 2010, o setor de resíduos foi a segunda maior fonte das emissões totais de CH_4 no Brasil, correspondendo a 11,4% e 15,0% dos totais, respectivamente.

Segundo esse documento, em 2010 o subsetor de tratamento de resíduos sólidos respondeu por 1.516 mil toneladas de CH_4, ou 31,8 milhões de toneladas de CO_2e, representando 7% do total das emissões de metano do País. De 1990 a 2010, as emissões de CH_4 do setor resíduos aumentaram 45,8%, passando de 5,5 para 13,9 kgCH_4/hab.ano, que corresponde a 0,29tCO_2e/hab.ano.

Os serviços de incineração e tratamento de efluentes geraram emissões de CO_2 e N_2O, devido aos resíduos contendo carbono não renovável, sendo estimadas em 178,0 e 23,8 toneladas, respectivamente, em 2010 (MCTI, 2015).

Em países mais desenvolvidos, o aterramento não é a prática predominante, dando espaço às demais, como incineração, usinas térmicas, reciclagem e compostagem. A **Figura 2** apresenta a participação dessas opções de destinação em vários países.



Fonte: European Commission (2012); IBGE (2010).

Figura 2. Destinação dos resíduos sólidos no Brasil e na União Europeia, por tipo de tratamento, em 2005

Os valores da Tabela 3 apresentam a variação das emissões, no período 1990-2020, obtida a partir de estudos recentes sobre as emissões de gases do efeito estufa dos resíduos sólidos em países do Anexo1da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC, sigla em inglês), e do Brasil, permitindo assim a comparação das tendências ao longo dos últimos 20 anos.

Tabela 3. Emissões per capita dos resíduos sólidos em vários países (kgCO_2e/habitante) 1990-2010.

Localidade	1990	1994	2000	2005	2010	Variação 1990 - 2010
Alemanha [c q]	487	469	300	213	150	-69%
Reino Unido [c q]	779	686	473	315	266	-66%
Bélgica [c q]	282	253	192	151	105	-63%
Holanda [c q]	803	726	516	418	302	-62%
Áustria [c q]	440	385	287	286	216	-51%
União Europeia 15 [b c q]	504	486	375	277	261	-48%
Finlândia [c q]	736	726	584	459	409	-44%
Suécia [c q]	341	314	277	274	198	-42%
União Europeia 27 [b c q]	374	366	302	242	222	-41%
Estados Unidos [r q]	596	562	404	392	360	-40%
Austrália [a q]	794	728	636	511	507	-36%
Nova Zelândia [n q]	438	403	392	367	308	-30%
Japão [m q]	181	204	203	168	144	-20%

Localidade	1990	1994	2000	2005	2010	Variação 1990 - 2010
Polônia [c q]	179	183	203	192	166	-7%
Canadá [p q]	666	657	644	667	631	-5%
Itália [c q]	282	288	332	356	302	7%
Portugal [c q]	307	363	393	390	432	41%
França [c q]	186	218	267	311	305	64%
Rússia [f q]	191	205	237	279	326	71%
Grécia [c q]	219	239	285	447	436	99%
Brasil [e k]	*115*	*120*	*132*	*152*	*236*	*105%*
Espanha [c q]	135	172	215	296	328	143%

Fonte: autores a partir de[a] ABS (2012), [b] European Environment Agency (2012), [c] European Commission (2012, 2013), [d]International Council for Local Environmental Initiatives (2012), [e] MCTI (2010), [f]Russian Federal State Statistics Service (2012), [i]ROVERE et al (2007), [j] ROVERE et al (2008), [k] ROVERE et al (2011), [m]Statistics Bureau of Japan (2012), [n]Statistics New Zealand (2012), [p]Statistics Canada (2012), [q] UNFCCC (2012, 2013), [r]United States Census Bureau (2012)..

Os números acima mostram que alguns países (Finlândia, Reino Unido, Holanda, Austrália, Canadá, EUA e UE15) alcançaram picos de emissões acima dos 500 kgCO_2e/hab. em 1990, tendo a Holanda obtido o maior valor neste ano. Nestes países, a intensidade de emissões em função da população apresenta tendência de queda.

Em geral, os números mostram um imenso fluxo de tendências convergindo do intervalo de 100 a 800 kgCO_2e/hab. para o intervalo de 100 a 500 kgCO_2e/hab., excetuando-se o Canadá, que praticamente se mantém constante em torno dos 650 kgCO_2e/hab. ao longo dos 20 anos. Ou seja, à exceção do Brasil, da Itália, da França, Rússia, Espanha, Portugal e Grécia, os demais países reduziram suas emissões no setor de resíduos obtendo aproximadamente 50% de redução em média.

No caso do Brasil, é possível afirmar que o aumento das emissões per capita se deve fundamentalmente a dois fatores: a ampliação dos serviços de saneamento básico nas cidades e a diminuição das taxas de crescimento populacional nas últimas décadas, tomando-se como premissa que o incremento da coleta tem como principal consequência o maior acúmulo de resíduos nos aterros sanitários, que, portanto, irão produzir mais metano pela decomposição anaeróbica desses resíduos.

Subsetor de Resíduos Sólidos

As emissões do subsetor de resíduos sólidos foram estimadas para os anos de 2005 a 2030, em função de hipóteses de geração per capita de resíduos, de sua composição gravimétrica e das possíveis formas de tratamento e destinação final. A evolução desses parâmetros nos diferentes cenários variou em função das premissas adotadas e das medidas de mitigação adotadas.

Esses parâmetros, de produção per capita de resíduos, composição gravimétrica, das massas de resíduos destinados a cada tipo de tratamento, do incremento de coleta seletiva e da reciclagem, variaram conforme as seguintes premissas:

- A economia impacta diretamente na geração de resíduos, há relação direta entre o PIB per capita e o capital físico. Por seu turno, políticas públicas e estratégias industriais reduzem esse impacto pela redução da geração e reciclagem de resíduos;
- A produção de lixo depende de hábitos culturais, de consumo, do poder aquisitivo, do clima, do nível educacional e das características de sexo e idade dos grupos populacionais;
- Os resíduos têm diferentes frações orgânicas ao longo do período dos cenários, que variam em consequência da evolução da economia brasileira e das características de consumo. Isto porque, com o aumento da renda, deve haver uma tendência de diminuição da componente orgânica nos resíduos sólidos em decorrência do aumento nas vendas dos alimentos industrializados, com um maior descarte de resíduos plásticos, de papéis e vidros, ou seja, maior potencial reciclável;
- Na população rural, as características dos resíduos são distintas da população urbana, pois utilizam produtos menos industrializados e possuem um maior percentual de material orgânico na composição, em relação ao urbano;
- Na construção dos cenários, as emissões tendem a diminuir nos períodos de pouca evolução do PIB, ao passo que aumentam quando a economia volta a crescer, no entanto, considerando uma tendência média de crescimento, o resultado em longo prazo das emissões é praticamente inalterado (ROVERE et al., 2008).

Os dados gerais e os aspectos econômicos do setor do manejo e disposição final dos resíduos sólidos e do mercado da reciclagem são resultantes de estimativas produzidas por fontes

variadas e nem sempre coerentes, comparáveis ou complementares. Os principais indicadores tais como a geração *per capita*; sua composição gravimétrica ou disposição final dos resíduos são obtidos do Sistema Nacional de Informações em Saneamento – Resíduos Sólidos (SNIS – Resíduos Sólidos) com série anual desde 2007 até 2012, que permite observar evoluções e transformações no setor, entretanto, com informações lastreadas em auto declaração dos municípios. As informações são fornecidas por órgãos gestores dos serviços nos municípios, podendo ser uma autarquia, departamento ou secretaria municipal com maior ou menor grau de estruturação e controle sobre os serviços prestados. É importante verificar que o número de municípios participantes do SNIS vem crescendo ano a ano: em 2012, 3.043 municípios participaram do Diagnóstico, ou seja, 54,6% do total do País. Em termos de população urbana este percentual sobe para 81,1%, respondendo por 132,8 milhões de habitantes urbanos. Assim, apenas mais recentemente, os dados começam a permitir identificar, com elevado grau de objetividade, os aspectos da gestão dos respectivos serviços nos municípios brasileiros.

Os anuários da ABRELPE (Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública) também apresentam estimativas obtidas por amostragem, segundo metodologia própria. Os relatórios do CEMPRE (Compromisso Empresarial para Reciclagem) e relatórios setoriais de entidades do setor produtivo apresentam visão sobre o mercado da reciclagem. Por fim, o Plano Nacional de Resíduos Sólidos – PLANARES é referência fundamental, quanto a metas e estimativas, mas sem detalhamento dos números referenciais.

Um dos poucos estudos sobre aspectos econômicos da reciclagem foi realizado pelo IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada), em 2012, porém utilizando dados da Pesquisa Nacional sobre Saneamento Básico (IBGE, 2010). O próprio estudo aponta que esses dados devem ser usados com cautela, pois resultam da combinação de indicadores de diferentes fontes, natureza e graus de precisão.

De qualquer forma, é importante observar a relevância do setor, tanto em volume de recursos operados como na geração de empregos diretos e indiretos. O anuário ABRELPE (2013), com dados de 2012, indica que o mercado da limpeza urbana ultrapassou a casa dos 24 bilhões de reais, com crescimento em todas as regiões do país e um aumento superior a 6,5% no Brasil em relação ao ano anterior.

O SNIS (2012) calcula em 14,4 bilhões de reais a despesa total das prefeituras com o manejo, ou seja, despesas com pessoal, veículos, manutenção, insumos, terceirizações e demais remunerações, exceto investimentos. Este montante referente ao ano2012 se mostra também

14,4% superior ao valor do ano anterior, e inclui o valor contratual médio para disposição final dos resíduos (indicado pelo Instituto Estadual do Ambiente do Rio de Janeiro - INEA, como da ordem de R$ 40,37/tonelada, para os aterros sanitários). Observe-se que esses valores não incorporam importantes investimentos em aterros sanitários e remediação de lixões, especialmente em cidades médias, grandes e regiões metropolitanas, impulsionados com a promulgação da lei da Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei federal nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010a).

O CEMPRE estima que, em 2012, a coleta, a triagem e o processamento dos materiais em indústrias recicladoras geraram um faturamento de R$ 10 bilhões no Brasil. E acrescenta a constatação de que o país perde anualmente R$ 8 bilhões ao enterrar o lixo que poderia ser reciclado.

