



**ESCOLA POLITÉCNICA**  
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental

# PHA3556- Tecnologias de Tratamento de Resíduos Sólidos

**Aula 11:** Disposição Final de Resíduos Sólidos e  
Tratamento de Lixiviados de Aterros Sanitários

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

# A Política Nacional dos Resíduos Sólidos

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Lei Nº 12.305, de 02/08/2010**
  - Institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS):
- Art. 9º - Na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.
- **Decreto Nº 7.404, de 23/12/2010**
  - Regulamenta a PNRS.



# A Política Nacional dos Resíduos Sólidos

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- Em nenhum momento a PNRS estabelece que se deve passar da disposição dos resíduos em lixões para disposição em aterros sanitários! Mas isso é o que é normalmente veiculado pela mídia.

Antes da PNRS

Depois da PNRS

Resíduos

Lixão



Aterro Sanitário



Todo resíduo

Aterro Sanitário

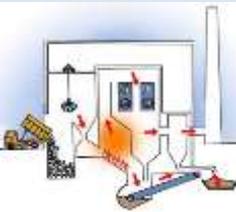


Reuso, Reciclagem,  
Tratamento, etc...



Rejeitos

Aterro Sanitário



# Aterros Sanitários

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Mudanças:**

- Mesmo seguindo-se rigorosamente a PNRS, adotando-se práticas de sustentabilidade nos aterros existentes e depositando-se somente **rejeitos** em aterros sanitários, ainda se terá que conviver com os aterros por **muitos anos**.



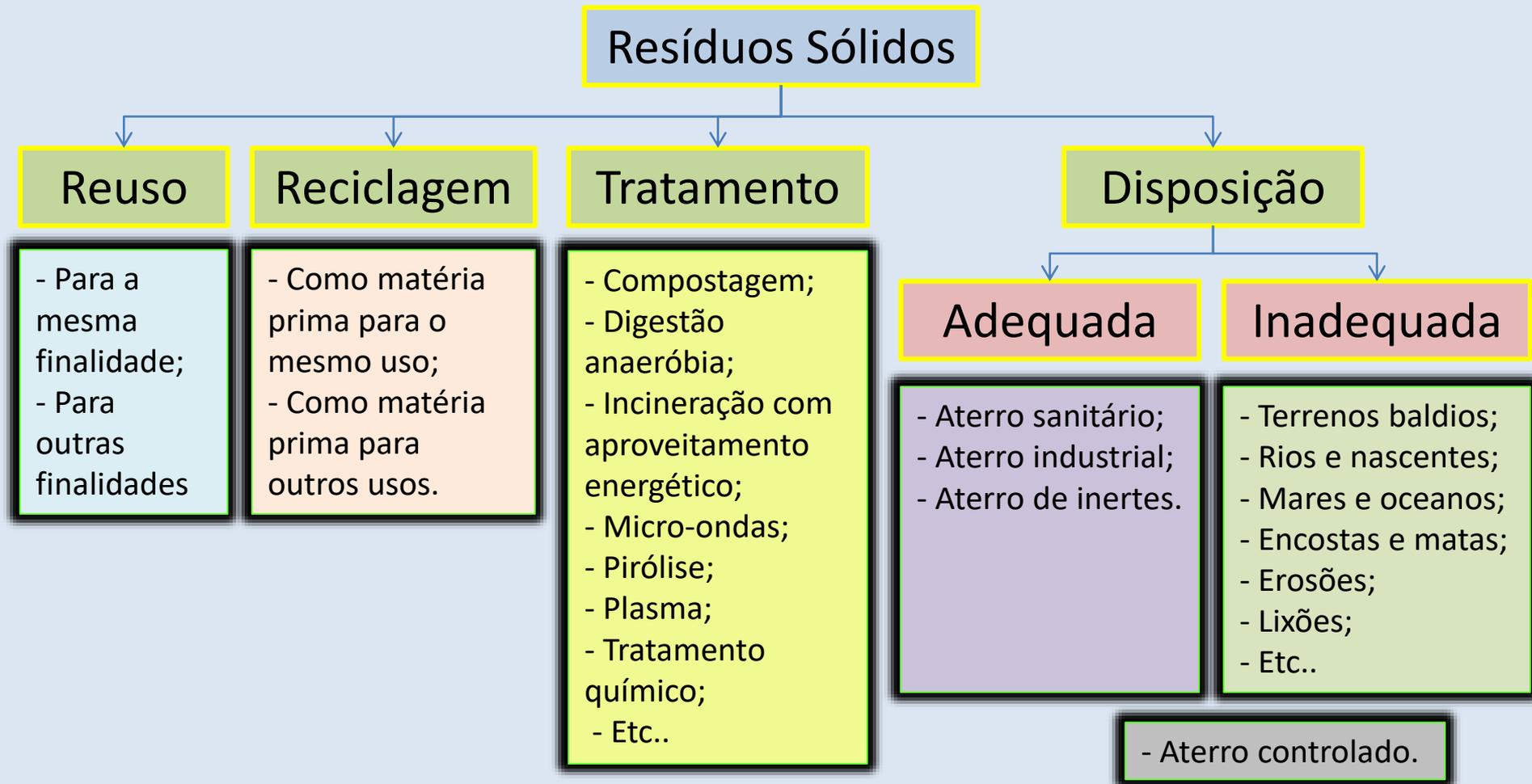
- Conseqüentemente, ainda se terá que lidar por **muito tempo** com os problemas relacionados às **emissões fugitivas de gases** e **geração de lixiviados** em aterros sanitários, com elevado potencial de contaminação do solo e subsolo local, além das águas superficiais e subterrâneas.



# Destinação dos Resíduos

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

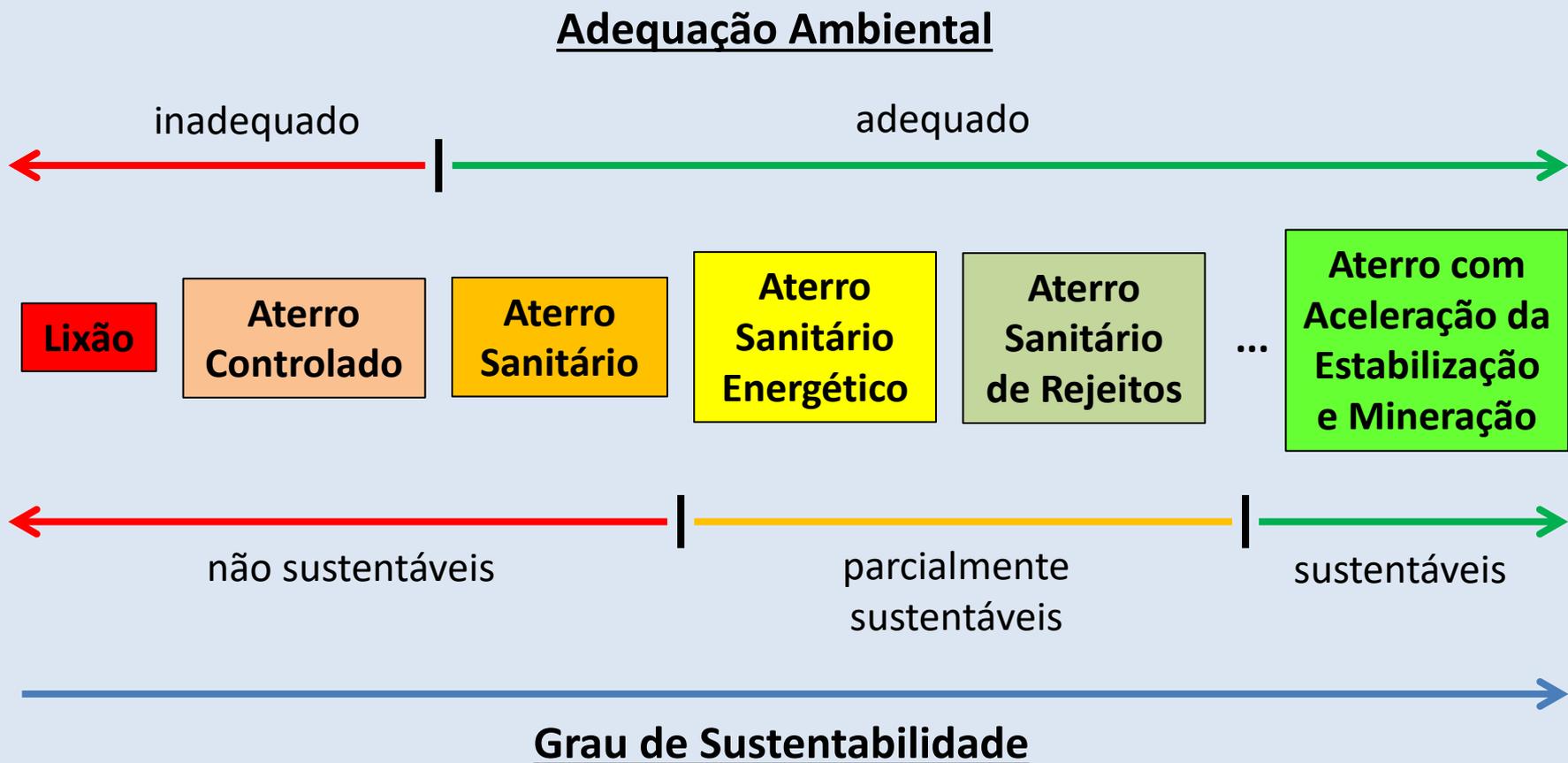
## • Principais Destinações dos Resíduos Sólidos



# Disposição de Resíduos e Sustentabilidade

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- Adequação Ambiental e Grau de Sustentabilidade:

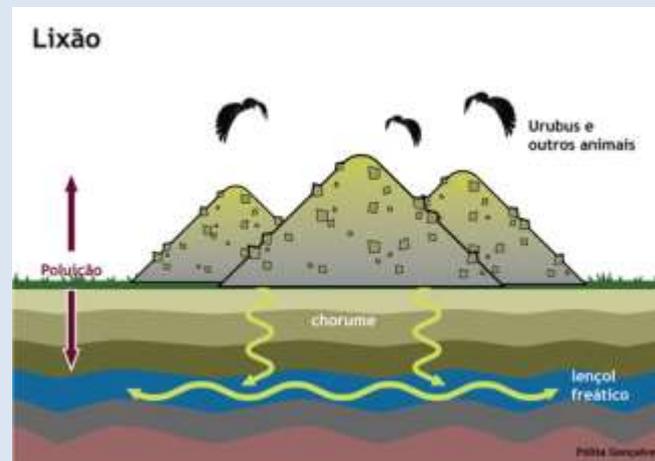
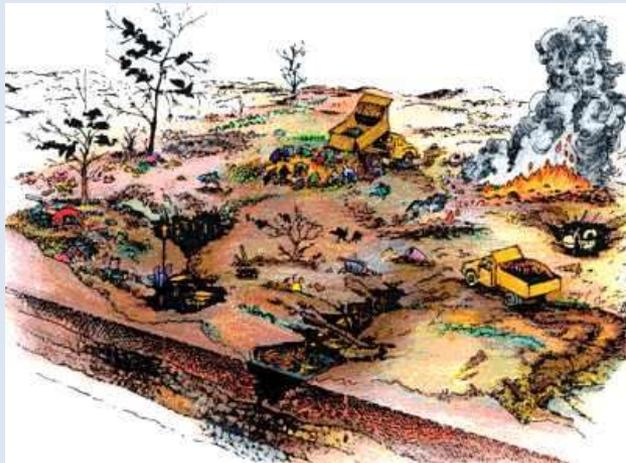


# Lixões

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Definição:**

- O lixão é uma forma inadequada de disposição final de resíduos sólidos municipais, que se caracteriza pela simples descarga dos resíduos sobre o solo, sem medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública (sem impermeabilização do solo, sem cobertura dos resíduos e drenagem de gases);



Fonte:  
<http://arquiteturascontemporaneas.wordpress.com/2012/08/page/2/>



Fonte:  
<http://euambientalista.blogspot.com.br/>

# Lixões

- **Definição:**

- Geralmente são instalados nos piores locais possíveis, tais como: próximos de nascentes e córregos, em áreas alagáveis, em áreas de preservação ambiental e erosões;
- Não há controle algum no recebimento dos resíduos (tipo e quantidades) e nem quanto ao acesso de pessoas e animais ao lixo;
- A inexistência de proteções da base e da superfície favorece a infiltração de lixiviados que contaminam os mananciais subterrâneos e o fluxo superficial que contaminam os mananciais superficiais;
- A falta de cobertura favorece a proliferação de vetores de doenças tais como: insetos, roedores e aves, além do espalhamento de lixo pelo vento e do mau cheiro.

