

Biodegradação de resíduos sólidos urbanos



Recuperação e Geotecnia Ambiental
EPUSP

Maria Eugenia Gimenez Boscov



Biodegradação de RSU

- A degradação dos resíduos sólidos urbanos dentro de um aterro ocorre por processos físicos, químicos e biológicos, gerando lixiviado e gases.



Biodegradação de RSU

- Existem diversas formas de dividir os processos de biodegradação dos RSU ao longo do tempo, podendo-se encontrar na bibliografia diferentes nomes e números de fases, conforme o nível de detalhamento e o enfoque utilizado.

- 
- A biodegradação dos RSU pode ser dividida em quatro fases: aeróbia, anaeróbia não metanogênica ou ácida, anaeróbia metanogênica não estabilizada e anaeróbia metanogênica estabilizada (Farquhar e Rovers 1973).

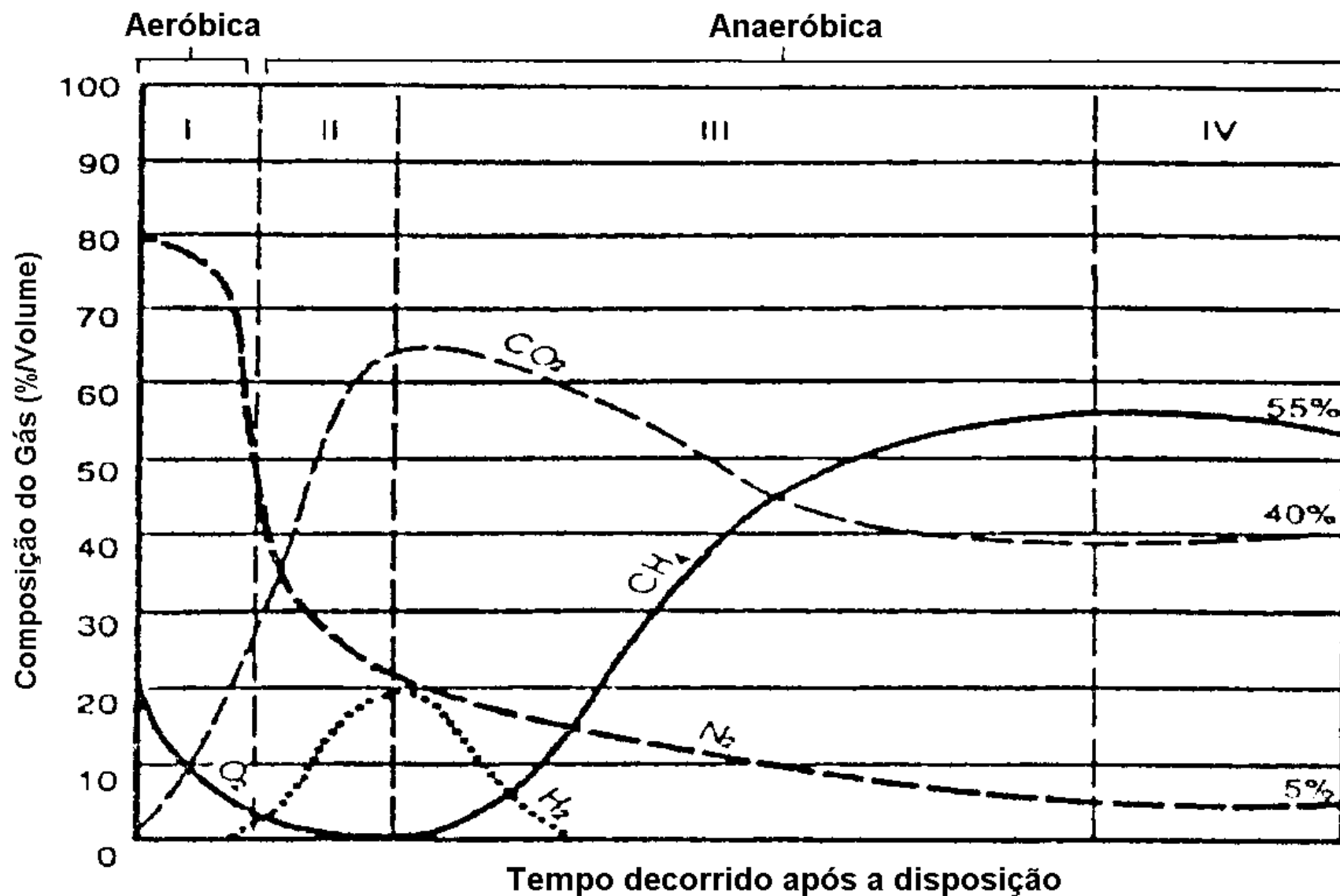
- 
- A fase inicial é aeróbia e geralmente curta, durando de poucas horas a 1 semana, pois o teor de oxigênio livre é baixo nos resíduos recentes. O oxigênio (O_2) e o nitrogênio (N_2) presentes nos resíduos recém-depositados são consumidos gerando gás carbônico (CO_2), água e calor. A temperatura conseqüentemente se eleva, chegando a atingir valores próximos a $60^\circ C$. Nesta fase ocorre degradação de 5 a 10% da matéria possível de ser degradada.