No campo do desenvolvimento social, segundo a ABRELPE (2013), a geração de empregos no setor de limpeza urbana cresceu 3,6% em relação ao ano anterior, superando os 332 mil empregos diretos. Observe-se que este número não inclui o de catadores. O Censo 2012 do IBGE analisou o impacto desses trabalhadores e destacou a participação das mulheres nesse contexto. A pesquisa concluiu que 400 mil trabalhadores se declaram como Catadores de Resíduos, as mulheres representariam 31,1% desse total. Segundo o IPEA, alguns fatores sociológicos podem explicar a discrepância desses dados em relação às estimativas, por exemplo, o fato de algumas mulheres exercerem outras atividades, como o cuidado do lar e da família, e entenderem que a coleta de resíduos seja uma mera atividade complementar. Ou seja, muitas mulheres catadoras não se identificaram com a atividade por manterem a identidade de domésticas ou trabalhadoras do lar como trabalho principal. A pesquisa indica também que as famílias têm cerca de 700 mil crianças sustentadas por meio da renda da coleta de resíduos recicláveis.

O IPEA admite que o número total de catadores possa ser bem maior, uma vez que a pesquisa do Censo considera apenas o que declara o entrevistado, por ser uma profissão ainda pouco valorizada e ainda nova no mercado, uma parte dos trabalhadores não se assume como profissionais.

Ainda que tenham sido elencadas as medidas relacionadas à ampliação do tratamento de efluentes e ao uso do biogás como combustível, as mesmas não foram avaliadas, uma vez que não produziram os resultados esperados. A primeira não reduziu as emissões, pelo contrário, aumentou, e a segunda ficou prejudicada em função da falta de informações concretas sobre a

medida, já que as políticas e planos de resíduos atuais não fornecem ferramentas suficientes para realizar essa modelagem para o horizonte temporal do estudo.

Para a construção dos cenários de Plano Governamental e de Mitigação Adicional, as principais fontes de dados pesquisadas e utilizadas foram:

- As Comunicações Nacionais de Emissões de GEE à Convenção do Clima (MCTI, 2004, 2010, 2015);
- Os resultados das últimas Pesquisas do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2014a, 2014b),
- Da última Pesquisa Nacional de Saneamento Básico – PNSB, de 2008 (IBGE, 2010), que reuniu os resultados sobre a oferta e a qualidade dos serviços de saneamento junto às prefeituras municipais e empresas terceirizadas;
- A Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios – PNAD, do IBGE;
- Informações da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2014) e
- O Estudo de Cenários Nacionais 2010-2030 para o PNUD.

Considerando que, em 2010, foi aprovada e regulamentada a Lei da Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei 12.305/2010 (BRASIL, 2010a), a partir da qual vários instrumentos, ações e estratégias estão sendo e deverão ser implementadas pelos setores público e privado, às fontes antes mencionadas devem ser acrescidas:

- O Plano Nacional de Resíduos Sólidos – PLANARES, 2012 (MINISTERIO DAS CIDADES, 2012), e
- O Plano Nacional de Saneamento Básico – PLANSAB, 2012 (MMA, 2013).

Subsetor de Efluentes

Os esgotos (ou efluentes líquidos ou ainda águas residuais) são fontes de emissão de CH_4 quando tratados ou dispostos anaerobicamente. Podem também ser fontes de emissão de N_2O, quando este gás é produzido pela decomposição de compostos nitrogenados presentes nos efluentes encaminhados aos corpos d'água. As emissões de CO_2, embora existam, não são calculadas por serem de origem biogênica, o mesmo raciocínio das emissões de resíduos sólidos.

Para a modelagem das emissões do tratamento de esgotos, que podem ter origem doméstica, comercial e industrial, foram buscadas as informações do quanto foram tratados ou lançados sem tratamento no local de origem, coletados e levados a uma estação de tratamento (ETE) ou mesmo lançados em corpos hídricos por emissários. Os tratamentos *in situ* mais comuns foram as fossas sépticas, no caso de efluentes domésticos e comerciais, e unidades de tratamento de efluentes próprias, como, por exemplo, em algumas indústrias e condomínios residenciais.

Os sistemas de tratamento podem ser classificados como preliminar, primário, secundário e terciário. O tratamento preliminar tem objetivo de remover os sólidos grosseiros, enquanto o primário remove também sólidos sedimentares. Em ambos predominam mecanismos físicos de tratamento – grades e deposição – sendo que no primário há a remoção de parte da matéria orgânica em suspensão e materiais flutuantes (óleos e graxas). No tratamento secundário, os mecanismos são biológicos, pois o objetivo principal desse nível de tratamento é a remoção da matéria orgânica através da biodegradação por micro-organismos. Os sistemas de tratamento utilizados podem incluir lagoas de estabilização anaeróbias e aeróbias, reatores anaeróbios, filtros biológicos, lodos ativados, entre outros. O tratamento terciário é utilizado para tratar o efluente em relação aos agentes patogênicos e outros contaminantes, além de prover também a retirada de nutrientes, através de um ou mais processos combinados de lagoas de maturação, filtragem, bioadsorção, troca de íons e desinfecção (ROVERE *et al*., 2007; VON SPERLING *et al*., 2005).

Os efluentes industriais podem ser tratados na própria planta ou descartados no sistema de esgotamento sanitário local. Neste último caso, as emissões dos efluentes industriais são calculadas juntamente com os esgotos domésticos e comerciais.

O lodo pode ser produzido tanto no tratamento primário quanto no secundário e terciário, sendo que no primário consiste dos sólidos removidos do esgoto e nos demais é resultado do crescimento biológico na biomassa e agregação de pequenas partículas. O lodo também deve ser tratado e o processo de tratamento inclui a digestão anaeróbia e aeróbia, adensamento, desaguamento, compostagem ou disposição final em aterros.

A produção de metano associada ao tratamento de efluentes industriais é contabilizada somente levando em conta os efluentes com alto teor de carga orgânica, tratados sob condições anaeróbias (IPCC, 2006). As indústrias com maior potencial de geração de metano no tratamento anaeróbio de seus efluentes são as de fabricação de papel e celulose, abatedouros e estabelecimentos de processamento de carnes, indústrias de bebidas e

alimentos, refinarias de açúcar, álcool e petróleo, indústrias que trabalham com compostos químicos orgânicos, lavanderias/tinturarias, fábricas de sabão e detergentes e fábricas de tintas e resinas.

As emissões diretas de óxido nitroso foram ser consideradas importantes em regiões predominantemente com sistemas de tratamento de nível terciário, que englobam processos de nitrificação e desnitrificação. Adicionalmente, foram calculadas as emissões indiretas de N_2O dos efluentes descartados em ambientes aquáticos e do tratamento em fossas. Para o cálculo dessas emissões, foram utilizados os dados de consumo de proteína da população adotados no inventário nacional de emissões.

1. Cenário de Plano Governamental (CPG)

O conjunto do marco regulatório e das políticas e planos nacionais e estaduais, definidos a partir de 2007, aponta para metas, ações e programas que, se implementados e atingidos, repercutiriam expressivamente na redução dos GEE do setor de saneamento no país, pelo tratamento e disposição adequada de resíduos sólidos urbanos e industriais, e pela eficiência no tratamento dos esgotos sanitários e pelo incremento no aproveitamento energético em ambos os processos. As leis federais da Política Nacional de Saneamento Básico, Lei nº 11.445/2007 (BRASIL, 2007) e da Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010a) e seus respectivos decretos regulamentadores, consolidaram competências, modelos de gestão e instrumentos capazes de lastrear as transformações necessárias nesses campos. Caso esses avanços estivessem ocorrendo como preconizado, pouca diferença se poderia observar entre os cenários do planejamento governamental e os de mitigação I e II.

Entretanto, as metas definidas nos Planos Nacionais de Saneamento Básico e de Resíduos Sólidos, ainda que optando pelos cenários mais conservadores, estão longe de ser alcançadas. Exemplo extremo recai sobre o encerramento total dos lixões no território nacional, que deveria ocorrer até 2014 e que ainda está longe de ser logrado, especialmente nos pequenos municípios e nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste.

Assim sendo, o cenário de plano governamental (CPG), neste caso, ilustra “o estado da arte” dos avanços alcançados até 2010, e os cenários de mitigação adicional (MA1 e MA2) – ainda assim, de forma conservadora– metas originalmente previstas para prazos mais curtos.

As emissões da disposição de resíduos sólidos e do tratamento de esgotos domésticos variam basicamente pelo aumento da população, sendo que as da disposição de resíduos sólidos incluem tanto crescimento pelo aumento da geração de lixo quanto decrescimento por conta dos diversos projetos MDL em curso no Brasil desde 2004[5].

1.1. Premissas Utilizadas na Modelagem

Para as estimativas de emissões do Cenário de Plano Governamental até 2030, foi considerada a implementação total ou parcial das medidas contidas nas políticas públicas que já fazem parte das iniciativas do governo até o ano de 2010. Nessa direção, foram considerados, os seguintes parâmetros: produção de resíduos, composição dos resíduos, formas de tratamento dos resíduos, população, PIB e PIB per capita

Para o desenvolvimento quantitativo dos cenários futuros, foram estabelecidos os seguintes parâmetros para o estudo:

- População: observada a evolução da população e as respectivas projeções;
- Produto interno bruto (PIB): a taxa de crescimento do PIB foi definida;
- PIB: 3,7% a.a. (2013 a 2020) e 4,5% a.a. (2021 a 2030).
- PIB per capita: a partir das taxas de crescimento populacional e do PIB, foram calculadas as taxas de crescimento do PIB per capita.

Tabela 4. População (milhões de habitantes)

2010	2015	2020	2025	2030
195,5	204,5	212,1	218,3	223,1

Fonte: IBGE (2013).

[5] O destino dos projetos MDL é incerto após a UE não mais comprar esses créditos registrados após 2012. Portanto, tal hipótese de decrescimento de emissões depende de novos acordos de clima que viabilizem a destruição de metano em aterros ou de políticas domésticas específicas.