# Lixões

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Definição:**

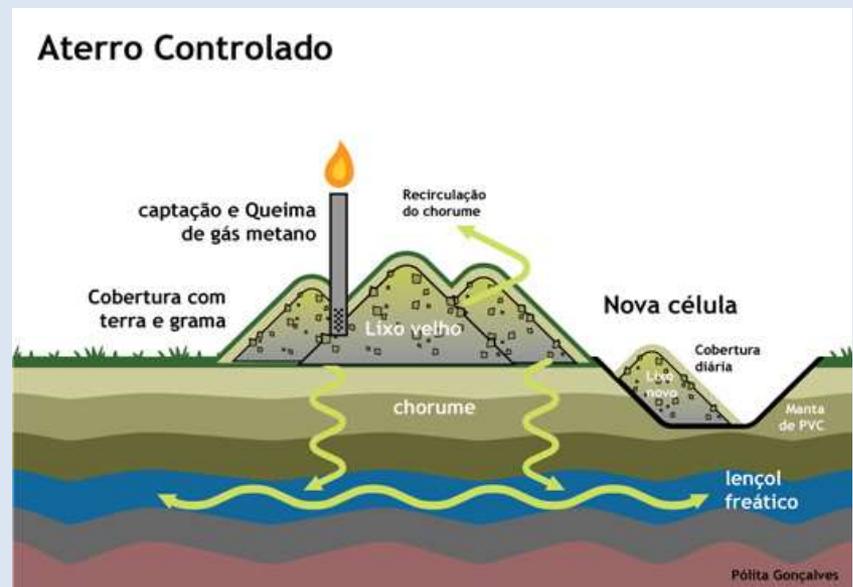


# Aterros Controlados

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Definição:**

- É uma forma de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo na qual são tomadas algumas precauções em relação à execução do aterro, tais como a compactação dos resíduos, a conformação de taludes, cobertura dos resíduos com solo e às vezes instalação de drenos de gases.
- Embora seja uma técnica preferível ao lançamento a céu aberto (lixão), **não substitui o aterro sanitário**, pois permite a contaminação dos mananciais superficiais e subterrâneos através da infiltração de lixiviados.



Fonte:

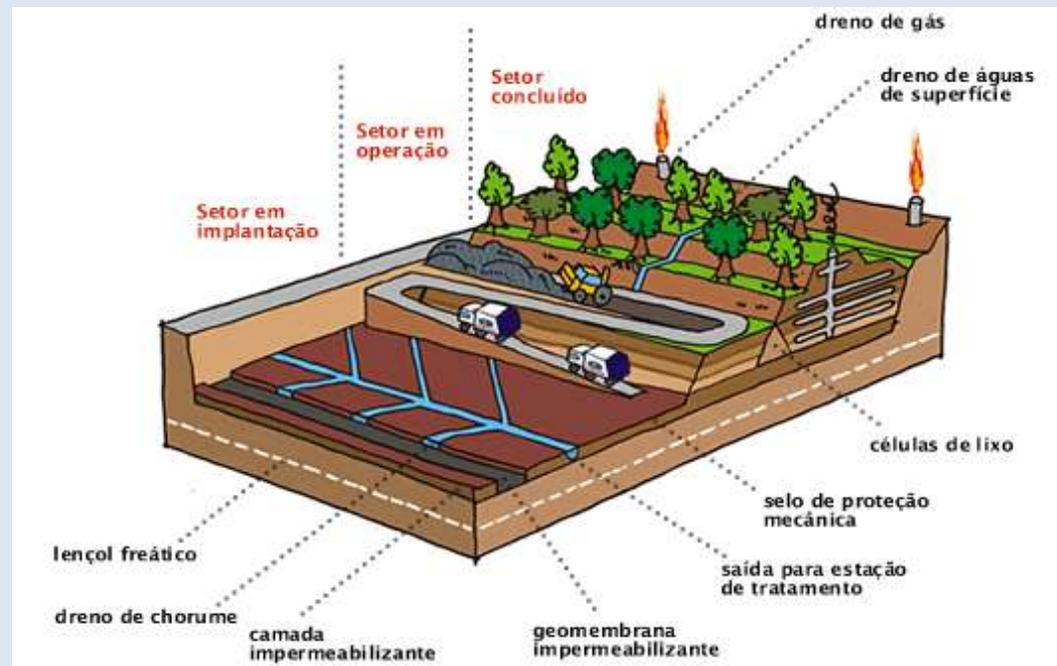
<http://arquiteturascontemporaneas.wordpress.com/2012/08/page/2/><sup>10</sup>

# Aterros Sanitários Convencionais

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Definição:**

- O aterro sanitário (de resíduos Classe II A) é uma forma de disposição final de resíduos sólidos urbanos no solo, dentro de critérios de engenharia e normas operacionais específicas, proporcionando o **confinamento seguro dos resíduos** (normalmente, recobrendo com argila selecionada e compactada em níveis satisfatórios), evitando danos ou riscos à saúde pública e minimizando os impactos ambientais, **desde que construído e operado adequadamente.**



# Aterros Sanitários Convencionais

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Definição:**

- Os critérios de engenharia mencionados materializam-se na impermeabilização prévia do solo e em projetos de sistemas de drenagem periférica e superficial para afastamento de águas de chuva, de drenagem de fundo para a coleta de lixiviado, de sistema de tratamento para o lixiviado drenado, de drenagem e queima dos gases gerados durante o processo de bioestabilização da matéria orgânica.

- Norma ABNT:

**NBR 8419/1992**

Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos.



# Aterros Sanitários Convencionais

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Exemplo:**
  - Aterro Bandeirantes em São Paulo.



# Aterros Sanitários Convencionais

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Exemplo:**
  - Aterro São João em São Paulo.



# Aterros Sanitários Convencionais

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Exemplo:**
  - Aterro da Caximba em Curitiba-PR.



# Aterros Sanitários Convencionais

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Exemplo:**
  - Aterro da ESTRE Ambiental em Paulínia-SP.



# Aterros Sanitários Convencionais

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Exemplo:**
  - Aterro de São Carlos-SP.

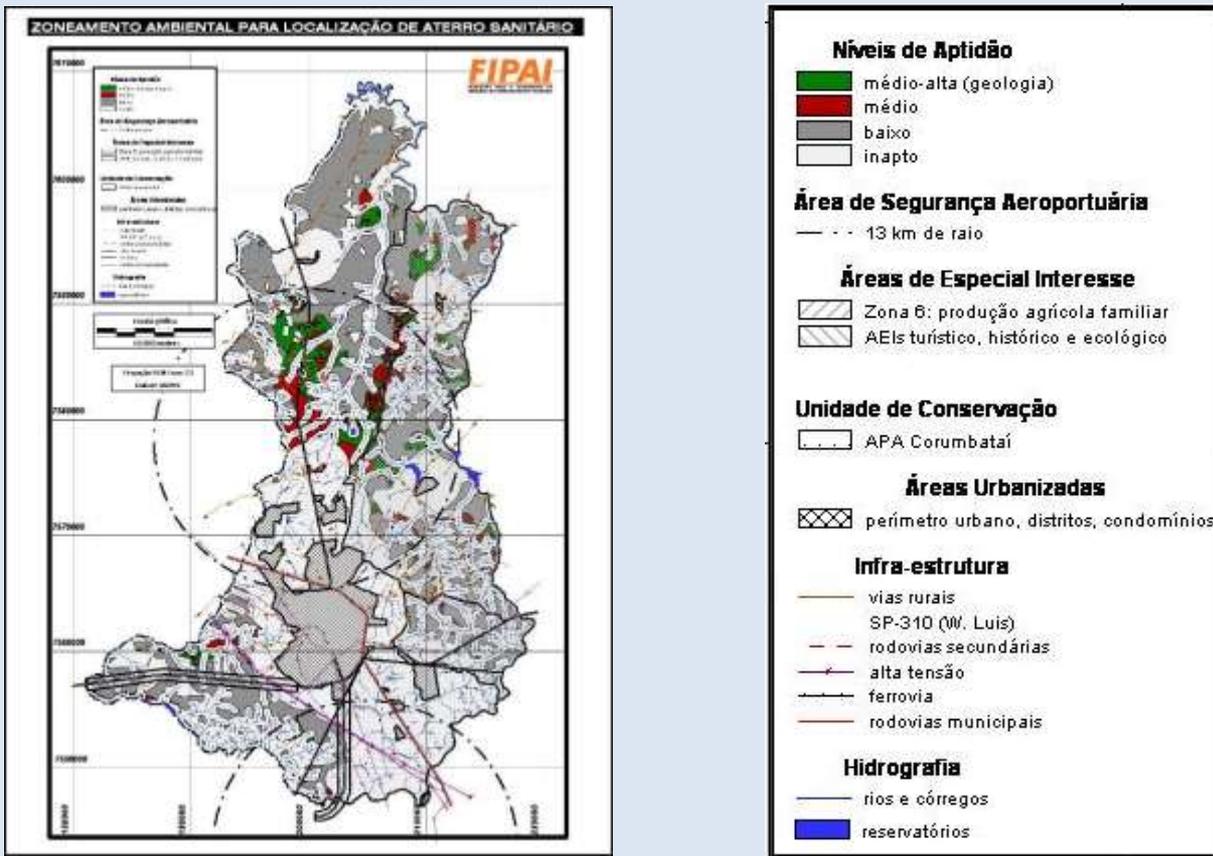


# Aterros Sanitários Convencionais

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Seleção da Área:**

- A seleção de áreas para instalação de aterros sanitários é feita através de zoneamento ambiental com o auxílio de um sistema de informações geográficas, obtendo-se **áreas aptas**.



# Aterros Sanitários Convencionais

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Seleção da Área:**

- Para obtenção das áreas aptas devem ser levados em consideração os seguintes dados:

## **Dados Gerais:**

- Dados populacionais;
- Caracterização dos resíduos;
- Quantificação dos resíduos gerados ao longo do tempo;
- Informações sobre manejo de resíduos no município;
- Identificação de áreas de preservação ambiental;
- Identificação de zonas de preservação de mananciais;
- Existência de aeroportos;
- etc.

# Aterros Sanitários Convencionais

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Seleção da Área:**

- Dados Geológicos e Geotécnicos:**

- Relevo do solo (declividades);
    - Material não consolidado (caracterização do solo);
    - Escoamento superficial e infiltração;
    - Nível das águas subterrâneas;
    - Substrato rochoso;
    - Alterabilidade dos materiais geológicos;
    - Compressibilidade do solo;
    - Material de cobertura do aterro;
    - etc.

# Aterros Sanitários Convencionais

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Seleção da Área:**

  - Dados Sobre Águas Superficiais:**

    - Distâncias dos corpos d'água;
    - Regime de cheias e áreas inundáveis;
    - Principais bacias hidrográficas e os divisores de água;
    - etc.

  - Dados Sobre Clima:**

    - Precipitação / evapotranspiração;
    - Direção preferencial dos ventos;
    - etc.