- 
- A fase inicial é aeróbia e geralmente curta, durando de poucas horas a 1 semana, pois o teor de oxigênio livre é baixo nos resíduos recentes. O oxigênio (O_2) e o nitrogênio (N_2) presentes nos resíduos recém-depositados são consumidos gerando gás carbônico (CO_2), água e calor. A temperatura consequentemente se eleva, chegando a atingir valores próximos a $60^\circ C$. Nesta fase ocorre degradação de 5 a 10% da matéria possível de ser degradada.

- 
- Consumido todo o oxigênio livre, o processo de degradação passa a ser anaeróbico. A decomposição da matéria putrescível resulta na geração de ácidos orgânicos, com pH não superior a 5 e elevados valores de DBO e DQO. Esta fase é denominada fase anaeróbia ácida, de 1 a 6 meses de duração. Nela aumenta a produção de CO_2 e ocorre a degradação de 15 a 20% da matéria sólida.

- 
- Na fase metanogênica acelerada, que dura de 3 meses a 3 anos, metano (CH_4) e ácidos são produzidos simultaneamente, com redução significativa da velocidade de produção dos últimos. Os ácidos e H_2 se transformam em CH_4 e CO_2 . O pH aumenta até 6,8 a 8, enquanto há sensível redução de DBO e DQO.

- 
- Na fase metanogênica desacelerada, cuja duração varia entre 8 a mais de 40 anos, após a conversão de grande parte da matéria orgânica em CH_4 e CO_2 , a velocidade de geração de gases diminui substancialmente. São gerados principalmente CH_4 e CO_2 , bem como pequenas quantias de N_2 e O_2 . A decomposição da matéria sólida atinge entre 50 e 70% do total.





Principais fatores intervenientes

- Granulometria
- Composição
- Idade
- Umidade
- Temperatura
- Nutrientes (qualidade e quantidade)
- pH dos líquidos presentes (DBO, DQO)
- Densidade



Digestão aeróbia

- A biodegradação aeróbia dos RSU ocorre rapidamente e cessa quando se esgota o ar presente no material depositado, enquanto a biodegradação anaeróbia pode durar por muitos anos, sendo a principal responsável pela geração de lixiviado e gases.



Digestão anaeróbia

- A digestão anaeróbia é composta das fases ácida e metanogênica.
- A fase anaeróbia ácida pode ser subdividida, em termos de atividade microbiana, em hidrólise, acidogênese e acetogênese. Como as bactérias não são capazes de assimilar a matéria orgânica particulada, inicialmente ocorre hidrólise de materiais particulados complexos, os polímeros, em materiais dissolvidos mais simples, de moléculas menores, que podem atravessar as paredes celulares das bactérias. A hidrólise é provocada por enzimas produzidas por bactérias fermentativas.



Digestão anaeróbia

- A seguir, os produtos solúveis gerados pela hidrólise são metabolizados no interior das células das bactérias fermentativas e transformados em compostos mais simples: ácidos graxos voláteis, álcoois, ácido láctico, gás carbônico, hidrogênio, amônia e sulfeto de hidrogênio. Como o principal produto das bactérias fermentativas são os ácidos graxos voláteis, elas são denominadas acidogênicas.