1.2. Medidas de mitigação já incluídas no CPG

Para fins dos cálculos das emissões para o Cenário de Plano Governamental, foram considerados, como hipóteses básicas, os fatores iniciais indicados no II Inventário Nacional de GEE (MCTI, 2010), assim como as estimativas dos programas governamentais, especialmente as principais metas apontadas na Lei da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e no Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES). Destacaram-se as seguintes medidas:

1.2.1. Resíduos Sólidos

Eficiência de coleta de 82% (2010 a 2020) até 100% em 2030:

Sem dúvida, a meta de universalização da coleta dos RSU foi considerada prioritária pela Lei da PNSB, indicada já entre seus objetivos (art. 7º)[6]. Considerados os índices constatados em 2010 (82%) e a ampliação das ações para melhoria da gestão de resíduos sólidos pelos municípios, bem como da valorização dos RSU, a meta da universalização até 2030 é perfeitamente plausível, tanto que sequer consta das indicações prioritárias do PLANARES (2012). Este, em seu diagnóstico indica que a coleta nas áreas urbanas já atingia o índice de 98%, o que de fato não ocorria de maneira equânime em todas as regiões. Segundo o SNIS (2014b)[7] a meta de universalização está próxima de ser atingida, com deficiências ainda concentradas em municípios menores de 100 mil habitantes e nas regiões Norte e Nordeste.

São as seguintes as metas definidas por recorte populacional pelo CEC para o cenário governamental: 100% das cidades grandes (acima de 500 mil habitantes) com resíduos sólidos coletados e encaminhados para aterros sanitários já em 2020 e, para as cidades médias, 100% apenas em 2030 (**Tabela 5**).

---

[6] X - regularidade, continuidade, funcionalidade e universalização da prestação dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos, com adoção de mecanismos gerenciais e econômicos que assegurem a recuperação dos custos dos serviços prestados, como forma de garantir sua sustentabilidade operacional e financeira, observada a Lei nº 11.445, de 2007 (Lei nº 12.305/10 - PNSB, art 7º);

[7] Corroborando os excelentes resultados das duas últimas edições do SNIS, a cobertura do serviço regular de coleta domiciliar em relação à população urbana, medida pelo indicador I16, que considera a coleta direta e indireta (realizada com sistemas estacionários), alcança praticamente 100% (SNIS Diagnóstico de Resíduos Sólidos 2012, Ministério das Cidades).

Disposição final em aterro sanitário de 58% (2010) a 100% em 2030:

A PNSB definiu o horizonte limite de agosto de 2014 para o encerramento de todos os lixões, referindo-se à disposição final ambientalmente adequada de 100% dos rejeitos[8]. O aterro sanitário é considerado como a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, vista a indicação do § 1º do art. 9º[9]. O índice de 58% de disposição final dos RSU em aterros sanitários, em 2010 correspondia a um cenário onde somente em algumas grandes capitais, regiões metropolitanas e cidades de porte médio aterros sanitários estavam implantados.

O PLANARES indica, com base no IBGE, em 2008, um total de apenas 1.723 aterros sanitários em todo o país e 50,5% dos municípios com presença de lixões. É fato que, desde então, ampliou-se o número de aterros sanitários, muitos estados da federação, com apoio do Ministério do Meio Ambiente, avançaram em estudos de regionalização visando a implementação de consórcios intermunicipais e com aterros sanitários atendendo a conjunto de municípios.

Entretanto, é sabido que a meta proposta pela PNRS não foi atingida em 2014. A exceção dos Estados de Santa Catarina e do Rio de Janeiro (que já encaminha 93,5% de seus RSU a aterros sanitários), a grande maioria dos estados brasileiros não atingiu esse objetivo.

Contudo, no CPG, considerando o avanço dos estudos de regionalização, a implementação dos planos estaduais de resíduos sólidos, a atratividade desta atividade econômica e a proatividade do setor privado, é plausível apontar que, em 2030, seria atingida a meta de 100% de disposição final ambientalmente adequada.

Aterros controlados e lixões, de 42% (2010) a zero em 2030:

Da mesma maneira, a PNRS e o PLANARES apontavam o ano de 2014 para encerramento do uso de aterros controlados e lixões[10]. E, com as mesmas considerações elencadas no item anterior, é sabido que a meta proposta não foi atingida em 2014, mas poderá sê-lo na medida em que os rejeitos forem encaminhados para aterros sanitários devidamente licenciados.

---

[8] Art. 54. A disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, observado o disposto no § 1º do art. 9º, deverá ser implantada em até 4 (quatro) anos após a data de publicação desta Lei. (Lei nº 12.305/2010).

[9] Poderão ser utilizadas tecnologias visando à recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, desde que tenha sido comprovada sua viabilidade técnica e ambiental e com a implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental.

[10] Áreas de lixões reabilitadas (queima pontual, captação de gases para geração de energia mediante estudo de viabilidade técnica e econômica, coleta do chorume, drenagem pluvial, compactação da massa, cobertura com solo e cobertura vegetal).

Vale, porém, destacar que o PLANARES prevê a reabilitação paulatina dos lixões com apenas 20% das áreas reabilitadas até 2020 e 90% até 2031. Nesse campo é importante destacar também o tema da inserção social dos catadores oriundos dos lixões, para os quais há linhas específicas de apoio – via Estados e Municípios - pelo Ministério de Trabalho e Emprego.

Captura de biogás:

Todos os aterros sanitários, por definição, devem possuir sistemas de captura de biogás, no mínimo para queima em *flares*. Considerando os aterros sanitários e lixões existentes, o PLANARES indica um potencial de recuperação de gases de aterro sanitário da ordem de 300 MWh, atingindo, no cenário mais desfavorável, 100 MWh em 2019 e 250 MWh em 2031. Isso não significa que esse potencial será necessariamente utilizado em geração de energia elétrica, pois na maioria dos casos, o investimento na conversão dos gases em eletricidade não é compensador, tornando-se mais viável seu tratamento para utilização como combustível para os próprios caminhões de coleta. O Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Rio de Janeiro (2013), por exemplo, apontou ser viável economicamente o aproveitamento do gás de aterros sanitários a partir de uma escala equivalente a 300 toneladas/dia de resíduos tratados, priorizando o biogás.

Resíduos industriais com destinação adequada de 50% em 2015 e 100% em 2020:

Conforme indicado no Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES), “No país, a responsabilidade do gerador pelo gerenciamento de resíduos está descrita no Art. 10 da Política Nacional de Resíduos Sólidos" (BRASIL, 2010a). Preferencialmente, os resíduos industriais deveriam ser tratados e depositados no local onde foram gerados, bem como ter destinação adequada, de acordo com as normas legais e técnicas vigentes. Os dados disponíveis relativos à geração de resíduos sólidos industriais no país não permitem a realização de um diagnóstico completo e atualizado desses resíduos, uma vez que a principal fonte de dados para essa análise são os inventários estaduais, os quais apresentam os seguintes problemas:

- Alguns estados da Federação não elaboraram seus inventários de resíduos industriais;
- Em geral, os inventários estaduais produzidos não apresentam uma padronização, tendo sido produzidos de acordo com as especificidades e perfis dos setores produtivos existentes em cada estado;

Em sua maioria, os inventários estaduais de resíduos industriais elaborados não foram atualizados recentemente. O PLANARES indica a meta de 100% de disposição final ambientalmente adequada de rejeitos industriais já em 2015, para todas as regiões do país. Considerando as fragilidades dos órgãos ambientais estaduais e as diferenças regionais, apesar de ambiciosa, o horizonte de 2020 para esta meta seria mais plausível, no entanto, foi considerado no cenário de plano governamental, que os RSI seguem o mesmo caminho dos RSU e são produzidos em função do crescimento do PIB industrial.

1.2.2. Efluentes Líquidos

Eficiência no tratamento de esgoto aumenta a partir de 2020:

O Plano Nacional de Saneamento Básico – PLANSAB (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2013) propõe metas de percentual para domicílios urbanos e rurais servidos por rede coletora ou fossa séptica para os excretas ou esgotos sanitários partindo de 67%, em 2010, passando a 76% em 2018; 81% em 2023 e atingindo 87% em 2033. Para o tratamento do esgoto coletado, as metas partem do cenário de 53% em 2010, passando a 69% em 2018; 77% em 2023 e 93% em 2033.

Todas as análises sobre investimentos e ampliação dos índices de esgotamento sanitário (coleta e tratamento) desenvolvidos pelo Instituto Trata-Brasil dão conta que os recursos disponibilizados e as dificuldades estruturais relativas à capacidade dos municípios e empresas para desenvolver projetos e obras, não permitem atingir as metas propostas para curto prazo. Tais medidas serão incorporadas ao modelo matemático nos cenários de mitigação para avaliação de suas viabilidades técnica e financeira. Por essa razão, a hipótese aqui traçada propôs considerar o aumento da eficiência no tratamento de esgotos e reduções de GEE decorrentes, a partir de 2020, sendo considerada a eficiência de queima nos *flares* das Estações de Tratamento de Esgoto - ETEs mantida em 50% até 2030.

1.3. Resultados Finais

Nas duas primeiras reuniões do CEC, verificaram-se manifestações expressivas que reforçaram as metas definidas na Política e no Plano Nacional de Resíduos Sólidos e também no Plano Nacional de Saneamento Básico, apontando preocupações quanto à exequibilidade das mesmas nos prazos apontados. Exemplo claro foi da meta prevista de encerramento dos lixões até 2 de agosto de 2014, o que sabidamente não aconteceu em 60% dos municípios do país, em sua maioria pequenos e médios.

A principal indicação do CEC foi de "Reavaliar o cenário de plano governamental quanto à ampliação do saneamento básico de 100% em 2030, com base no quadro atual e a média de crescimento dos últimos 20 anos".

Nesse sentido, foram realizadas duas alterações nas projeções dos cenários de plano governamental, uma para resíduos sólidos e outra para esgotos sanitários. Para os resíduos sólidos, passou a ser considerado 100% de eficiência de coleta em todo país já em 2020 ao invés de 2030 como antes calculado. Essa alteração proporcionou uma redução nas emissões no médio prazo, devido a uma maior quantidade de resíduos disposta nos aterros sanitários, que possuem melhores condições de anaerobiose para a decomposição dos resíduos orgânicos, diferente de lixões e aterros controlados, com menores fatores de emissão e sem captura e queima de metano.