# Aterros Sanitários Convencionais

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Seleção da Área:**

## **Dados Sobre Legislação:**

- Federal;
- Estadual; e
- Municipal.

## **Dados Sócio-Econômicos:**

- Distâncias mínimas (maus odores e insetos);
- Distâncias máximas (custos com transporte);
- Aceitação da população;
- Custos das terras (aquisição);
- Benefícios da implantação do aterro (empregos);
- etc.

# Aterros Sanitários Convencionais

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Seleção da Área:**

Componentes	Atributos	Aterro Sanitário			
		Favorável	Moderada	Severa	Restritiva
Substrato Rochoso	Tipo litológico	-	-	arenito	calcário
	Pofundidade (m)	> 15	5 - 10	< 5	< 3
	Descontinuidade (densidade/JV)	Poucos	média	muito fraturado	muito fraturado e com aberturas
Processo	Erosão	Não	não	ocorre intensa	ocorre muito intensa
	Movimento de massas	Não	não	há potencial	ocorre
	Declividade (%)	2 – 5	< 2 ou > 5	> 15	> 20
Relevo	Landform	Encostas suaves		escarpas	escarpas
				Zonas de acúmulo de água	
	Divisor de águas	distante 200 m	distante 100m	muito próximo	coincidente
	Zona alagada	Não	não	não	ocorre
	Zona sujeita a inundação	Não	não	ocorre período de retorno alto > 20 anos	ocorre c/ per. de retorno < 20 anos

Fonte: Kataoka (2000)

# Aterros Sanitários Convencionais

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Seleção da Área:**

Componentes	Atributos	Aterro Sanitário			
		Favorável	Moderada	Severa	Restritiva
Materiais inconsolidados (solo)	Granulometria	média	média	arenoso	muito arenoso
	Variação do perfil	Progressiva	progressiva	homogêneo	homogêneo
	Mineralogia	presença de minerais tipo 2:1	minerais tipo 1:1	razoável % de minerais inertes	minerais inertes em alta %
	Presença de matacões	raros e pequenos	pequenos e poucos	muitos	muitos e grandes
	pH	> 4	> 4	> 5	< 4
	Salinidade (mmho/cm)	< 16	< 16	> 16	muito Salina
	C.T.C. (meq/100g)	> 15	5 - 15	< 5	< 2
	Camadas compressíveis	Não	não	ocorre em superfície	ocorre em prof. não substitutiva
	Colapsividade/ expansibilidade	Não ocorre	Camada superficial (1m)	Camada superficial (2m)	Camada espessa (4m)
	(Potencial) Erodibilidade	Baixa	baixa	alta	muito alta
	Fator de retardamento	Alto	médio	baixo	como de traçador
Característica de compactação $\rho_d$ , $W_{ot}$	-	-	-	-	

# Aterros Sanitários Convencionais

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Seleção da Área:**

Componentes	Atributos	Aterro Sanitário			
		Favorável	Moderada	Severa	Restritiva
Águas	Prof do N.A. abaixo da base poluidora	> 10 m	> 5 m	< 4	< 2
	Direção do fluxo subterrâneo	uma	uma	2 ou 3	diversas
	Escoamento superficial	laminar	laminar (baixo)	laminar (alto)	concentrado
	Infiltração (coef. de perm.) cm/s	< 10 <sup>-4</sup> (próximo)	10 <sup>-4</sup> – 10 <sup>-3</sup>	> 10 <sup>-3</sup>	muito alta
	Áreas de recargas	não	não	não	ocorre
	Dist. de poços e fonte natural	> 500m			< 300m
	Drenabilidade	boa	boa	má	má
	Distância dos cursos d'água	>200 m	> 200 m	< 200 m, só com aprovação do órgão ambiental responsável	
Climáticos	Evapotranspiração	alta	média	baixa	baixa
	Direção dos ventos				para o centro urbano
	Pluviosidade				chuva durante longos períodos

Fonte: Kataoka (2000)

# Aterros Sanitários Convencionais

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Seleção da Área:**

Componentes	Atributos	Aterro Sanitário			
		Favorável	Moderada	Severa	Restritiva
Sociais e Econômicos	Vida útil	> 10 anos	> 10 anos	10 anos, a critério do órgão amb.	
	Distância do centro atendido	2 – 10 km (> 500 m para resid. isoladas)	10 km	10 - 20 km	> 20 km
	Zoneamento urbano	vetor de cresc. mínimo	vetor de cresci. intermediário	vetor de crescimento máximo	
	Densidade populacional	baixa	média	alta	alta
	Valorização da terra	baixa	média	alta	muito alta
	Aceitação da pop.	boa	razoável	inaceitável	inaceitável
	Uso e ocupação das terras	áreas devolutas ou pouco utilizadas		ocupação intensa	
	Zoneamento ambiental	áreas sem restrição no zoneamento ambiental.		unidades de conservação ambiental e correlatas	

Fonte: Kataoka (2000)

# Aterros Sanitários Convencionais

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Preparo do Terreno:**

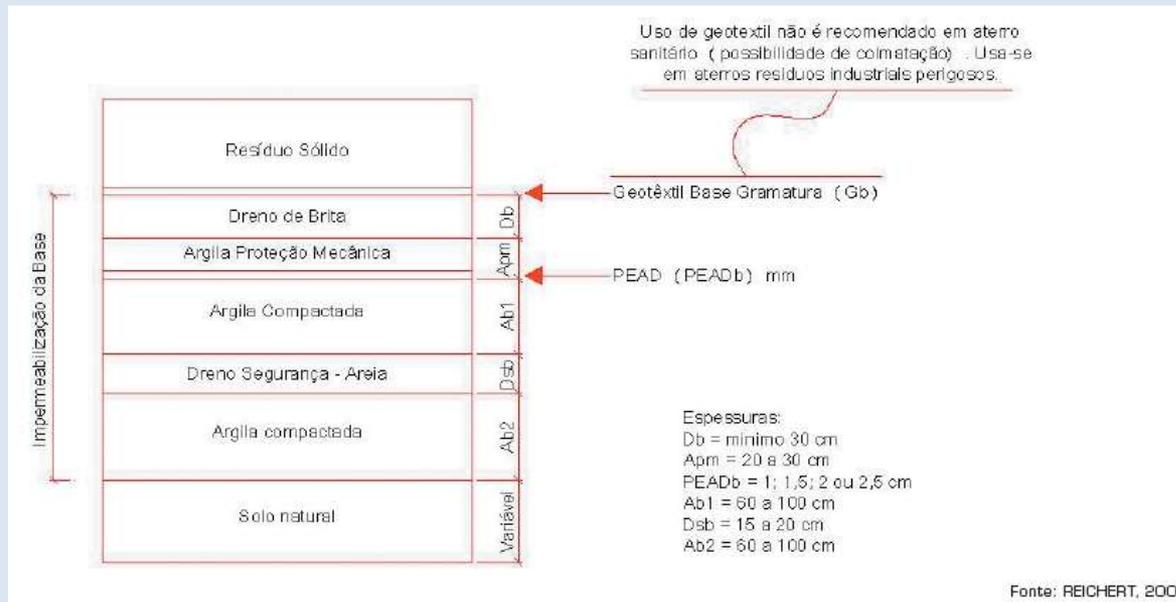
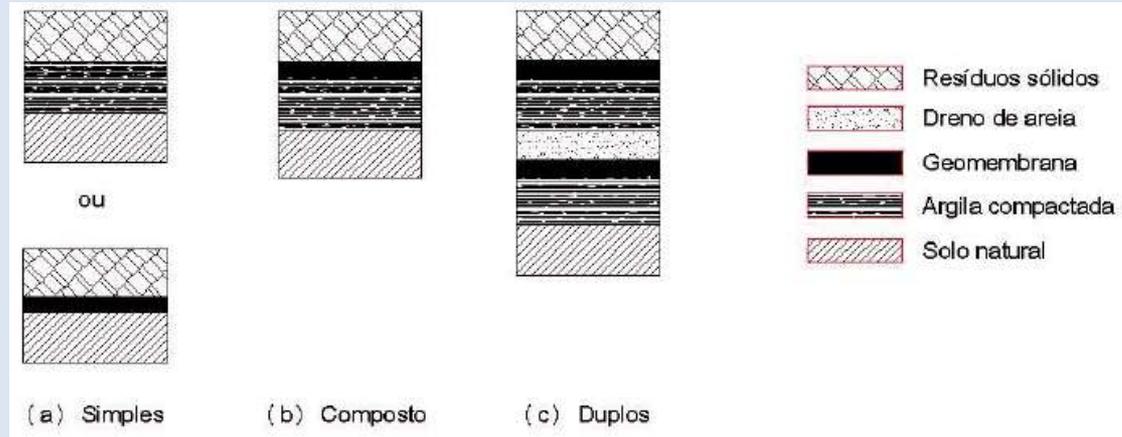
- O terreno é regularizado e uma camada de solo argiloso é compactada sobre o terreno.



# Aterros Sanitários Convencionais

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- Impermeabilização da Base:

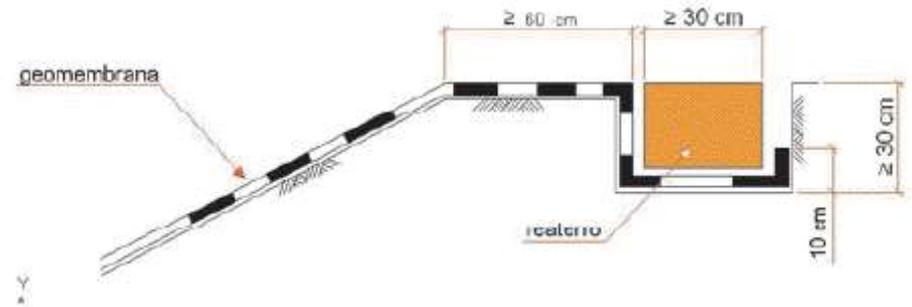


Fonte: REICHERT, 2007.

# Aterros Sanitários Convencionais

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Impermeabilização da Base:**
  - Detalhe da impermeabilização e ancoragem da geomembrana de PEAD em uma canaleta de solo.



Fonte: REICHERT, 2007.

# Aterros Sanitários Convencionais

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Impermeabilização da Base:**
  - Impermeabilização da base do aterro de Rio Claro-SP.