Digestão anaeróbia

- De todos os produtos metabolizados pelas bactérias acidogênicas, apenas o hidrogênio e o acetato podem ser utilizados diretamente pelas bactérias metanogênicas. As bactérias acetogênicas são responsáveis pela oxidação dos produtos gerados na fase acidogênica em substrato apropriado para as bactérias metanogênicas. Os produtos gerados pelas bactérias acetogênicas são o hidrogênio, o dióxido de carbono e o ácido acético. A grande quantidade de hidrogênio resultante da geração de ácido acético diminui o pH no meio aquoso.



Digestão anaeróbia

- A etapa final é a metanogênica. As bactérias metanogênicas utilizam somente um limitado número de substratos, compreendendo ácido acético, hidrogênio, dióxido de carbono, ácido fórmico, metanol, metilaminas e monóxido de carbono. Os compostos orgânicos são finalmente degradados em metano e dióxido de carbono



Geração de biogás

- A estimativa de geração de gases em aterros sanitários é importante para o aproveitamento energético e para a comercialização dos créditos de carbono, constituindo-se em um novo e promissor campo de trabalho para engenheiros.
- A mistura de gases resultante da fermentação anaeróbia da matéria orgânica é geralmente denominada biogás. O biogás é composto essencialmente de metano e gás carbônico, e seu poder calorífico está diretamente relacionado à quantidade de metano na mistura.



Geração de Biogás

- Produção de energia.
- Modelos matemáticos.
- Modelo geral (Farquhar & Rovers, 1973): processo de produção de gases tem 4 fases ao longo do tempo: fase aeróbia, fase anaeróbia não metanogênica, fase anaeróbia metanogênica não estabilizada e fase anaeróbia metanogênica estabilizada.



Geração de Biogás

(Barlaz & Ham, 1993)

- Fase aeróbia: decomposição aeróbia da matéria orgânica; o oxigênio presente nos resíduos recém-depositados é consumido para produção de gás carbônico.

Produção de CO_2 , consumo de N_2 e O_2 , nenhuma produção de metano.

Degradação de 5 a 10% da matéria sólida possível de transformação em gases



Geração de Biogás

(Barlaz & Ham, 1993)

- Fase anaeróbia ácida: decomposição anaeróbia da matéria orgânica em ácidos orgânicos.

Aumento da produção de CO_2

Líquidos com pH não superior a 5.

Elevados valores de DBO e DQO nos líquidos, devido à alta solubilidade dos ácidos orgânicos.

Degradação de 15 a 20% da matéria sólida possível de transformação em gases



Geração de Biogás

(Barlaz & Ham, 1993)

- Fase metanogênica acelerada: produção de metano e ácidos ocorre simultaneamente, sendo a taxa de produção desses últimos significativamente menor.

Ácidos e H_2 se transformam em CH_4 e CO_2

pH aumenta, atingindo 6,8 a 8

pH dos percolados é elevado, enquanto DBO e DQO reduzem sensivelmente



Geração de Biogás

(Barlaz & Ham, 1993)

- Fase metanogênica desacelerada: após a conversão de toda a matéria orgânica disponível em CH_4 e CO_2

A taxa de produção de gases diminui substancialmente.

Principais gases gerados: CH_4 e CO_2

Também pequenas quantidades de N_2 e O_2

Decomposição da matéria sólida atinge entre 50 e 70%.



Modelos teóricos de produção de gás

■ $\alpha = 0,8 P_0 k e^{-kt}$ (Hoeks 1983)

α = produção específica de gás

P_0 = concentração de matéria orgânica no
instante t_0 (kg / t de resíduo)

k = coeficiente de degradação (ano^{-1})

t = tempo

0,8 = fator de produção de gás a partir da
matéria orgânica (m^3/kg)

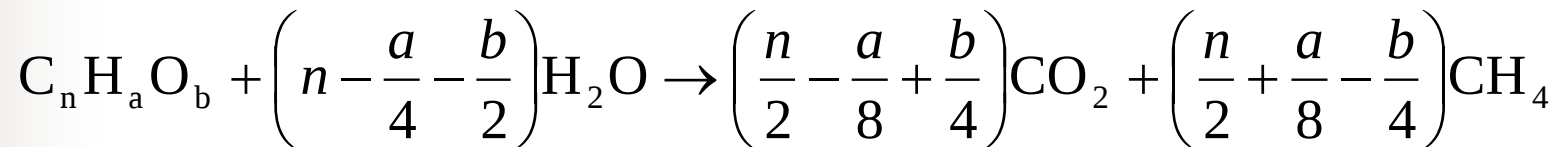


Constituição típica de biogás de aterro sanitário (Parker, 1983)