Para os esgotos sanitários, passou a se considerar a ampliação do sistema de coleta e do tratamento em termos absolutos até 2030, em função do crescimento populacional, porém mantendo-se em 40% em termos relativos, o que proporcionou aumento nas emissões previamente apresentadas, ainda que muito pequena no montante total.

Os cálculos do cenário de plano governamental foram refeitos, somando-se essas alterações, para cima em sólidos e para baixo em líquidos, e o resultado da correção foi um ligeiro aumento nas emissões totais, como apresentado na **Tabela 5** e na **Figura 3**.

Tabela 5. Evolução das emissões do Setor de Resíduos por fonte emissora (tCO_2e) – 2010-2030

Fonte			2010	2015	2020	2025	2030
tCH_4		RSU	1.516.000	2.390.323	2.586.055	2.680.234	2.621.463
		RSI	623.000	173.044	208.226	228.083	233.806
		Esgotos	513.000	811.957	913.650	1.031.270	1.163.136
		Subtotal	2.652.000	3.375.324	3.707.931	3.939.588	4.018.404
Incineração	tCO_2	RSU	-	373	393	401	402
		RSI	135.440	166.385	207.346	247.454	295.320
		RSS	39.370	9.188	13.786	18.889	24.473
		Subtotal	174.810	175.945	221.524	266.744	320.194
	tN_2O	RSU	N.D.	0,03	0,03	0,03	0,02
		RSI	11	10,13	12,63	15,07	17,99
		RSS	N.D.	0,66	0,99	1,36	1,76
		Subtotal	11	10,83	13,65	16,45	19,77
		Esgotos	7.200	7.462	7.699	7.170	6.554
		Subtotal	7.211	7.472	7.713	7.186	6.574
tCO_2eq		Aterro	31.836.000	53.830.712	58.679.897	61.074.669	59.960.640
		Térmico	13.257.810	179.301	225.755	271.845	326.323
		Esgotos	13.005.000	19.364.164	21.573.476	23.879.323	26.457.529
		TOTAL	58.098.810	73.374.178	80.479.128	85.225.838	86.744.491

N.D. = não disponível.

Fonte: em 2010, valores do Terceiro Inventário Brasileiro (MCTI, 2015, versão para consulta pública). Demais anos, autores.

2. Cenários de Mitigação Adicional (MA)

As medidas de referentes à melhoria de desempenho do setor, inicialmente apontadas e debatidas pelo Comitê de Elaboração de Cenários (CEC) e suas respectivas metas, estão consolidadas na Tabela 6.

Tabela 6. Medidas inicialmente elencadas no Setor de Resíduos nos MA – 2020-2030

	Medida de mitigação	MA1	MA2
1	Aumento na eficiência da coleta	100% em 2025	100% em 2020
2	Aumento da disposição final em aterros sanitários	100% em 2025	100% em 2020
3	Destruição de metano em aterros sanitários	100% em 2025	100% em 2020
4	Encerramento de lixões e aterros controlados	100% em 2025	100% em 2020
5	Destruição de metano em lixões e aterros controlados	10% em 2030	30% em 2030
6	Aproveitamento energético do biogás recuperado	100 MWh em 2030	250 MWh em 2020
7	Redução de recicláveis secos em aterros sanitários	20% em 2030	35% em 2030
8	Redução de recicláveis úmidos em aterros sanitários	20% em 2030	50% em 2030

	Medida de mitigação	MA1	MA2
9	Incremento do tratamento térmico em usinas	5% em 2030	20% em 2030
10	Incremento do tratamento biológico em usinas	5% em 2030	20% em 2030
11	Ampliação do tratamento de esgotos em ETEs	40% em 2030	60% em 2030
12	Aumento da eficiência em flares de ETEs	100% em 2025	100% em 2020

Fonte: IES-Brasil (2014).

a) Medidas consideradas nos MA

As duas primeiras medidas citadas na tabela 6, na verdade, são requisitos necessários de uma grande medida de mitigação, que é a destruição do metano produzido nos aterros sanitários. O aumento da eficiência da coleta foi considerado no Cenário de Plano Governamental, em atendimento a meta prevista no PLANARES, uma vez que não há espaço para uma meta mais ambiciosa em função do prazo previsto na lei já ter encerrado, da mesma forma que não há espaço para uma meta de alta e outra de baixa ambição, mas apenas uma única meta, de 100% até 2020.

A quarta e quinta medidas da tabela são consequência das três primeiras, uma vez que na medida em que se amplia a capacidade instalada de aterros sanitários, reduz-se o volume de resíduos dispostos em lixões e aterros controlados, portanto foram também condensadas em uma única medida, onde o potencial de produção de biogás cresceria proporcionalmente ao encerramento dos sítios, portanto decrescendo até zero em 2020. Mesmo com o encerramento dos lixões e aterros controlados, o material em decomposição continua produzindo metano, ainda que em quantidades decrescentes, o que permite a coleta e a queima, evitando o dano ambiental maior.

Portanto, das medidas de 1 a 5 da tabela 6, extraem-se duas medidas de mitigação, a seguir apresentadas e que foram consideradas no presente estudo.

1. Destruição de metano em *flares* de aterros sanitários
2. Destruição de metano em lixões e aterros controlados remediados

Estas duas medidas respondem às proposições indicadas pelo CEC como Disposição Final de RSU em aterros sanitários e diminuição de aterros controlados e lixões.

São as principais medidas de mitigação, considerando que os aterros sanitários são assumidos pelo PNSB e PLANARES como as soluções adequadas de disposição final de resíduos até 2033, e contemplam, no mínimo, a captação e queima dos gases em *flares* ou ainda o potencial

tratamento e aproveitamento dos mesmos. Visto que a meta proposta no PLANARES ainda está longe de ser atingida, assumiu-se que no MA1, a universalização da destinação dos RSU para aterros sanitários ocorreria até 2025 e para o de alta ambição até 2020. Inclui os custos de implantação e de reposição (manutenção).

Entretanto, durante o CEC 3, o debate do grupo conduziu à percepção de que os prazos para a referida universalização da destinação dos RSU para aterros sanitários se diferenciam segundo o porte das cidades, considerando que as capitais e grandes cidades já estão próximas de cumprir as metas da lei da Política Nacional de resíduos Sólidos, as cidades médias as cumprirão em horizonte próximo e as pequenas cidades tendem a atingi-las em maior prazo.

O critério para divisão do porte de cidades ficou definido como: cidades grandes, aquelas com mais de 500 mil habitantes; cidades médias, aquelas com população entre 100 mil e 500 mil habitantes e cidades pequenas, as com menos de 100 mil habitantes, mesmo critério adotado pelo IBGE.

Dessa maneira, ficou estabelecida a revisão dos cálculos referentes à destruição de metano nos *flares* considerando os seguintes percentuais de cidades com encaminhamento dos RSU para os aterros sanitários:

- Para o Cenário de Plano Governamental do planejamento governamental: para 2030 – 100% das cidades grandes e médias e 50% das cidades pequenas;
- Para o Cenário de Mitigação Adicional I: para 2020 – 100% das cidades grandes e médias e 65% das cidades pequenas e para 2030 – 100% das cidades grandes e médias e 70% das cidades pequenas;
- Para o Cenário de Mitigação Adicional II: para 2020 – 100% das cidades grandes e médias e 70% das cidades pequenas e, para 2030 – 100% das cidades grandes e médias e 80% das cidades pequenas.

Foi considerado impossível atingir 100% de encaminhamento adequado dos RSU pelas cidades pequenas mesmo no cenário de alta ambição, visto encontrarem-se, especialmente na região amazônica, municípios isolados, com dificuldades claras de operação de sistemas de disposição final adequados e obtenção de recursos.

Nesse sentido, durante o CEC 4 foi proposta a revisão desses parâmetros, considerando, como anteriormente indicado, para o cenário governamental, 100% das cidades grandes

encaminhando seus resíduos sólidos para aterros sanitários já em 2020 e 100% das cidades médias somente em 2030. A partir dessa referência, o cenário de mitigação adicional 1 (MA1) passa a ser para cidades grandes 100% em 2018 e de mitigação adicional 2 (MA2) 100% em 2016; as cidades médias atingindo 100% em 2025 no cenário de mitigação adicional 1 e já em 2020 no cenário de mitigação adicional 2; e, finalmente, as cidades pequenas 60% em 2030 para o cenário de mitigação 1 e 70% em 2030 para o cenário de mitigação 2.

No que se refere à ampliação do tratamento de esgotos, essa medida visa a ampliação do tratamento anaeróbio em ETEs, considerando a manutenção das condições dos demais tratamentos e da eficiência de queima do metano nos *flares* em 50% apenas nas grandes cidades. A consolidação das medidas de mitigação consideradas, por porte de cidade, é apresentada na **Tabela 7**.

Tabela 7. Medidas de mitigação e alcances considerados nos cenários do Setor de Resíduos por porte de cidades, até 2030

	Premissas	CPG	MA 1	MA 2
1	Aumento na eficiência da coleta	100% em 2030	100% em 2025	100% em 2020
2	Aumento da disposição final em aterros sanitários	100% em 2030	100% em 2025	100% em 2020
3	Encerramento de lixões e aterros controlados	100% em 2030	100% em 2025	100% em 2020
	Medidas de Mitigação	CPG	MA 1	MA 2
1	Destruição de metano em aterros sanitários			
	Cidades pequenas (<100 mil hab)	50% em 2030	60% em 2030	70% em 2030
	Cidades médias (100 à 500 mil hab)	100% em 2030	100% em 2025	100% em 2020
	Cidades grandes (> 500 mil hab)	100% em 2020	100% em 2018	100% em 2016
2	Destruição de metano em lixões e aterros controlados		10% em 2030	30% em 2030
3	Ampliação do tratamento de esgotos em ETE			
	Cidades pequenas (<100 mil hab)	40% em 2030	50% em 2030	60% em 2030
	Cidades médias (100 à 500 mil hab)	40% em 2030	50% em 2030	70% em 2030
	Cidades grandes (> 500 mil hab)	60% em 2030	70% em 2030	85% em 2030

Fonte: IES-Brasil (2014).

b) Medidas inicialmente sugeridas pelo Comitê de Elaboração de Cenários, mas não modeladas

A medida 6 da Tabela 6, geração de energia elétrica, foi considerada inviável economicamente, como mencionado anteriormente. As medidas 7 e 8 referentes à redução de recicláveis secos e úmidos dispostos em aterros sanitários estão associadas à ampliação dos sistemas de coleta seletiva, pelos municípios, e de logística reversa, ainda em discussão no nível nacional com

vistas aos acordos setoriais. Associam-se a essas estratégias os aspectos de geração de trabalho e renda para catadores e a ampliação dos chamados “empregos verdes” ligados à indústria da reciclagem.