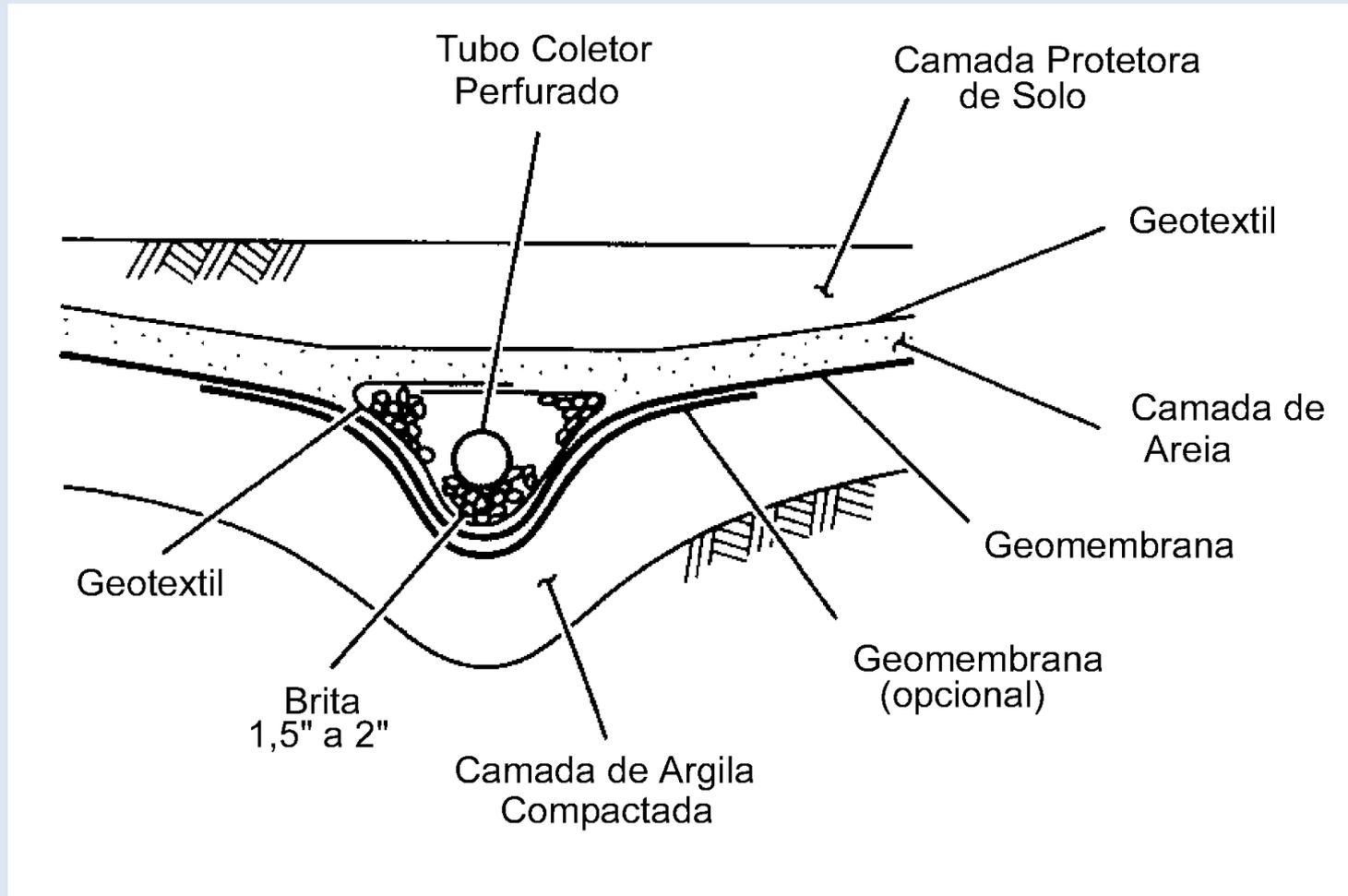


Fonte: Contrera (2003)

# Aterros Sanitários Convencionais

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Drenagem de Lixiviados:**



# Aterros Sanitários Convencionais

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Drenagem de Lixiviados:**
  - Drenagem de fundo do Aterro Caieiras em São Paulo-SP.



# Aterros Sanitários Convencionais

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Drenagem de Lixiviados:**

- Os sistemas de drenagem podem ser classificados basicamente como espinha de peixe/grelha (drenos interligados) ou colchão drenante (camada de brita sob todo o aterro).



Fonte: <http://www.cienciaempauta.am.gov.br/wp-content/uploads/2013/03/aterro1-1024x680.jpg>



Fonte: Contrera (2003)

# Aterros Sanitários Convencionais

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Drenagem de Gases:**
  - O sistema de drenagem de gases deve ser interligado ao sistema de drenagem de lixiviados.



Fonte: SLUBH/UFMG



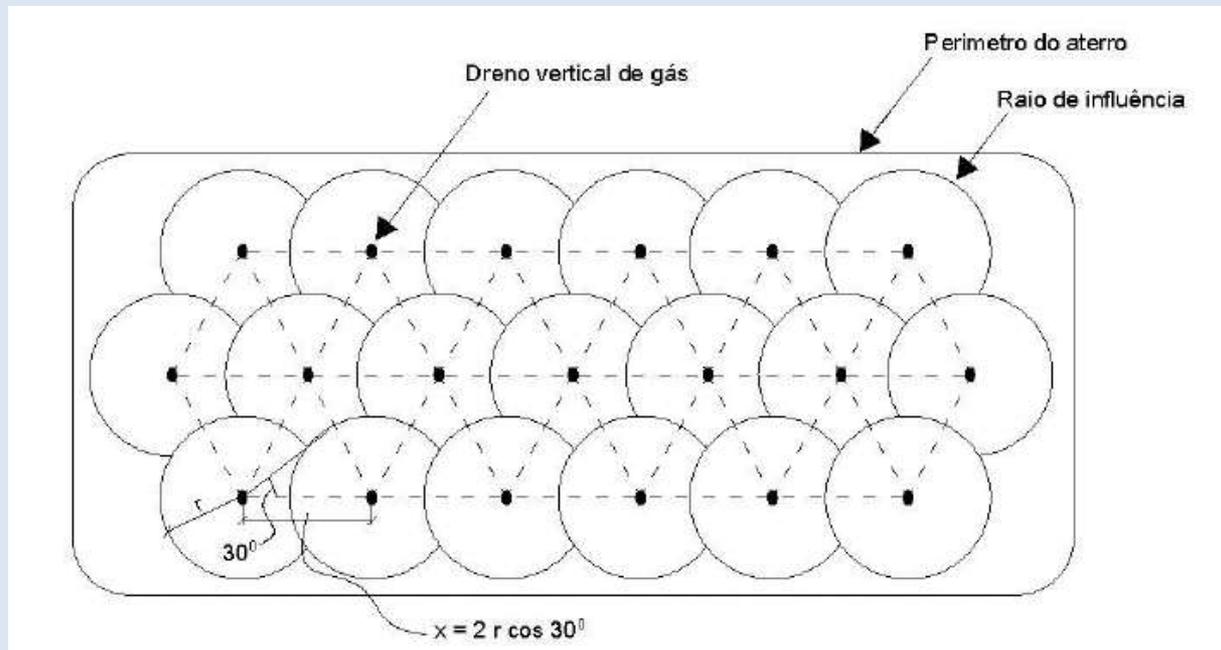
Fonte: SLUBH/UFMG

# Aterros Sanitários Convencionais

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Drenagem de Gases:**

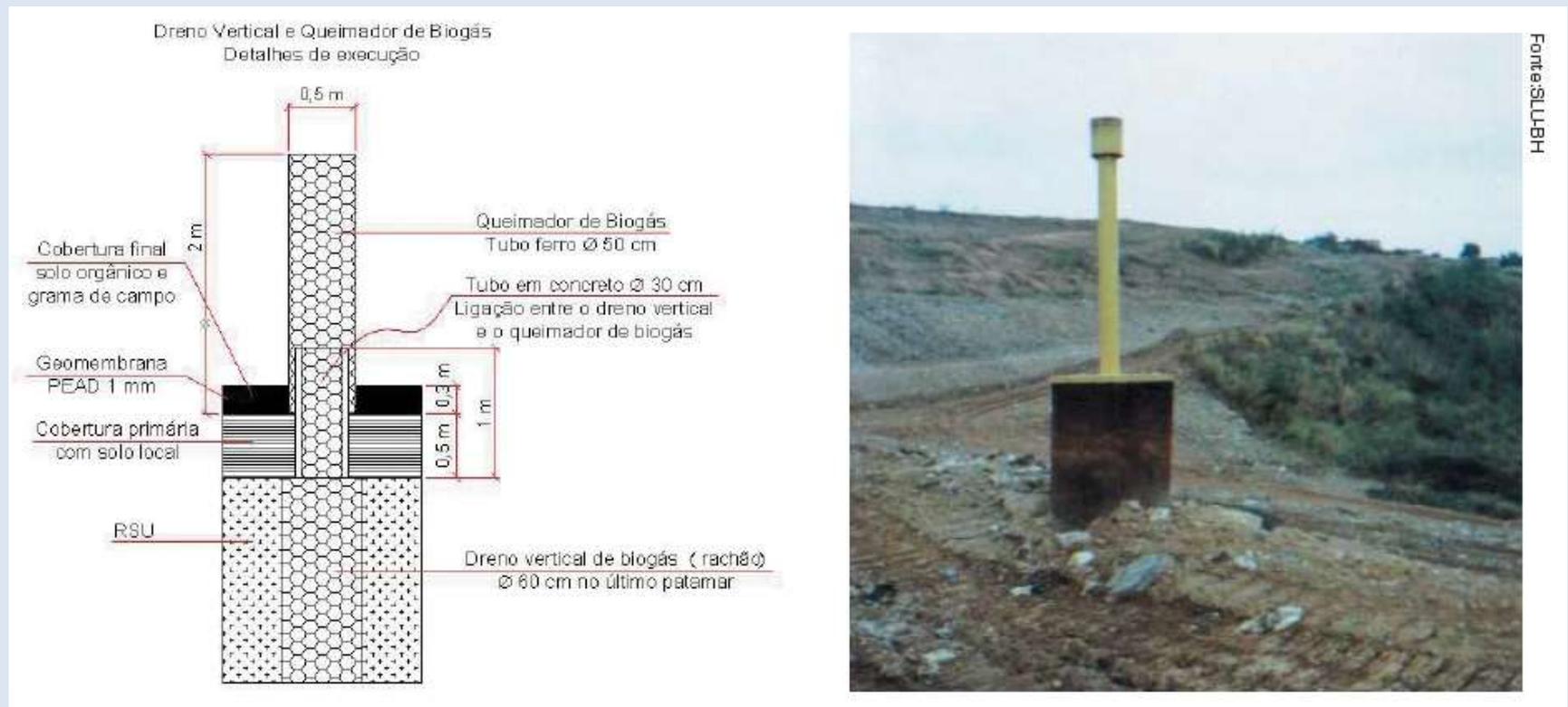
- A distribuição em planta dos drenos verticais de gases é feita considerando-se um raio de influência, ou de captação de biogás, de cada dreno, que pode variar de 15 m a 30 m. Sugere-se que, quanto maior for a altura, menor seja o raio de influência de projeto de cada dreno.



# Aterros Sanitários Convencionais

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Drenagem de Gases:**
  - Quando for inviável a utilização do gás do aterro (verificada através de estudo) o gás gerado deve ser queimado no local.



# Aterros Sanitários Convencionais

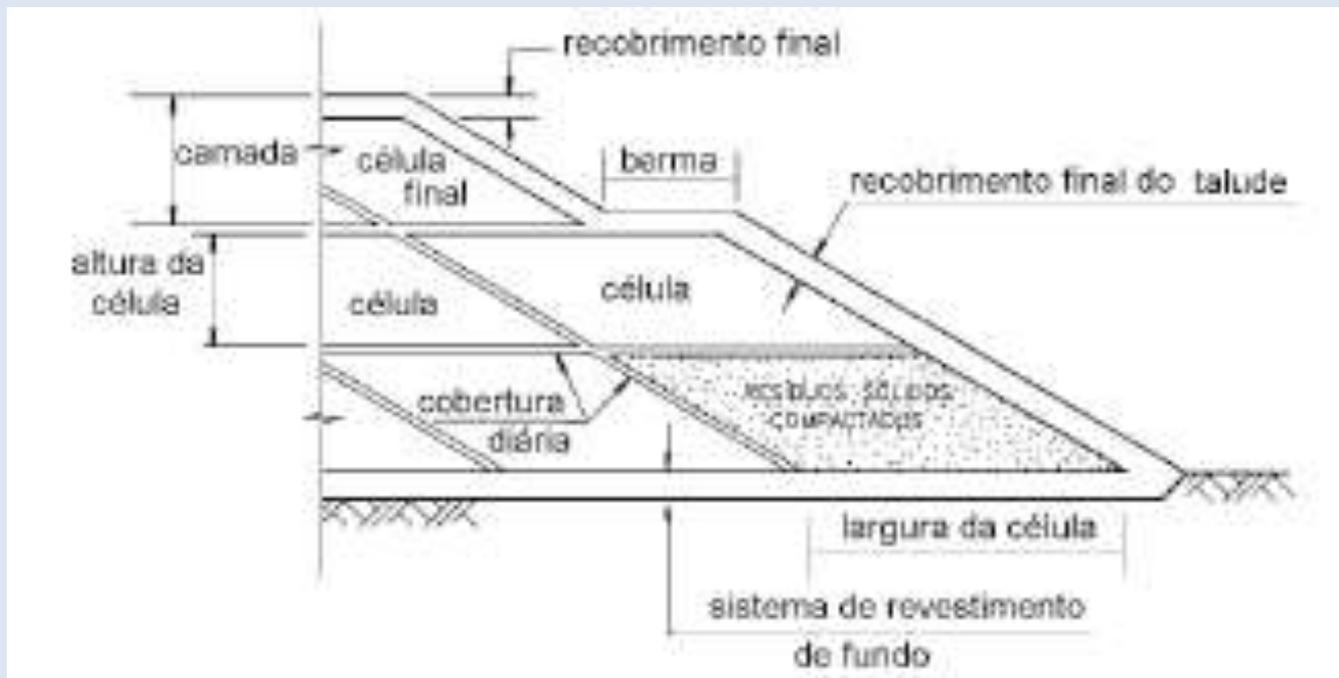
Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Drenagem de Gases:**
  - Um problema grave em aterros sanitários são as emissões fugitivas de gases.
  - Essas emissões são aquelas que não ocorrem através dos drenos, mas sim através dos poros do solo da superfície do aterro.
  - São difíceis de serem quantificadas, mas podem ser medidas com equipamentos especiais instalados na superfície do aterro.
  - Mudam muito de aterro para aterro, dependendo do porte do aterro, da eficiência do sistema de drenagem de gases, da idade do aterro, dos materiais de cobertura, da utilização de geomembranas, etc..