■ Depende da fase

Componente	Volume (%)
Metano	47,5
Gás Carbônico	47,0
Nitrogênio	3,7
Oxigênio	0,8
Hidrocarbonetos	0,3
Hidrogênio	0,1
Monóxido de carbono	0,1
Gases secundários	0,5

- 
- A digestão anaeróbia pode ser representada simplificadamente pela equação de Buswell & Mueller (1962), pela qual se pode calcular a produção de metano e gás carbônico a partir de um composto orgânico:



- Em um maciço sanitário há diversos tipos de materiais putrescíveis. Além disso, diversos fatores influem na biodegradação dos RSU e, portanto, na geração de gases: granulometria, composição, idade, umidade, temperatura e densidade dos resíduos; qualidade e quantidade dos nutrientes; e pH, DBO e DQO dos líquidos. A transformação da matéria degradável no maciço sanitário em CH_4 e CO_2 envolve uma série de reações e depende das condições do maciço.

- 
- A modelagem e a estimativa da geração de metano são, portanto, muito complexas. Contudo, observações em laboratório e campo sugerem que a geração de metano pode ser aproximada por um modelo cinético de primeira ordem. Diversos modelos têm sido propostos aceitando essa premissa.

- 
- Os modelos de geração de gases geralmente relacionam o volume gerado em determinado tempo com o teor de matéria orgânica inicial nos resíduos e um fator de conversão de massa de matéria orgânica em volume de gás.
 - Nem todo o metano gerado em um aterro sanitário é emitido: parcelas podem ser oxidadas, biodegradadas ou aprisionadas na massa de resíduos. Dada a dificuldade de representar matematicamente os fenômenos relacionados às perdas do gás gerado, costuma-se aceitar como hipótese que todo o gás gerado será emitido por fraturas ou outras aberturas na superfície do aterro. Os modelos de geração de gases em aterros sanitários podem assim ser considerados modelos de emissão de gases do aterro para a atmosfera.



O modelo de Hoeks (1983) pode ser expresso por:

$$A = fP_0 k e^{-kt}$$

A = produção específica de gás no aterro (t de C por t de resíduos por ano)

f = fração do carbono orgânico biodegradável que é realmente degradado ou fator de produção de gás a partir da matéria orgânica (0,8 m³/kg)

P₀ = concentração de carbono biologicamente biodegradável no resíduo depositado (t/t)

k = constante de velocidade de degradação (ano⁻¹)

t = tempo (ano)



Modelo holandês de geração de metano em um aterro sanitário, baseado em Hoeks (1983:

$$m_{\text{CH}_4} = A * m_{\text{resíduos}} * F * 16/12$$

m_{CH_4} = produção de metano no aterro (t/ano)

A = produção específica de gás no aterro ($\text{t.t}^{-1}.\text{ano}^{-1}$)

$m_{\text{resíduos}}$ = massa de resíduos dispostos no aterro (t)

F = fração de metano no gás do aterro

$16/12$ = razão de massa molecular CH_4/C



Os modelos da USEPA (1998), Banco Mundial (World Bank 2003) e IPCC (2006) relacionam massa de resíduos que entra anualmente no aterro, tempo de atividade do aterro e/ou após fechamento, velocidade de geração de metano e potencial de geração de metano.



O modelo de estimativa de emissões de gás metano de aterros sanitários da USEPA (1998) é expresso por:

$$Q_{\text{CH}_4} = L_0 R \left(e^{-kc} - e^{-kt} \right)$$

Q_{CH_4} = taxa de geração de metano no tempo t (m^3/ano)

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

R = média anual de velocidade de entrada de lixo durante a vida útil do aterro (t/ano)

k = constante de velocidade de geração de metano (ano^{-1})

c = tempo desde o fechamento (ano)

t = tempo desde o início do aterramento (ano)



O potencial de geração de metano depende da umidade e do teor de matéria orgânica. A constante de velocidade de geração de metano é função da umidade, da disponibilidade de nutrientes para a digestão anaeróbia, do pH e da temperatura do meio, entre outros. As emissões em massa podem ser calculadas a partir das emissões em volume utilizando-se a equação de Clapeyron para gases ideais:

$$E_{\text{CH}_4} = Q_{\text{CH}_4} \left[\frac{M_{\text{CH}_4} * P}{RT} \right]$$