As metas apontadas no PLANARES indicam percentuais de resíduos secos desviados dos aterros sanitários de 22% em 2015; 34% em 2023e 45% em 2031. Para os resíduos úmidos, as metas são de 19% em 2015; 28% em 2023 e 53% em 2031. Vistas as dificuldades de se atingir tais metas, estas não foram consideradas, no momento, tendo em vista que para o tema de emissões neste setor, são relevantes apenas as reduções referentes à madeira e papelão, cuja parcela é pouco significativa no conjunto dos recicláveis secos.

A nona e décima medidas da tabela 6, sobre o incremento no tratamento de resíduos em usinas térmicas e de biodigestores anaeróbicos não foram consideradas nos cenários de mitigação, pois hoje 60% dos municípios brasileiros ainda não dispõem sequer de um local adequado para destinação de seus resíduos e tanto a Política Nacional de Resíduos Sólidos, como o Plano Nacional de Resíduos preveem o aterro sanitário como solução imediata, bem como preconizam investimentos da ordem de bilhões de reais para serem aplicados além de 2030, considerando que um aterro sanitário é projetado para ter uma vida útil de 20 anos, portanto minimamente de 2035 a 2040. Essas medidas deverão ser mais bem avaliadas num cenário futuro de 2050.

A medida 11 da Tabela 6 refere-se ao tratamento de esgotos domésticos e industriais, com metas de baixa ambição já prevista no Cenário de Plano Governamental, que considerou já 40% de tratamento em 2030, portanto as metas foram reformuladas para 60% e 80%, para os dois cenários de mitigação adicional, respectivamente.

A última medida não foi considerada uma vez que neste momento é impossível prever tal eficiência da tecnologia proposta.

2.1. Cenário de Mitigação Adicional 1 (MA1)

2.1.1. Medidas de mitigação já previstas no CPG cujo alcance foi ampliado

Tabela 8. Medidas de mitigação adicional ampliadas a partir do CPG (MA1)

Destruição de metano em aterros sanitários		CPG	MA 1
1	Cidades pequenas (<100 mil hab)	50% em 2030	60% em 2030
	Cidades médias (100 à 500 mil hab)	100% em 2030	100% em 2025
	Cidades grandes (> 500 mil hab)	100% em 2020	100% em 2018
Ampliação do tratamento de esgotos em ETE			
3	Cidades pequenas (<100 mil hab)	40% em 2030	50% em 2030
	Cidades médias (100 à 500 mil hab)	40% em 2030	50% em 2030
	Cidades grandes (> 500 mil hab)	60% em 2030	70% em 2030

Fonte: IES-Brasil (2014).

2.1.2. Novas medidas de mitigação

Tabela 9. Medida de mitigação adicional adotadas a partir do Planares (MA1)

Medida de Mitigação		CPG	MA 1
2	Destruição de metano em lixões e aterros controlados	-	10% em 2030

Considerando as medidas de mitigação adicional de acordo com as premissas elencadas nos CEC 2, 3 e 4, a configuração dos cenários apresentou o seguinte potencial de redução de emissões para o setor de resíduos.

2.1.3. Resultados alcançados no MA1

Tabela 10. Custo de mitigação no setor de resíduos sólidos, no MA1

Medida	Custo unitário de mitigação	Potencial de mitigação em 2030	Potencial de mitigação no período (2010-2030)	Custo total de mitigação no período (2010-2030)
	US$ 1,0/tCO_2e	MtCO_2e evitadas	MtCO_2e evitadas	US$ milhão
Destruição de metano em aterros	9,279	30,573	514,13	4.770,30
Destruição de metano em lixões e aterros controlados e remediados	13,073	5,010	82,84	1.082,96
TOTAL		35,583	596,97	5853,26

Fonte: IES-Brasil (2014).

Vale destacar que, considerando o atual cenário de avanços no campo do saneamento básico e, em particular, no campo da disposição final dos resíduos sólidos urbanos, essas medidas de mitigação não serão de fácil cumprimento. Por um lado, ainda há fortes resistências das municipalidades – representadas pelos movimentos e entidades municipalistas e de prefeitos – em assumir e manter metas e prazos para eliminação de lixões, agora com perspectiva de alteração da lei nº 12.305 no Congresso Nacional. Além disso, não se identifica qualquer linha de financiamento específico à remediação dos lixões, mesmo que desativados, ou seja, seguiriam emitindo o metano acumulado. Os principais investimentos em aterros sanitários, com destruição do metano e atraentes para o investimento privado já ocorrerão, outros, em escala com atratividade financeira ao capital privado, dependerão da formação de consórcios públicos intermunicipais e de aprimoramento das gestões municipais, de sistemas de PPPs e também da capacidade de pagamento das próprias municipalidades, que ainda resistem, na maioria dos casos, em cobrar taxas e tarifas adequadas.

As observações indicadas no item 1.3.1.1 quanto às dificuldades de implementação as medidas de mitigação se reproduzem para as medidas adicionais.

2.2. Cenário de Mitigação Adicional 2 (MA2)

2.2.1. Medidas de mitigação já previstas no MA1 cujo alcance foi ampliado.

Tabela 11. Medidas de mitigação adicional ampliadas a partir do cenário de mitigação adicional 1 (MA2)

Destruição de metano em aterros sanitários		MA 1	MA 2
1	Cidades pequenas (<100 mil hab)	60% em 2030	70% em 2030
	Cidades médias (100 à 500 mil hab)	100% em 2025	100% em 2020
	Cidades grandes (> 500 mil hab)	100% em 2018	100% em 2016
2	Destruição de metano em lixões e aterros controlados	10% em 2030	30% em 2030
Ampliação do tratamento de esgotos em ETE			
3	Cidades pequenas (<100 mil hab)	50% em 2030	60% em 2030
	Cidades médias (100 à 500 mil hab)	50% em 2030	70% em 2030
	Cidades grandes (> 500 mil hab)	70% em 2030	85% em 2030

2.2.2. Novas medidas de mitigação

Não foram consideradas novas medidas de mitigação

2.2.3. Resultados alcançados no MA2

Tabela 12. Custo de mitigação no setor resíduos sólidos, no MA2

Medida	Custo unitário de mitigação	Potencial de mitigação em 2030	Potencial de mitigação no período (2010-2030)	Custo total de mitigação no período (2010-2030)
	US$ 1,0/tCO_2e	$MtCO_2e$ evitadas	$MtCO_2e$ evitadas	US$ milhão
Destruição de metano em aterros	9,753	30,816	517,80	5.050,12
Destruição de metano em lixões e aterros controlados remediados	11,914	5,586	90,90	1.082,96
TOTAL		36,402	608,70	6133,08

Fonte: IES Brasil (2015)

Repetem-se para o cenário de mitigação adicional 2 (MA2) as observações indicadas quanto às dificuldades de implementação das medidas de mitigação.

3. Análise Comparativa dos Cenários CPG, MA1 e MA2

A **Tabela 13** e as Figuras Figura **3** e **Figura 4** apresentam uma comparação entre os cenários de Planejamento Governamental (CPG) e de mitigação adicional 1 e 2 (MA1 e MA2), considerando intervalos decenais, indicando que:

1. Há reduções expressivas na comparação do CPG versus os esforços previstos no MA1 e MA2;
2. As maiores reduções de emissão de GEE ocorrem até 2020 (função de maior ou menor condição de implementação das políticas públicas no setor); e
3. A partir de 2020, não há aumento de reduções expressivas nas emissões de GEE em qualquer dos cenários, pois o impacto é pequeno nas projeções das pequenas e médias cidades, uma vez que as grandes cidades já estão atendendo quase totalmente às políticas de saneamento.

Tabela 13. Emissões totais dos cenários no setor de resíduos (Mt CO_2e)

Mt CO_2e	1990	2000	2010	2020	2030
CPG	26,003	38,690	58,100	80,479	86,744
MA1	26,003	38,690	58,100	54,738	55,182
MA2	26,003	38,690	58,100	54,669	55,182

Fonte: 1990 -2010 Terceiro Inventário de Emissões de GEE (MCTI, 2014, versão para Consulta Pública). Demais anos, autores.

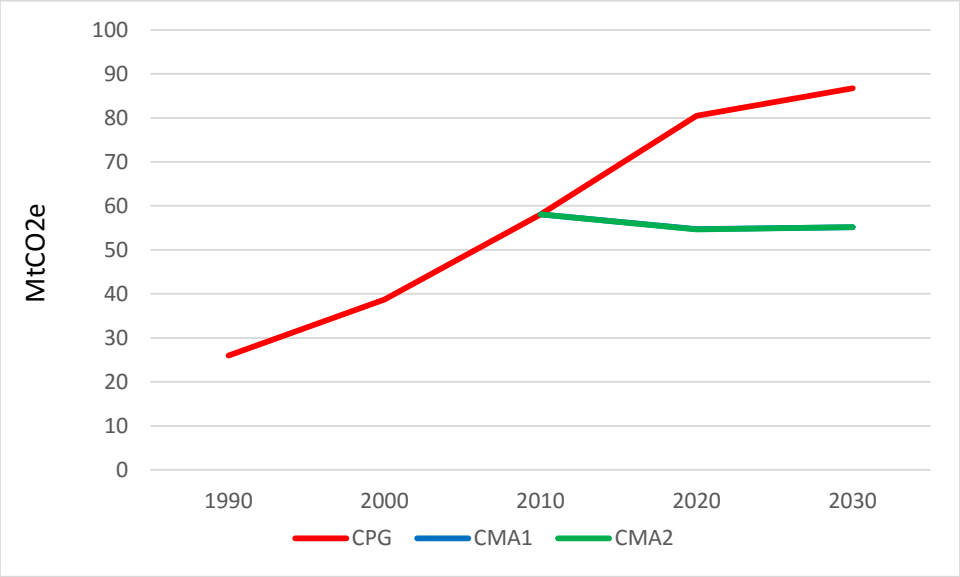


Figura 3. Evolução das emissões totais dos cenários no Setor de Resíduos de 1990 a 2030