# Aterros Sanitários Convencionais

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Estrutura de um Aterro Sanitário:**
  - Um aterro é composto por um conjunto de células sobrepostas de 3 a 4 m de altura e isoladas com uma fina camada de solo (15 cm).



Fonte: [http://mundodaimpermeabilizacao.blogspot.com.br/2010\\_04\\_01\\_archive.html](http://mundodaimpermeabilizacao.blogspot.com.br/2010_04_01_archive.html)

# Aterros Sanitários Convencionais

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Estrutura de um Aterro Sanitário:**
  - Depois de preparada a base com sistema de impermeabilização e drenagem, a disposição de resíduos pode ser iniciada.



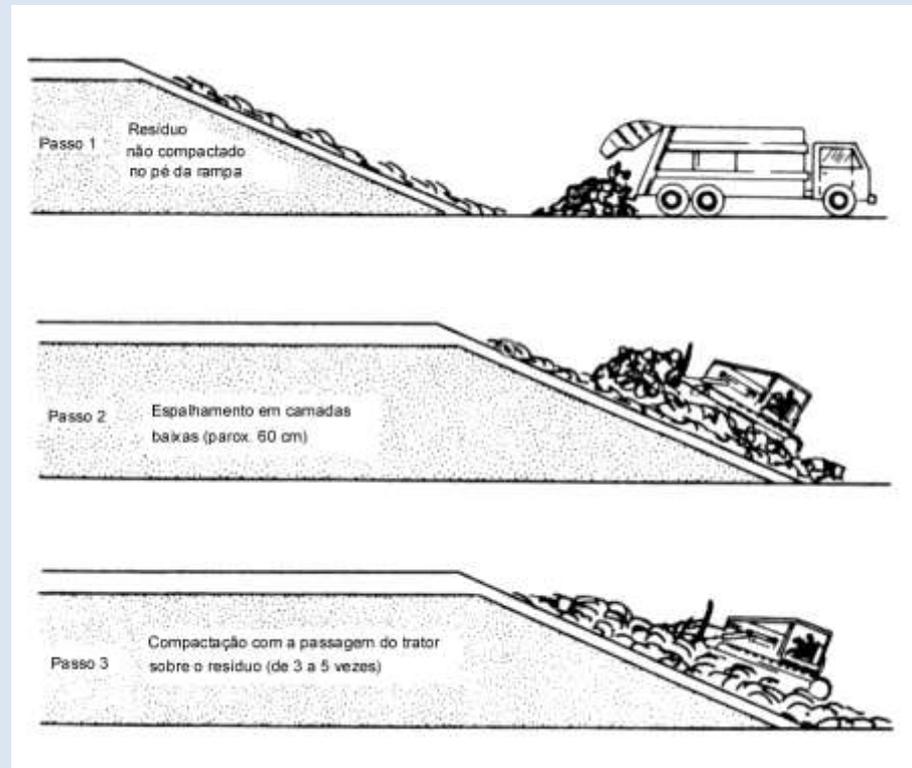
# Aterros Sanitários Convencionais

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Aterramento dos Resíduos:**

- A compactação é executada empurrando-se os resíduos de encontro a esse desnível natural, em movimentos ascendentes, formando uma rampa com taludes de inclinação aproximada de 1(V):3(H).

- Para uma melhor compactação, os resíduos são espalhados sobre essa rampa, formando camadas de mais ou menos 0,4 metro de espessura, sobre as quais o trator de esteiras passa de 3 a 5 vezes.



# Aterros Sanitários Convencionais

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Cobertura Final:**

- A camada de terra de cobertura deve ter aproximadamente 0,30 metro de espessura podendo, entretanto, atingir valores de até 0,50 metro ou mais, quando se utilizam solos com percentuais elevados de areias.
- Solos argilosos são preferíveis em relação aos arenosos, pois o solo arenoso na cobertura pode ser "lavado" pelas águas de chuvas ou carregados para o interior dos vazios do resíduo compactado, deixando o aterro praticamente a céu aberto depois de um tempo.

# Aterros Sanitários Convencionais

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

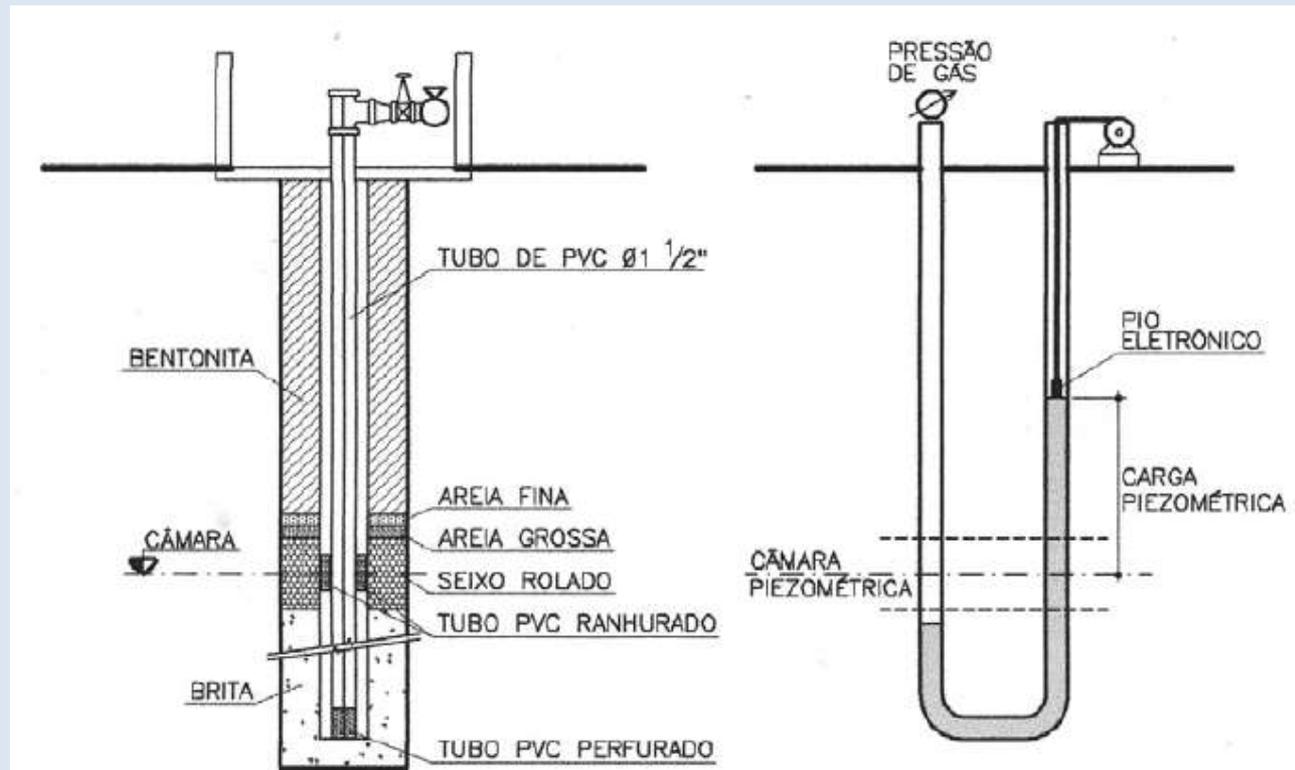
- **Controle Operacional - Piezômetros:**
  - Controle da saturação do maciço para prevenção contra acidentes (deslizamentos) provocados por acréscimo de pressão neutra.
  - Piezômetro do Aterro Bandeirantes em São Paulo-SP.



# Aterros Sanitários Convencionais

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Controle Operacional - Piezômetros:**
  - Piezômetro vector, que minimiza a interferência da espuma produzida através do gás do aterro em contato com o líquido.



Fonte: Cepolina et al. (2004)

# Aterros Sanitários Convencionais

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Controle Operacional – Placas de Recalque:**
  - As placas de recalque são placas de concreto assentadas sobre a superfície do aterro em pontos pré-estabelecidos pelo projetista, com marcos topográficos em sua superfície.
  - Através de um referencial fixo, fora do aterro, possíveis recalques e deslocamentos laterais são medidos com certa frequência, como forma de se controlar e aferir a estabilidade dos taludes.



# Aterros Sanitários Convencionais

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Controle Operacional:**
  - Deslizamento ocorrido no Aterro de Itaquaquetuba-SP em 2009.

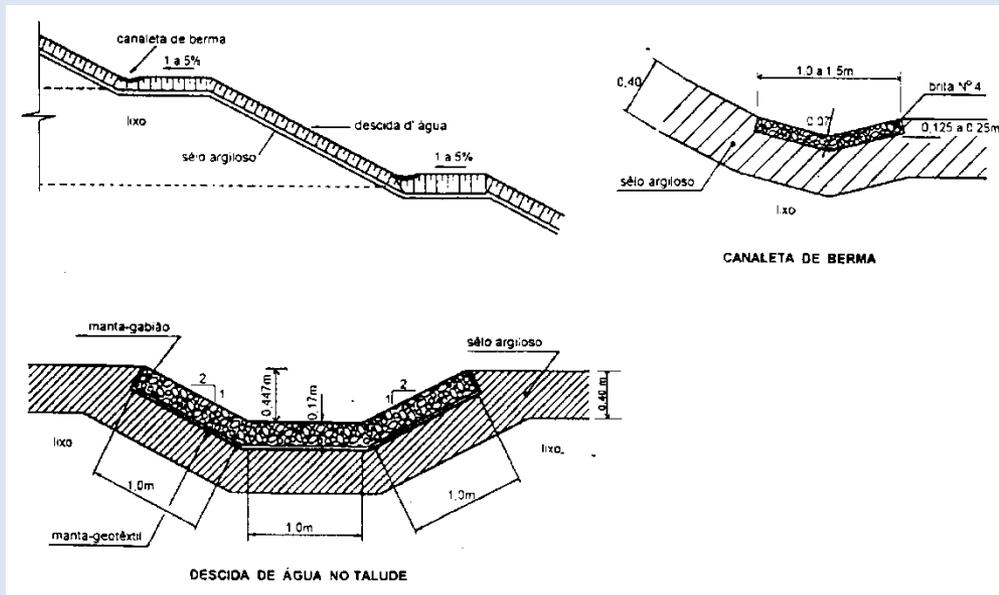


# Aterros Sanitários Convencionais

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Cuidados – Drenagem:**

- Um sistema de drenagem eficiente sobre o aterro evita que ocorra erosão e infiltração excessiva de águas pluviais no aterro.
- O sistema de drenagem pode ser classificado como provisório (instalado na fase de construção do aterro) ou definitivo (instalado no aterro finalizado).
- Recomenda-se que as canaletas sejam de material flexível.