E_{CH_4} = emissão de metano em massa (Kg/ano)

P = pressão (1 atm)

Q = taxa de geração do poluente (m^3/ano)

M = massa molecular do metano (g/mol)

R = constante universal dos gases ($= 8,205 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{atm} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

T = temperatura do gás (K)



Os sistemas de coleta e de controle de gás (queimadores, caldeiras, turbinas de gás, motores de combustão interna) reduzem as emissões, sem contudo anulá-las, pois não têm eficiência de 100%. As emissões controladas de metano, isto é, as emissões de metano em um aterro sanitário que tenha sistemas de coleta e de controle de gás, podem ser calculadas por:

$$EC_{CH_4} = [E_{CH_4} (1 - \eta_{col})] + [E_{CH_4} \eta_{col} (1 - \eta_{cnt})]$$

EC_{CH_4} = emissão controlada de metano em massa (Kg/ano)

E_{CH_4} = emissão não controlada de metano em massa (Kg/ano)

η_{col} = eficiência do sistema de coleta de gás do aterro

η_{cnt} = eficiência do sistema de controle ou utilização de gás do aterro

Se a eficiência do sistema de coleta for desconhecida, a USEPA (1998) sugere o valor de 0,75.



Emissões controladas de CO₂ incluem emissões de CO₂ no biogás gerado pelo aterro, calculadas pelas mesmas equações apresentadas para CH₄, e CO₂ adicional formado durante a combustão do gás do aterro, principalmente devido à queima do metano. Considerando-se eficiência de 100% na combustão de CH₄, as emissões de gás carbônico podem ser calculadas por:

$$EC_{CO_2} = E_{CO_2} + [E_{CH_4} * \eta_{col} * 2,75]$$

EC_{CO₂} = emissão controlada de gás carbônico em massa (Kg/ano)

E_{CO₂} = emissão não controlada de gás carbônico em massa (Kg/ano)

E_{CH₄} = emissão não controlada de metano em massa (Kg/ano)

η_{col} = eficiência do sistema de coleta de gás do aterro

2,75 = razão do peso molecular de CO₂ para o de CH₄



O modelo de estimativa de emissões de gás metano de aterros sanitários pelo Banco Mundial (2003) é expresso por:

$$Q_{\text{CH}_4} = kL_0 m_i e^{-kt}$$

Q_{CH_4} = taxa de geração de metano no ano i (m^3/ano)

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

m_i = massa de resíduo depositado no ano i (t/ano)

k = constante de velocidade de geração de metano (ano^{-1})

t = tempo após o fechamento (ano)



O modelo de estimativa de emissões de gás metano de aterros sanitários indicado pelo IPCC (2006) é:

$$\text{CH}_4 \text{ emitido}_T = \left(\sum_x \text{CH}_4 \text{ gerado}_T - R_T \right) (1 - \text{OX}_T)$$

$\text{CH}_4 \text{ emitido}_T$ = CH_4 emitido no ano T (t)

$\text{CH}_4 \text{ gerado}_T$ = CH_4 gerado no ano T (t)

x = tipo ou categoria de resíduo

R_T = CH_4 recuperado no ano T

OX_T = fator de oxidação no ano T (fração)



A massa de metano gerado no tempo T, por sua vez, é dada por:

$$\text{CH}_4 \text{ gerado}_T = m_{\text{COD}} \text{ decomp}_T * F * 16/12$$

$\text{CH}_4 \text{ gerado}_T$ = quantidade de CH_4 gerado no tempo T

$m_{\text{COD}} \text{ decomp}_T$ = massa de carbono orgânico decomposto no tempo T

F = fração de CH_4 por volume no gás gerado no aterro

16/12 = razão de massa molecular CH_4/C



A massa de carbono orgânico decomposto no tempo T é:

$$m_{\text{COD decomp}_T} = m_{\text{COD}_0} - m_{\text{COD}} = m_{\text{COD}_0} (1 - e^{-kT})$$

$m_{\text{COD decomp}_T}$ = massa de carbono orgânico decomposto no tempo T

m_{COD_0} = massa de carbono orgânico degradável no aterro no tempo 0

m_{COD} = massa de carbono orgânico degradável no aterro no tempo T

k = constante de velocidade de decaimento (ano^{-1})

t = tempo (anos)



Pode-se observar uma grande semelhança entre todos os modelos de geração de gás citados.