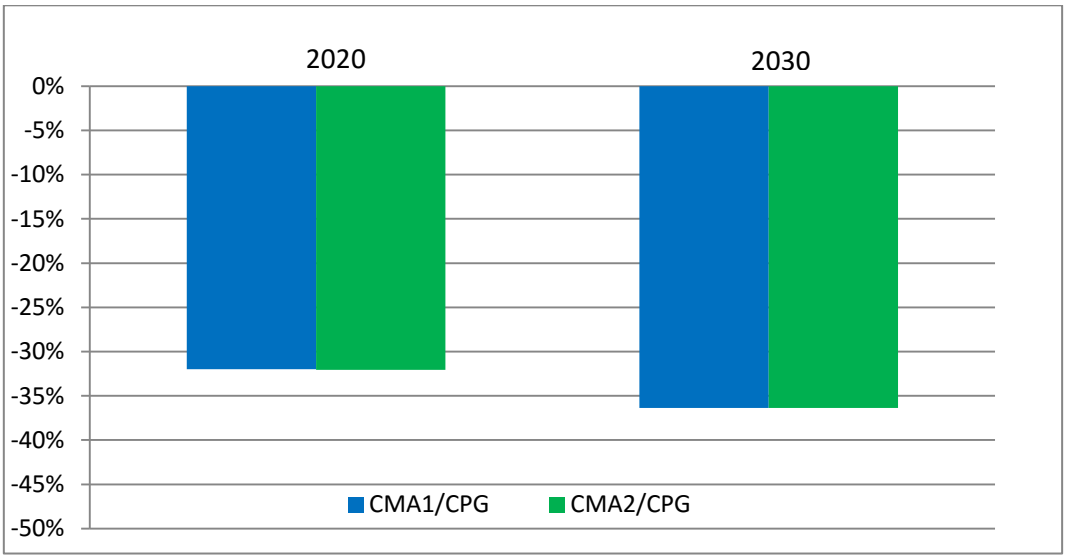


Figura 4. Variação das emissões nos cenários de mitigação adicional (MA1 e MA2) em relação ao cenário de plano governamental (CPG) - 2020 e 2030

Considerações Finais

É importante destacar que, para o setor de resíduos, há discrepâncias relevantes nos dados apresentados e utilizados nos vários documentos, bem como impossibilidades de se comparar séries históricas com dados confiáveis. Isto porque, na maioria dos casos, as fontes de informação são oriundas dos próprios municípios, que por seu turno, segundo suas características, porte e estruturas, não dispõem de sistemas de informação permanentes e consistentes nesse campo. Há, portanto, especial dificuldade quanto á confiabilidade dos dados, na definição de custos médios de investimento e operação, visto que não há valores unitários universalmente assumidos. Para cada escala e opção tecnológica, bem como em função de características regionais e locais, os valores podem variar significativamente. Por essa razão, os dados disponíveis são checados e adequados a partir de fontes ou projetos específicos que possam permitir sua extrapolação. Os membros do CEC contribuíram quando possível com outras fontes de informação.

Nas revisões solicitadas pelo CEC, o grande desafio foi o de modelar a evolução da população de todas as grandes e médias cidades no período (cerca de 350), identificando as que,

paulatinamente, ultrapassavam os limites antes indicados e se incorporavam aos grupos superiores de população.

Além disso, considerando que, apesar do grande número de municípios pequenos (5.282 em 2010), sua população corresponde a menos de 30% do total da população do país e nestes, há grande percentual de população rural, observam-se variações pouco significativas entre os cenários de mitigação adicional 1e 2 (de baixa e alta ambição).

ANEXO METODOLÓGICO

Resíduos Sólidos

A produção de resíduos sólidos é função do crescimento populacional e da geração per capita. Esta por sua vez varia conforme o incremento do PIB, projetado a partir de sua tendência histórica.

$$W_T\ (t) = Pop_T\ (hab) \times geração\ per\ capita_T\ (kg/hab) / 10^3$$

(Equação 1)

$$Geração\ per\ capita_T(x,kg) = f\ [PIB\ per\ capita_T\ (R\$/hab),\ w(x,kg)]$$

(Equação 2)

onde:

W_T (t) é o total de resíduo gerado em toneladas no ano T;

Pop_T (hab) é a população em habitantes no ano T;

Geração per $capita_T$ (kg/hab) é a taxa de resíduo por habitante no ano T;

PIB per $capita_T$ (R$/hab) é o Produto Interno Bruto por habitante no ano T;

w (x,kg) é a função tendência de geração per capita de resíduo.

- **Aterramento**

Para se estimar as emissões de aterramento de resíduos sólidos, usou-se a seguinte equação básica (Equação 3) para o decaimento de primeira ordem:

$$DDOCm = DDOCm(0) \times e^{-kt}$$

(Equação3)

onde:

DDOC é o carbono orgânico degradável que se decompõe (em condições anaeróbias);

DDOCm é a massa de DDOC a qualquer tempo;

DDOCm(0) é a massa de DDOC no início da reação, quando t = 0 e, portanto, $e^{-kt} = 1$;

k é a constante de reação = **ln (2) / $t_{1/2}$ (y^{-1})** , sendo:

- $t_{1/2}$ = meia vida (y);
- y = years (em português, anos);
- t é o tempo em anos.

Da Equação 3é possível perceber que ao final do ano 1 (indo do ponto 0 ao ponto 1 no eixo do tempo) a massa de DDOC deixada não decomposta nos aterros será:

$$DDOCm(1) = DDOCm(0) \times e^{-k}$$

(Equação 4)

e a massa de DDOC decomposta entre CH_4 e CO_2 será:

$$DDOCm_{decomp}(1) = DDOCm(0) \times (1 - e^{-k})$$

(Equação 5)

onde:

$DDOCm_{decomp}(1)$ é a massa total de DDOC decomposta no ano 1;

k é a razão da constante de reação.

Em uma reação de primeira ordem, o total do produto (aqui o DDOCm decomposto) é sempre proporcional à quantidade de reagente (aqui o DDOCm). Isto significa que independe de quando o DDOCm foi depositado e que quando o total de DDOCm acumulado no aterro mais o depósito do último ano são conhecidos, a produção de CH_4 poderá ser calculada como se cada ano fosse o ano um na série de tempo. Desta forma, todos os cálculos poderão ser feitos pelas Equações 4e 5.

A premissa básica parte do princípio que a geração de CH_4 de toda massa de resíduo depositado a cada ano começará em 1º de janeiro do ano seguinte. Isto é o mesmo que uma média de seis meses de defasagem até que a geração substancial de CH_4 comece (o tempo que leva para a condição anaeróbia se tornar bem estabelecida), portanto, se usou a Equação 6para o cálculo da massa de DOC degradável (DDOCm) de uma quantidade de lixo (W):

$$DDOCm_d(T) = W(T) \times DOC \times DOCf \times MCF$$

(Equação 6)

onde:

T é o ano do inventário;

DDOCmd(T) é a massa de DDOC depositada no ano T;

W(T) é o total do lixo depositado no ano T;

DOC é o carbono orgânico degradável (sob condições anaeróbias);

DOCf é a fração de DOC que se decompõe sob condições anaeróbias;

MCF é o fator de correção de metano.

O DOC (Carbono Organicamente Degradável) refere-se ao teor de carbono de cada componente do lixo que degrada, como papéis e papelões, folhas, madeiras e matéria orgânica total. Devido à falta de um padrão nacional para o fator correspondente à participação percentual do peso úmido de cada componente do resíduo, foram utilizados os valores padronizados pelo IPCC (2006), conforme a Equação 7a seguir:

$$DOC = (0{,}40 \times \%\ papel/papelão) + (0{,}24 \times \%\ têxteis) + (0{,}15 \times \%\ restos\ alimentares) + (0{,}43 \times \%\ madeiras) + (0{,}20 \times \%\ folhas) + (0{,}24 \times \%\ fraldas) + (0{,}39 \times \%borracha/couro)$$

(Equação 7)

O DOCf (fração do DOC que realmente degrada) depende de muitos fatores, como temperatura, umidade, pH, composição gravimétrica, dentre outros. Devido ao processo de degradação anaeróbia ser incompleto, só se degrada uma parte do carbono potencialmente degradável. O valor sugerido pelo IPCC (2006) e adotado pelo MCTI (2010) é de 50%, ou seja, considera-se que metade do carbono não seja emitida ou parte do carbono organicamente degradável irá se degradar muito tardiamente.

O MCF (fator de correção do metano) varia em função das condições de anaerobiose de cada tipo de local de disposição. No caso de simples vazadouros, ou lixões, é adotado 0,4 para aqueles com células de até cinco metros e 0,8 para aqueles com células maiores que cinco metros, condição aproximada de aterro controlado. No caso de aterros sanitários, situação em que há uma disposição planejada de resíduos, este fator é1,0, ou seja, considera-se que 100% dos resíduos estarão dispostos em condições de anaerobiose. Quando não há informações sobre as condições de aterramento, o IPCC (2006) recomenda que se adote para este fator 0,6.

O total de DDOCm depositada, remanescente, não decomposta, ao final da disposição no ano T foi calculada pela Equação 8:

$$DDOCm_{rem}(T) = DDOCm_{d}(T) \times e^{-k(13-M)/12}$$

(Equação 8)

onde:

T é o ano do inventário;

$DDOCm_{rem}(T)$ é a massa de DDOC depositada no ano T do inventário, permanecendo não decomposta ao final do ano T;

$DDOCm_{d}(T)$ é a massa de DDOC depositada no ano T;

k é a razão da constante de reação;

M é o mês do início da reação (= tempo de atraso/defasagem + 7).

O total de DDOC depositado, decomposto durante a disposição no ano T foi calculado pela Equação 9:

$$DDOCm_{dec}(T) = DDOCm_{d}(T) \times (1 - e^{-k(13-M)/12})$$

(Equação 9)

onde:

T é o ano do inventário;

$DDOCm_{dec}(T)$ é a massa de DDOC depositada no ano T do inventário, decomposta durante o ano;

$DDOCm_{d}(T)$ é a massa de DDOC depositada no ano T;

k é a razão da constante de reação;

M é o mês do início da reação (= tempo de atraso/defasagem + 7).