# Aterros Sanitários Convencionais

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Cuidados – Controle de Erosão:**
  - Após o cobrimento final dos resíduos, o plantio de grama é uma boa alternativa para contenção de erosões.
  - Caso ocorram, as erosões devem ser contidas o mais breve possível.



Fonte:  
<http://www.unipacvaleadoaco.com.br/ArquivosDiversos/Cartilha%20RECESA%20Aterro%20Sanit%C3%A1rio.pdf>



Fonte: <http://www.hfc.com.br/aterro2.htm>

# Aterros Sanitários Convencionais

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

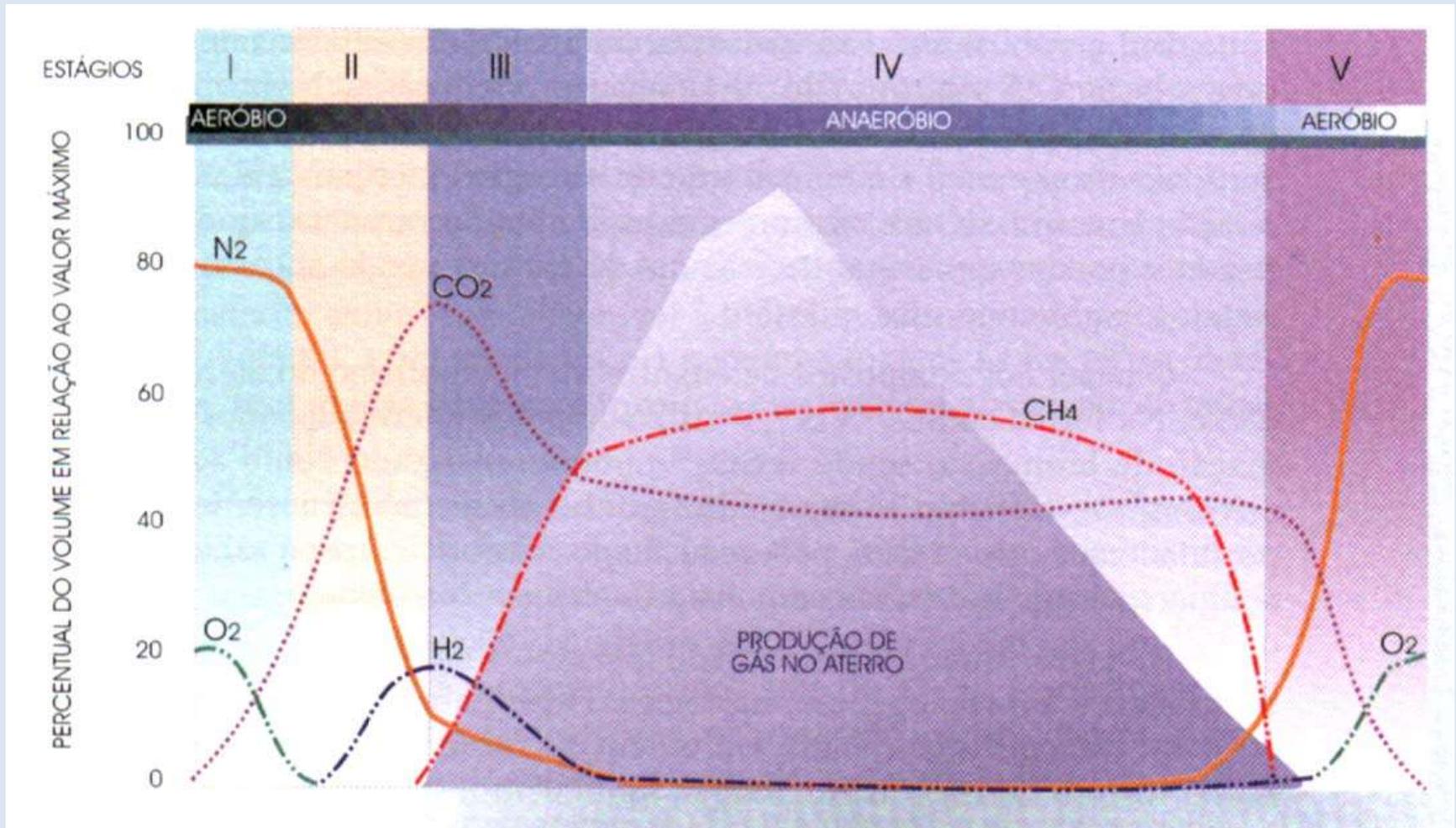
- **Cuidados – Trincas:**

- Como o aterro sofre recalques diferenciais, é comum que se apareçam trincas na superfície de cobertura do aterro.
- Essas trincas, assim que identificadas, devem ser seladas para se evitar emissões fugitivas de metano e também a entrada de água da chuva, que contribui para desestabilização dos taludes e aumenta a geração de lixiviados.
- Trincas não seladas podem ser também pontos de início de erosão da camada de cobertura do aterro.

# Aterros Sanitários Convencionais

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- Produção de Gás nos Aterros Sanitários:



# Aterros Sanitários Convencionais

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Produção de Gás nos Aterros Sanitários:**

- Um aterro sanitário pode ser concebido como um reator bioquímico, onde se entra com resíduos sólidos e água, e se obtém percolados e gás de aterro como produtos. O material descartado no aterro é composto parcialmente por matéria orgânica biodegradável (40 a 60%) e por outros resíduos inorgânicos (TCHOBANOGLOUS, 1993).
- A geração de gás metano em aterros sanitários ocorre logo que se inicia a bioestabilização da matéria orgânica em condições anaeróbias no interior do aterro (fase IV do diagrama - **fermentação metanogênica**)

# Aterros Sanitários Convencionais

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

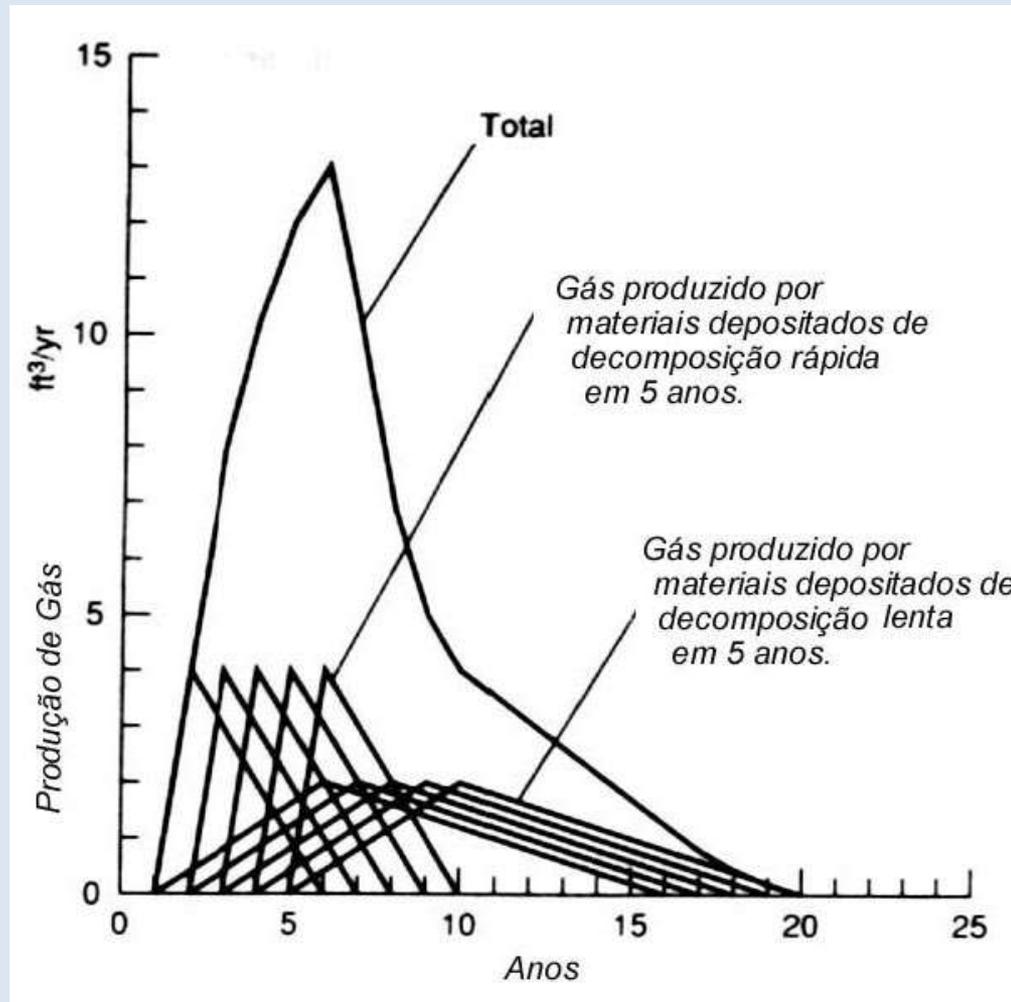
- **Produção de Gás nos Aterros Sanitários:**

- A taxa de variação na produção de gás depende da decomposição anaeróbia da matéria orgânica.
- Materiais facilmente biodegradáveis podem levar de alguns dias a até 5 anos para serem degradados no interior de um aterro.
- Materiais dificilmente biodegradáveis podem levar de 5 a 50 anos para serem degradados.
- O gás de aterro é composto por um número de gases presentes em grandes quantidades (gases principais) e de um número de gases que estão presentes em pequenas quantidades (gases traço).

# Aterros Sanitários Convencionais

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Produção de Gás nos Aterros Sanitários:**



Fonte: TCHOBANOGLIOUS (1993)

# Aterros Sanitários Convencionais

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Composição do Gás de Aterros Sanitários:**

Componente	Porcentagem (base em volume seco)*
Metano	45-60
Dióxido de Carbono	40-60
Nitrogênio	2-5
Oxigênio	0,1-1,0
Sulfetos, Dissulfetos, Mercaptanas, etc.	0-1,0
Amônia	0,1-1,0
Hidrogênio	0-0,2
Monóxido de Carbono	0-0,2
Constituintes Traço	0,01-0,6

\*A distribuição percentual exata varia de acordo com a idade do aterro sanitário.

Fonte: TCHOBANOGLIOUS (1993)

# Aterros Sanitários Convencionais

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Aproveitamento do Gás de Aterros Sanitários:**
  - Duas formas para geração de energia elétrica:
    - Queima direta do gás para geração de vapor d'água em caldeiras que são utilizados para geração de energia em turbinas que acionam geradores (não há necessidade de purificação do gás para queima).
    - Utilização do gás como combustível em motores de combustão interna, que acionam geradores (o gás deve ser livre de impurezas que possam reduzir a vida útil do motor e deve possuir poder calorífico suficiente, obtido através da remoção do dióxido de carbono ).
  - Dentre as instalações necessárias para aproveitamento do gás de aterros as principais estão:
    - Tubos de coleta;
    - Sistema de bombeamento de gás (sopradores);
    - Sistema de tratamento de condensado (remoção da umidade do gás);
    - Flare (queima de excesso); e
    - Sistema de tratamento de gás (remoção de impurezas);
    - Sistema de geração de energia.