A quantidade de DDOCm acumulada no aterro ao final do ano T foi calculada pela Equação 10:

$$DDOMA(T) = DDOCm_{rem}(T) + DDOMA(T - 1) \times e^{-k}$$

(Equação 10)

onde:

T é o ano do inventário;

DDOMA(T) é a massa total de DDOC deixada e não decomposta ao final do ano T;

$DDOCm_{rem}(T)$ é a massa de DDOC depositada no ano T do inventário, permanecendo não decomposta ao final do ano T;

DDOMA(T-1) é a massa total de DDOC deixada não decomposta ao final do ano T-1;

k é a razão da constante de reação.

O total de DDOCm decomposta no ano T foi calculado pela Equação 11:

$$DDOCm_{decomp}(T) = DDOCm_{dec}(T) + DDOMA(T - 1) \times e^{-k}$$

(Equação 11)

onde:

T é o ano do inventário;

$DDOCm_{decomp}(T)$ é a massa total de DDOC decomposta no ano T;

$DDOCm_{dec}(T)$ é a massa de DDOC depositada no ano T do inventário, decomposta durante o ano;

DDOMA(T-1) é a massa total de DDOC deixada não decomposta ao final do ano T-1;

k é a razão da constante de reação.

Ressalta-se que somente a geração de CH_4 é calculada a partir destas equações, tendo em vista que o CO_2 gerado, por ter origem biogênica, não é impactante no clima, conforme descrito no início desta seção. Dessa forma, o total de CH_4 gerado do DOC decomposto será calculado pela Equação 12 seguinte:

$$CH_{4\ gerado}(T) = DDOCm_{decomp}(T) \times F \times 16/12$$

(Equação 12)

onde:

T é o ano do inventário;

$CH_{4\ gerado}(T)$ é o CH_4 gerado no ano T;

$DDOCm_{decomp}(T)$ é a massa total de DDOC decomposta no ano T;

F é a fração de CH_4 por volume no gás gerado no aterro;

16/12 é a razão de peso molecular do CH_4/C;

A fração de carbono emitida como metano (F) adotada pelo MCTI (2010) é de 50%, significando que os outros 50% da composição do biogás gerado não é metano. Portanto, o total de CH_4 emitido foi dado pela Equação 13 a seguir:

$$CH_{4emitido}(T) = [\ \sum_x CH_{4gerado}(x,T) - R(T)\ ] \times [\ 1 - OX(T)\ ]$$

(Equação 13)

onde:

T é o ano do inventário;

$CH_{4emitido}(T)$ é o CH_4 emitido no ano T;

x é a fração de material/categoria de lixo;

CH_4 gerado(x,T) é o CH_4 gerado pela fração de lixo x no ano T;

R(T) é o CH_4 recuperado no ano T;

OX(T) é o fator de oxidação no ano T (fração).

O metano recuperado (R) refere-se à parcela recuperada do biogás para ser queimada em *flares* ou aproveitada para fins energéticos, o que reduz ainda mais as emissões líquidas. Ao ser queimado, o CH_4 se transforma em CO_2, que por ser de origem renovável, como é o caso do lixo, não aumentará a concentração de gases de efeito estufa na atmosfera.

O fator de oxidação (OX) relaciona-se à fração dos resíduos e dos gases que sofre queima espontânea nos locais de disposição, portanto não gerando metano. Foi utilizado o valor padronizado pelo MCTI (2010) para esta variável conforme a condição anaeróbia da massa de resíduo aterrada, ou seja, 10% para lixões, 5% para aterros controlados e 0 (zero) em aterros sanitários.

- **Tratamento biológico (compostagem e biodigestão)**

Para se estimar as emissões de CH_4 e de N_2O pelo tratamento biológico (compostageme biodigestão), foram utilizadas as Equações 14 e 15 a seguir:

$$\textit{Emissões de } CH_4 = \sum (\ M_i \times EF_i\ ) \times 10^{-3} - R$$

(Equação 14)

onde:

Emissões de CH_4 são as emissões totais de CH_4 no ano do inventário (10^3 tCH_4);

M_i é a massa de resíduos orgânicos tratados por tratamento biológico do tipo i (10^3 t);

EF_i é o fator de emissão para o tratamento i (= 4 gCH_4/kg de resíduo tratado);

i = compostagem ou digestão anaeróbia;

R é o total de CH_4 recuperado no ano do inventário (10^3 tCH_4); e

$$\textit{Emissões de } N_2O = \sum (M_i \times EF_i) \times 10^{-3}$$

(Equação 15)

onde:

Emissões de N_2O são as emissões totais de N_2O no ano do inventário (10^3 tN_2O);

M_i é a massa de resíduos orgânicos tratados por tratamento biológico do tipo i (10^3 t);

EF_i é o fator de emissão para o tratamento i (= 0,3 gN_2O/kg de resíduo tratado);
i = compostagem.

- **Incineração**

Tanto a incineração controlada (quando há uma usina para tal fim específico) quanto à incineração (ou queima) a céu aberto de resíduos emitem CO_2, CH_4 e N_2O, sendo que as emissões de CO_2 são as mais relevantes neste processo. Ressalte-se, entretanto, que somente as emissões de CO_2 de produtos não biogênicos devem ser contabilizadas, que é o caso das emissões de plásticos, borrachas convencionais, solventes, restos de petróleo e derivados. No caso de papéis, restos alimentares e resíduos de madeira de manejo florestal, estas emissões não resultam em aumento de CO_2 na atmosfera, pois são cíclicas e de origem biogênica.

As emissões de metano, por sua vez, são relevantes e ocorrem em incinerações a céu aberto, devido à queima incompleta pela ausência de sistemas de controle. As emissões de N_2O serão consideradas apenas nos casos onde a temperatura de queima for baixa (entre 500 e 950°C). Para se estimar as emissões de CO_2, CH_4 e N_2O da incineração, foram utilizadas as Equações 16, 17 e 18.

$$\textit{Emissões de } CO_2 = \sum (SW_i \times dm_i x CF_i \times FCF_i \times OF_i) \times 44/12$$

(Equação 16)

onde:

Emissões de CO_2 são as emissões de CO_2 no ano do inventário (10^3 t/ano);

SW_i é o total de resíduos do tipo i (em peso seco) incinerado (10^3 t/ano);

dm_i é a fração (conteúdo) de matéria seca no resíduo (em peso seco) incinerado;

CF_i é a fração de carbono na matéria seca (conteúdo total de carbono);

FCF_i é a fração de carbono fóssil no total de carbono;

OF_i é o fator de oxidação (fração);

44/12 é o fator de conversão de C para CO_2;

i = tipo de resíduo incinerado;

$$\textit{Emissões de } CH_4 = \sum (IW_i \times EF_i) \times 10^{-6}$$
(Equação 17)

onde:

Emissões de CH_4 são as emissões no ano do inventário (10^3 t/ano);

IW_i é a quantidade de resíduo sólido incinerado do tipo i (10^3 t/ano);

EF_i é o fator de emissão de CH_4 ($kgCH_4/10^3$ t de resíduo);

10^{-6} é o fator de conversão de kg para 10^3 t;

i = categoria ou tipo de resíduo; e

$$\textit{Emissões de } N_2O = \sum (IW_i \times EF_i) \times 10^{-6}$$
(Equação 18)

onde:

Emissões de N_2O são as emissões no ano do inventário (10^3 t/ano);

IW_i é a quantidade de resíduo incinerado do tipo i (10^3 t/ano);

EF_i é o fator de emissão de N_2O ($kgN_2O/10^3$ t de resíduo) para resíduo do tipo i;

10^{-6} é o fator de conversão de kg para 10^3 t;

i = categoria ou tipo de resíduo incinerado.

Efluentes

Os passos para calcular as emissões de metano dos esgotos foram os seguintes:

- Obter o incremento da população no período;

- Estimar a carga orgânica total do efluente (Equação 19);
- Obter o fator de emissão para cada sistema ou caminho de tratamento/descarte do efluente;
- Utilizar a equação 20 para estimar as emissões, ajustando se há remoção do lodo ou recuperação do metano e somando os resultados para cada sistema/caminho.

A quantidade total de material orgânico degradável contido no esgoto/efluente (COT) foi função da população e da DBO gerada por pessoa e expresso em kg de DBO/ano.

$$COT = P \times DBO \times 0{,}001 \times I$$

(Equação 19)

onde:

COT é a carga orgânica total do efluente no ano do inventário (kg DBO/ano);
P é a população no ano do inventário;
DBO é a demanda bioquímica de oxigênio per capita no ano do inventário (g/pessoa/ano);
0,001 é a conversão de g DBO para kg DBO;
I é o fator de correção para descarte adicional de DBO industrial na rede coletora.

A equação geral para estimar as emissões de CH_4 de efluentes líquidos foi a seguinte:

$$\text{Emissões de } CH_4 = (FE_j \times (COT - S)) - R$$

(Equação 20)

onde:

Emissões de CH_4 são as emissões de metano no ano do inventário ($kgCH_4$/ano);
FE_j é o fator de emissão ($kgCH_4$/kgDBO);
j é o sistema ou caminho do tratamento/disposição;
COT é a carga orgânica total no esgoto no ano do inventário (kgDBO/ano);
S é o componente orgânico removido como lodo no ano do inventário (kgDBO/ano);
R é a quantidade de metano recuperada no ano do inventário ($kgCH_4$/ano);

Os dados necessários para se estimar as emissões de N_2O foram: o conteúdo de nitrogênio no efluente, a população e a geração per capita média anual de proteína (kg/pessoa/ano). Esta geração de proteína per capita consistiu no consumo humano, multiplicado por fatores que

contabilizam a proteína não consumida e a proteína descartada por indústrias nos sistemas de esgotos. Para estes fatores foram utilizados os valores padrões do IPCC (2006) para os países em desenvolvimento da América do Sul, de 1,1, para proteína não consumida e descartada, e 1,25, para fontes industriais e comerciais. Estimou-se o nitrogênio total contido nos efluentes pela Equação 21.

$$N_{efluente} = (P \times Proteína \times F_{NPR} \times F_{não\text{-}con} \times F_{ind\text{-}com}) - N_{lodo}$$

(Equação 21)

onde:

$N_{efluente}$ é o total anual de nitrogênio no efluente (kgN/ano);

P é a população;

Proteína é o consumo de proteína per capita anual;

F_{NPR} é a fração de nitrogênio na proteína (padrão = 0,16 kg N / kg proteína);

$F_{não\text{-}con}$ é o fator para proteína não consumida adicionada ao efluente;

$F_{ind\text{-}com}$ é o fator para proteína descartada no efluente pela indústria e pelo comércio;

N_{lodo} é o nitrogênio removido com o lodo (padrão = 0 kg N / ano).