# Aproveitamento de Gás de Aterro

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Aterro São João – São Paulo (encerrado):**

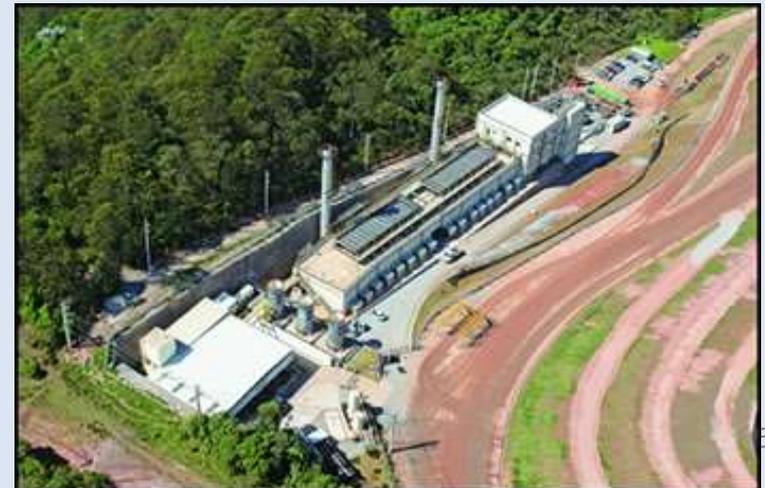
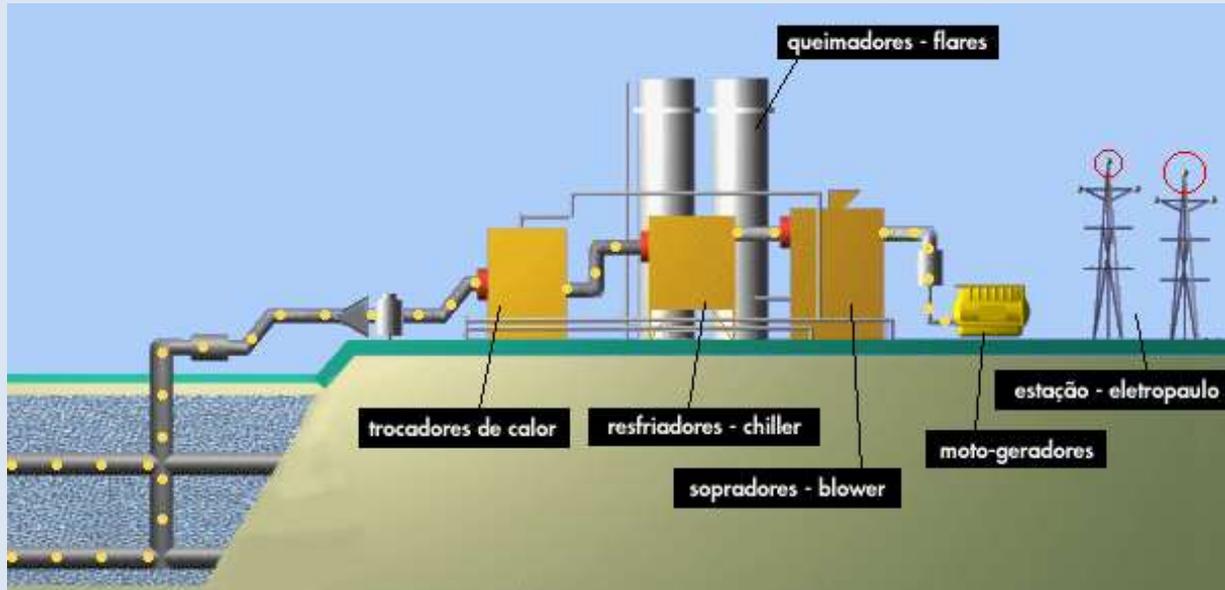


Fonte: <http://www.gasnet.com.br/conteudo/4578>

# Aproveitamento de Gás de Aterro

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- Aterro São João – São Paulo (encerrado):



Fonte: <http://www.gasnet.com.br/conteudo/4578>

# Aproveitamento de Gás de Aterro

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- Aterro São João – São Paulo (encerrado):



# Aproveitamento de Gás de Aterro

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- Aterro São João – São Paulo (encerrado):



# Aproveitamento de Gás de Aterro

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Aterro Bandeirantes – São Paulo (encerrado):**



# Aproveitamento de Gás de Aterro

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Aterro Bandeirantes – São Paulo (encerrado):**



# Aterros Reatores

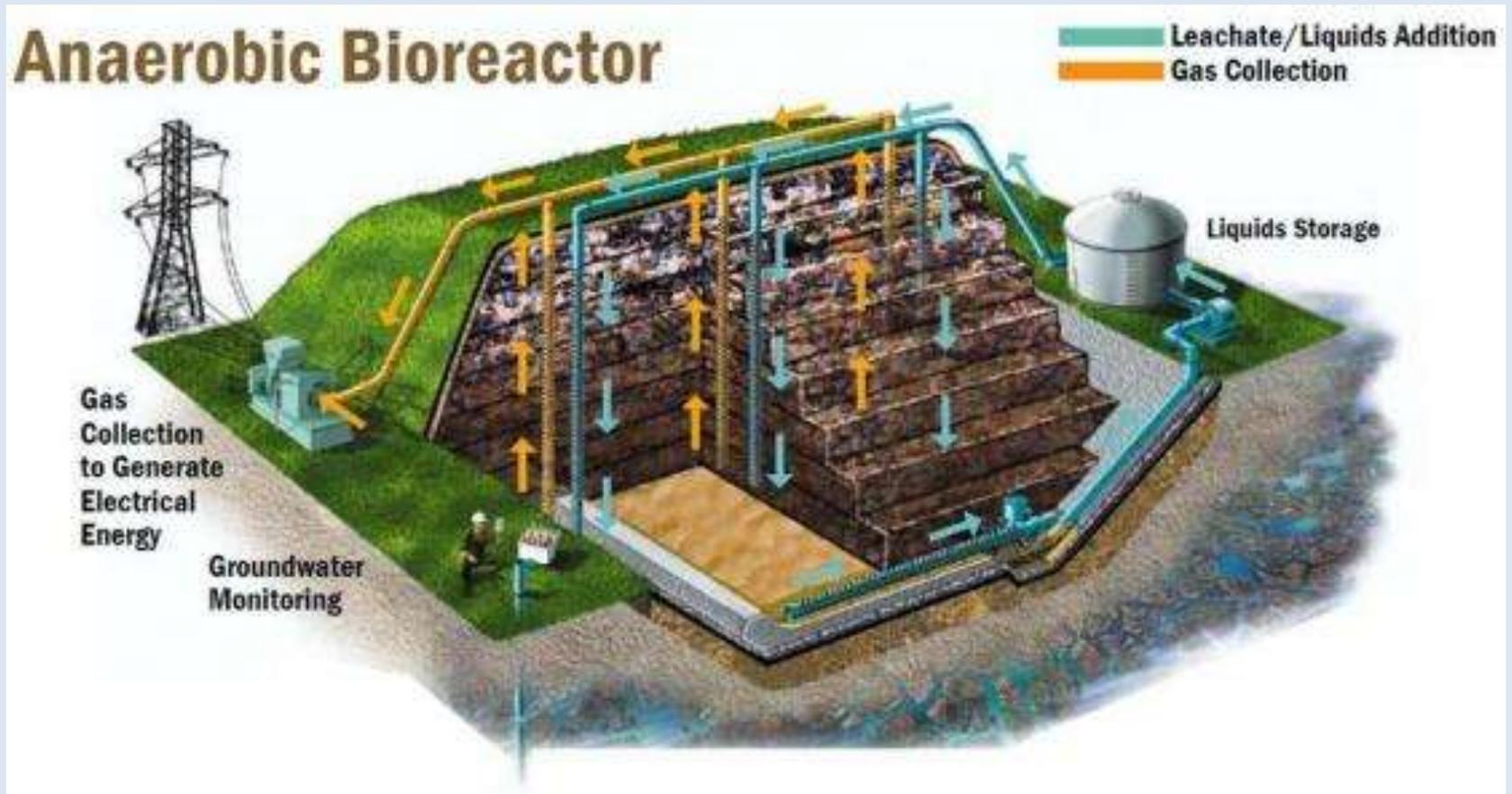
- **Definição:**

- São aterros sanitários concebidos e construídos com a finalidade de se acelerar a degradação da matéria orgânica em seu interior e extrair a maior quantidade possível de gás para utilização como combustível na produção de energia elétrica.
- Nesta concepção o aterro sanitário é projetado como um reator biológico.
- A aceleração da degradação é obtida através da recirculação controlada de lixiviados para obtenção das condições ideais de umidade para o processamento da digestão anaeróbia.
- Sistemas de aeração também podem ser concebidos para obtenção de aterros reatores facultativos ou aeróbios.

# Aterros Reatores

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- Aterro Anaeróbico:



# Aterros Sanitários Sustentáveis

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

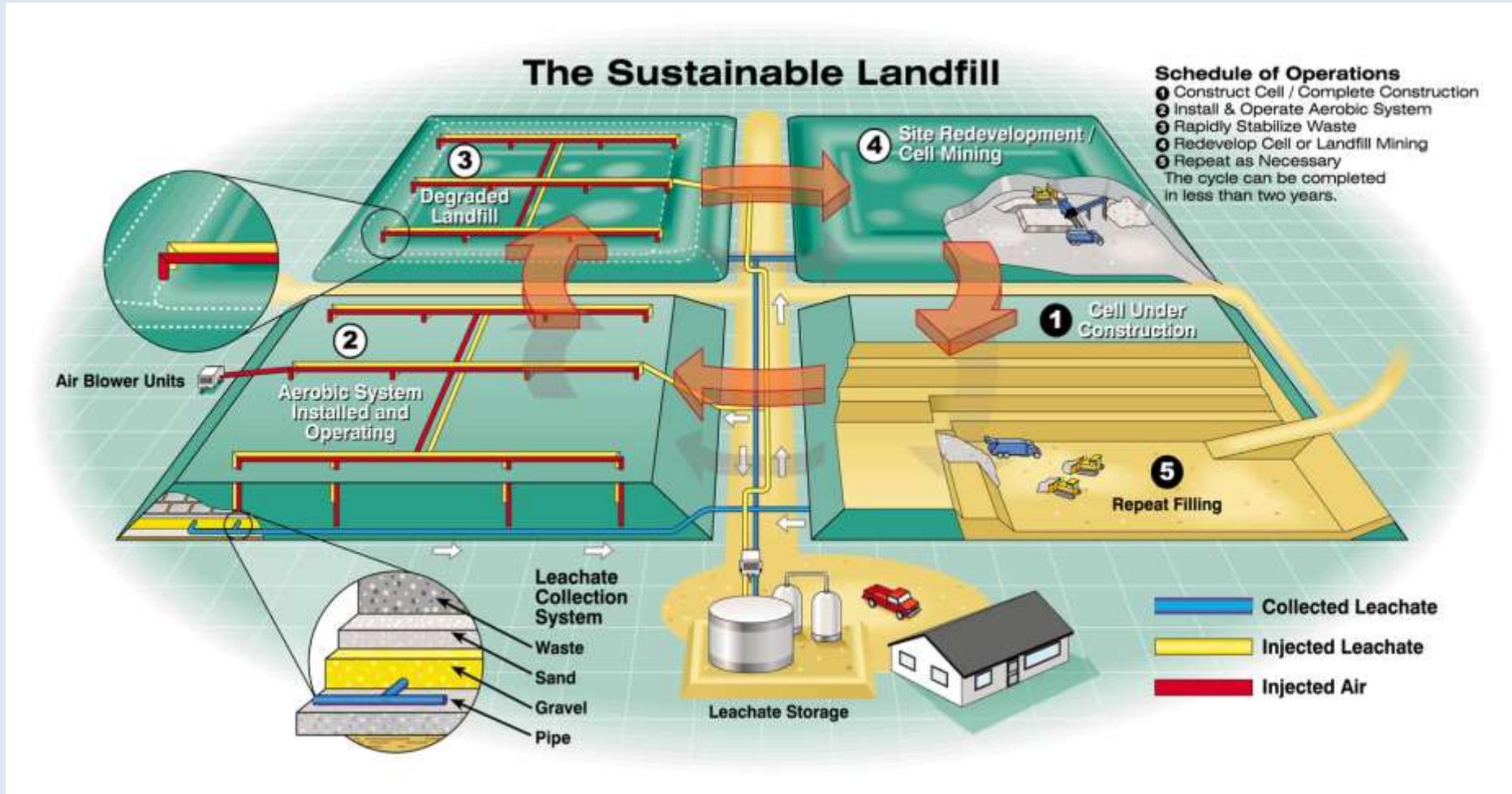
- **Definição:**

- Aterros sanitários sustentáveis são aterros de resíduos instalados com todos sistemas necessários de proteção ambiental, com ou sem aproveitamento energético dos resíduos, concebidos e operados para aceleração do tratamento anaeróbio/aeróbio dos resíduos aterrados, através da introdução umidade (recirculação de líquidos) e ar de forma controlada, com o objetivo de se acelerar a degradação dos resíduos, promovendo sua estabilização, para posterior mineração do aterro e extração de material reciclável, permitindo reutilização posterior da área para instalação de um novo aterro sustentável, e desta forma, repetindo-se o processo sucessivamente.
- É considerado sustentável em relação ao aterro sanitário convencional, por ser uma forma de tratamento de resíduos e não uma forma de disposição final, assim não se tornando um passivo para as futuras gerações.