A equação geral simplificada para calcular as emissões de N_2O foi a seguinte:

$$Emissões\ de\ N_2O = N_{efluente} \times FE_{efluente} \times 44/28$$

(Equação 22)

onde:

Emissões de N_2O são as emissões de óxido nitroso no ano do inventário (kgN_2O/ano);

$N_{efluente}$ é o nitrogênio presente no efluente descartado no ambiente aquático (kgN/ano);

$FE_{efluente}$ é o fator de emissão (kg N_2O-N / kg N);

44/28 é o fator equivalente à conversão da massa molecular de N_2O-N por N_2O.

O fator de emissão para um sistema ou caminho de tratamento e disposição de esgotos é função do potencial máximo de produção de metano (B_0) e do fator de correção do metano (FCM) para aquele sistema. O B_0 é a quantidade máxima de metano que pode ser produzido por uma dada quantidade de carga orgânica contida no efluente ($kgCH_4$/kgDBO) e o FCM indica a capacidade de produção de metano em cada tipo de sistema ou caminho de tratamento e disposição.

$$FE = B_0 \times FCM$$

(Equação 23)

Não havendo valores específicos para o potencial máximo de produção de metano (B_0), foi adotado o valor padrão de 0,6 $kgCH_4$/kgDBO (IPCC, 2006). A partir dos valores fornecidos para o FCM, de acordo com os tipos de destinações identificados, foram utilizados como fatores de emissão (FE) os valores calculados, como mostra a **Tabela 14**.

Tabela 14. Fatores de Correção do Metano (FCM) e respectivos Fatores de Emissão (FE)

Tipo de tratamento ou descarte	FCM	FE
Descarte em rios, mar ou lagoas/lagos	0,10	0,06
Valões estagnados	0,50	0,30
Valões com fluxo ou rede de coleta	0,00	0,00
Planta de tratamento aeróbica, centralizada (bem operada)	0,00	0,00
Planta de tratamento aeróbica, centralizada (mal operada ou saturada)	0,20	0,12
Digestor anaeróbico para lodo	0,80	0,48
Reator anaeróbico	0,80	0,48
Lagoa rasa anaeróbica	0,00	0,00
Lagoa profunda anaeróbica	0,80	0,48
Fossas sépticas	0,50	0,30
Latrina (clima seco, lençol freático profunda, famílias pequenas)	0,05	0,03
Latrina (clima seco, lençol freático profundo, uso comum por várias pessoas)	0,40	0,24
Latrina (clima úmido, lençol freático raso)	0,70	0,42
Latrina (remoção periódica do sedimento para uso como fertilizante)	0,10	0,06

Fonte: IPCC (2006).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2010*. São Paulo, 2011.

_____. *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2011*. São Paulo, 2012.

_____. *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2012*. São Paulo, 2013.

_____. *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2013*. São Paulo, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12209*: Projeto de estações de tratamento de esgoto sanitário - procedimento. Rio de Janeiro, 1992, 12 p.

AUSTRALIA BUREAU OF STATISTICS. *Australian Historical Population Statistics*. Camberra, 2008. Disponível em: <http://www.abs.gov.au/AUSSTATS/abs@.nsf/ DetailsPage/3105.0.65.0012008?OpenDocument>. Acesso em: 16 dez. 2012.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Institui a Política Nacional de Saneamento Básico, 2007.

_____. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, 2010a.

_____. Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010. Regulamenta a Lei nº 12.305, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, 2010b.

EUROPEAN COMMISSION. *Treatment of waste*. Brussels: Eurostat, 2012. Disponível em: <http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=env_wastrt&lang=en>. Acesso em: 8 abr. 2012.

EUROPEAN COMMISSION. *Sustainable development indicators - Theme 6: Climate Change and Energy*. Brussels: Eurostat, 2013. Disponível em: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/sdi/indicators/theme6>. Acesso em: 24 fev. 2013.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. *Annual European Union greenhouse gas inventory 1990–2010 and inventory report 2012***.** Brussels: EEA/European Commission/DG Climate Action, technical report n. 3, 2012. 1.068 p.

FARIA, Flávia dos Santos. 2002, *Índice da Qualidade de Aterros de Resíduos Urbanos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2002. 355 p.

GOUVELLO, Christophe de; SOARES FILHO, Britaldo S.; SCHAEFFER, Roberto; NASSAR, André; ALVES, Fuad Jorge; ALVES, João Wagner Silva. *Brazil Low-Carbon Country Case Study*. Washington, DC: The World Bank, Energy Sector Management Assistance Program, 2010. 280 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008*. Rio de Janeiro, 2010. ISBN 978-85-240-4135-8. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 11 ago. 2014.

_____. *Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios – PNAD*.Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 02 out. 2014.

INTERNATIONAL COUNCIL FOR LOCAL ENVIRONMENTAL INITIATIVES. *The carbon cities climate registry*. 2012. Disponível em: <http://www.iclei.org/en/search/details.html?tx_ttnews[tt_news]=3133>. Acesso em: 16 dez. 2012.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. Comunicados do IPEA no. 135. Plano Nacional de Resíduos Sólidos: diagnóstico dos resíduos urbanos, agrosilvopastoris e a questão dos catadores, Brasília, 2012

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Emissions Scenarios: Summary for Policymakers*. A Special Report of IPCC Working Group III. Geneva, 2000. 20 p. ISBN: 92-9169-113-5.

_____. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme; Eggleston H.S.; Buendia L.; Miwa K.; Ngara T.; Tanabe K. (eds). Hayama, Japan: IGES, 2000. ISBN 4-88788-032-4.

LOUREIRO, Saulo Machado. *Índice de Qualidade no Sistema da Gestão Ambiental em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos – IQS*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.

LOUREIRO, Saulo Machado; ROVERE, Emilio Lèbre La; MAHLER, Cláudio Fernando. Analysis of potential for reducing emissions of greenhouse gases in municipal solid waste in Brazil, in the State and City of Rio de Janeiro. *International Journal of Integrated Waste Management, Science & Technology*. Oxford, UK, v. 33, n. 5, p. 1302-1312, mar. 2013. ISSN 0956-053X.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. *Comunicação Nacional Inicial do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima*. Brasília, DF: MCTI, Relatórios técnicos de referência, 2004.

_____. *II Inventário brasileiro de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa não controlados pelo protocolo de Montreal*. Ed. Alves, J. W. S.; Vieira, S. M. M. São Paulo: Cetesb, 2010.

_____. *Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil*. Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento – SEPED, Coordenação Geral de Mudanças Globais de Clima – CGMC. Brasília, DF. 2013. 80 p.

_____. *III Inventário brasileiro de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa não controlados pelo protocolo de Montreal.* Brasília, DF: MCTI, Relatórios técnicos de referência, versão para consulta pública, 2015.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. *Plano Nacional de Saneamento Básico – PLANSAB*. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília, DF, 2013.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. *Plano Nacional de Resíduos Sólidos – PLANARES*. Brasília, DF, 2012.

MONTEIRO, Alessandra Elias. *Índice de Qualidade em Aterros de Resíduos Sólidos Industriais – IQRI*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.

ROMER, D. *Advanced Macroeconomics*. New York: McGraw-Hill, 1996. p. 5-25. ISBN 0-07-053667-8.

ROVERE, Emilio Lèbre La;DUBEUX, Carolina Burle Schmidt; COSTA, Ângela Oliveira; OLIVEIRA, Luciano Basto; BUZZATTI, Marcelo Golin; PORTO, Paulina; ROSA, Tereza da Silva; WILLS, Willian; COSTA, Claudia do Valle; AQUINO, Luiz Carlos Sérvulo; REAL, Márcia Valle. *Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Estado do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro: Centro Clima/COPPE/LIMA, 2007. 304 p.

ROVERE, Emilio Lèbre La; D'AVIGNON, Alexandre Louis; DUBEUX, Carolina Burle Schmidt; COSTA, Claudia do Valle; BUZZATTI, Marcelo Golin; WILLS, Willian; PORTO, Paulina; MEDEIROS, Anamélia; RIBAS, Rodrigo; LOUREIRO, Saulo Machado; CARLONI, Flávia Beatriz. *Inventário de emissões de gases de efeito-estufa no Estado de Minas Gerais*. Rio de Janeiro: Centro Clima/COPPE/UFRJ, 2008. 252 p.

ROVERE, Emilio Lèbre La;DUBEUX, Carolina Burle Schmidt; PEREIRA JÚNIOR, Amaro Olimpio; MEDEIROS, Anamélia; CARLONI, Flávia Beatriz; TURANO, Patrícia; SOLARI, Renzo; WILLS, Willian; HASHIMURA, Luís; BURGI, Adriano Salvi; FIORINI, Ana Carolina. *Cenários de Evolução das Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil*. Rio de Janeiro: Centro Clima/COPPE/UFRJ, 2011. 102 p.

RUSSIAN FEDERAL STATE STATISTICS SERVICE. Disponível em: <http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/en/figures/population>. Acesso em: 16 dez. 2012.

SECRETARIA DE ESTADO DO AMBIENTE DO RIO DE JANEIRO – SEA. Plano Estadual de Resíduos Sólidos, relatório-síntese. Rio de Janeiro, RJ, 2013. 138 p.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO - SNIS. *Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2012*. Brasília, DF: Ministério das Cidades, abr. 2014a. 164 p.

_____. *Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2012*. Brasília, DF: Ministério das Cidades, maio 2014b. 143 p.

VON SPERLING, M.; OLIVEIRA, S. M. Avaliação comparativa de seis tecnologias de tratamento de esgoto em termos de atendimento a padrões de lançamento. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 23, 2005. Campo Grande. Anais... Rio de Janeiro: ABES, 2005.