# Aterros Sanitários Sustentáveis

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- Definição:



Fonte: <http://geosyntheticsmagazine.com>

# Lixiviados de Aterros Sanitários

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Geração:**
  - Varia muito de um local para outro e depende:
    - Da umidade inicial dos resíduos;
    - Da precipitação pluviométrica e drenagem de A.P. , incidência solar, evapotranspiração, entre outros fatores climáticos locais;
    - Do material de cobertura (tipo de solo, espessura da cobertura, uso de geossintéticos, cobertura vegetal, etc.);
    - Da conformação geométrica do aterro, número de camadas, compactação dos resíduos, coberturas intermediárias, etc.;
    - Do tipo e eficiência do sistema de drenagem de lixiviados;
    - Etc..
  - **Os métodos mais precisos de previsão de geração de lixiviados são aqueles que levam em consideração a geometria do aterro (projeto) e o maior número possível dos fatores listados acima.**

# Lixiviados de Aterros Sanitários

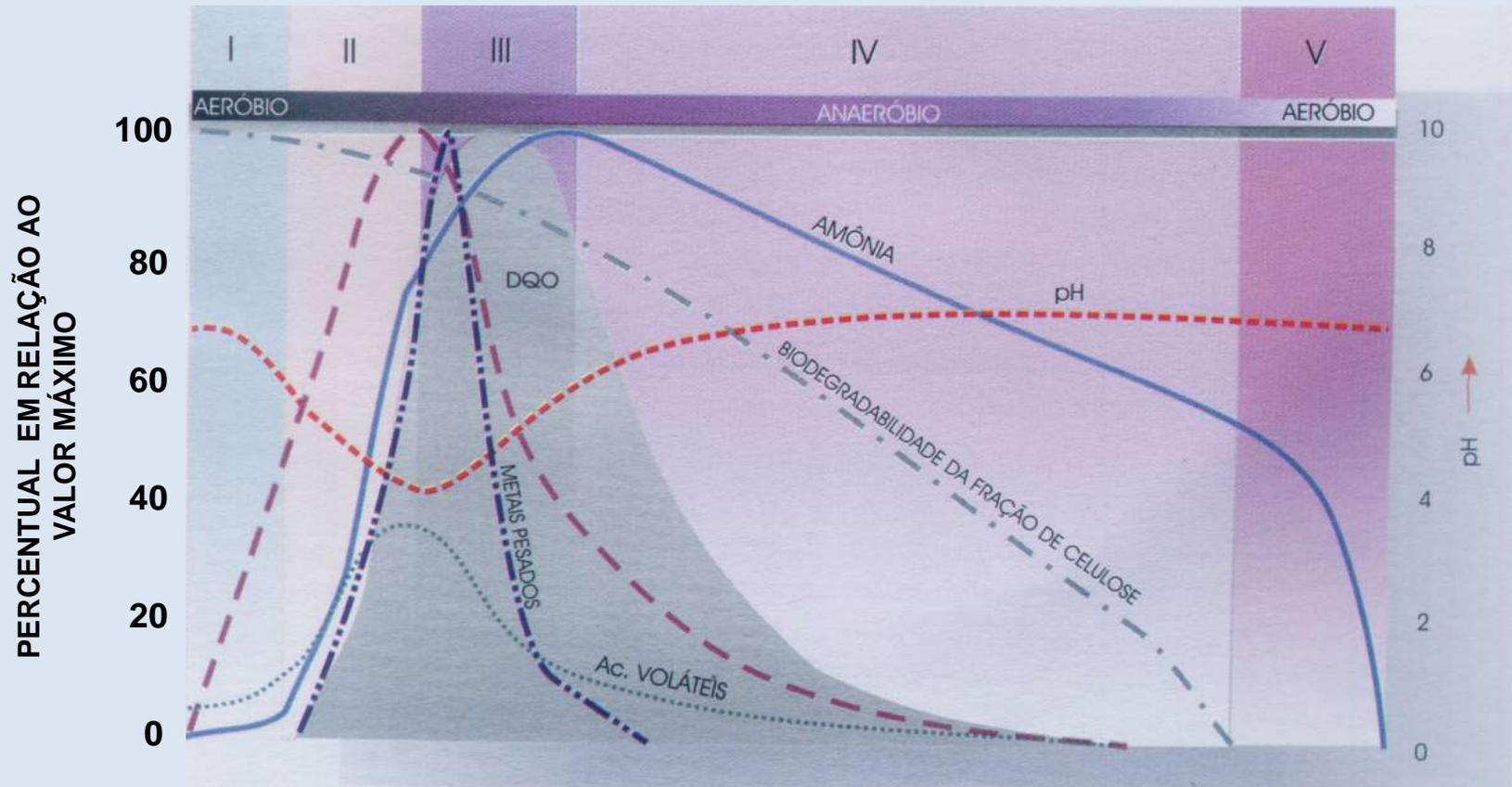
Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Composição:**
  - Também varia muito e é muito complexa.
  - Pode-se dizer que, “**só não se encontra na composição do lixiviado aquilo que não é procurado**”!
  - Varia muito de acordo com a idade dos aterros, tanto que geralmente as composições são divididas em duas faixas: “**aterros novos → Fase ácida**” e “**aterros velhos → Fase metanogênica**”.

# Lixiviados de Aterros Sanitários

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Composição:**



# Lixiviados de Aterros Sanitários

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- Composição → Compostos mais comuns:

Parameter	Range
pH	4.5-9
Spec. Cond. ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )	2500-35000
Total Solids	2000-60000
<i>Organic Matter</i>	
Total Organic Carbon (TOC)	30-20000
Biological Oxygen Demand (BOD <sub>5</sub> )	20-57000
Chemical Oxygen Demand (COD)	140-152000
BOD <sub>5</sub> /COD (ratio)	0.02-0.80
Organic nitrogen	14-2500
<i>Inorganic macrocomponents</i>	
Total phosphorous	0.1-23
Chloride	150-4500
Sulphate	8-7750
Hydrogenbicarbonate	610-7320
Sodium	70-7700
Potassium	50-3700
Ammonium-N	50-2200

Continuação

Parameter	Range
Calcium	10-7200
Magnesium	30-15000
Iron	3-5500
Manganese	0.03-1400
Silica	4-70 <sup>a</sup>
<i>Heavy metals</i>	
Arsenic	0.01-1
Cadmium	0.0001-0.4
Chromium	0.02-1.5
Cobolt	0.005-1.5
Copper	0.005-10
Lead	0.001-5
Mercury	0.00005-0.16
Nickel	0.015-13
Zinc	0.03-1000

Kjeldsen et al. (2002)

# Lixiviados de Aterros Sanitários

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

## • Composição → Compostos Tóxicos:

Compound	Range (µg/l)	Continuação	Continuação
<b>Aromatic hydrocarbons</b>		<b>Compound</b>	<b>Range (µg/l)</b>
Benzene	0.2-1630	<b>trans-1,2-Dichloroethylene</b>	1.6-6582
Toluene	1-12300	<b>cis-1,2-Dichloroethylene</b>	1.4-470
Xylenes	0.8-3500	<b>Trichloroethylene</b>	0.05-750
Ethylbenzene	0.22329	<b>Tetrachloroethylene</b>	0.01-250
Trimethylbenzenes	0.3-250	<b>Dichloromethane</b>	1.0-827
n-Propylbenzene	0.3-16	<b>Trichloromethane</b>	1.0-70
t-Butylbenzene	2.1-21	<b>Carbontetrachloride</b>	4.0-9.0
o-Ethyltoluene	0.5-46		
m-Ethyltoluene	0.3-21	<b>Phenols</b>	
p-Ethyltoluene	0.2-10	<b>Phenol</b>	0.6-1200
Naphthalene	0.1-260	<b>Ethylphenols</b>	<300
		<b>Cresols</b>	1-2100
<b>Halogenated hydrocarbons</b>		<b>Bisphenol A</b>	200-240
Chlorobenzene	0.1-110	<b>3,5-Dimethylphenol</b>	0.7-27.3
1,2-Dichlorobenzene	0.1-32	<b>2,5-Dimethylphenol</b>	0.4-4.5
1,3-Dichlorobenzene	5.4-19	<b>2,4-Dimethylphenol</b>	0.1-12.5
1,4-Dichlorobenzene	0.1-16	<b>3,4-Dimethylphenol</b>	0.03-10.4
1,2,3-Trichlorobenzene	I	<b>2,6-Dimethylphenol</b>	0.3-1.9
1,2,4-Trichlorobenzene	4.3	<b>2-Methoxyphenol</b>	I <sup>a</sup>
Hexachlorobenzene	0.025-10	<b>2/3-Chlorophenol</b>	0.03-1.6
1,1-Dichloroethane	0.6-46	<b>4-Chlorophenol</b>	0.2-1.3
1,2-Dichloroethane	<6	<b>4-Chloro-m-cresol</b>	1.2-10.2
1,1,1-Trichloroethane	0.01-3810	<b>3,5-Di-chlorophenol</b>	0.08-0.63
1,1,2-Trichloroethane	2.5-16	<b>2,3,4,6-Tetrachlorophenol</b>	0.079-3.0
1,1,2,2,-Tetrachloroethane	I		
		<b>Alkylphenols</b>	
		<b>Nonylphenol</b>	6.3-7
		<b>Nonylphenolmonocarboxylate</b>	0.5-3
		<b>Pesticides</b>	
		<b>Ametryn</b>	0.12
		<b>AMPA</b>	3.8-4.3
		<b>Atrazin</b>	0.16
		<b>Bentazon</b>	0.3-4.0
		<b>Chloridazon</b>	1.6
		<b>Chlorpropham</b>	26
		<b>Dichlobenil</b>	0.1-0.3
		<b>Fenpropimorf</b>	0.1
		<b>Glyphosat</b>	1.7-27
		<b>Hexazinon</b>	1.3
		<b>Hydroxyatrazin</b>	0.7-1.7
		<b>Hydroxysimazin</b>	0.6-1.7
		<b>Isoproturon</b>	1.2
		<b>Lindane</b>	0.025-0.95
		<b>Mecoprop<sup>I</sup></b>	0.38-150
		<b>MCPA</b>	0.2-9.1
		<b>Propoxuron</b>	2.6
		<b>Simazine</b>	2.3

# Lixiviados de Aterros Sanitários

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

## • Composição → Compostos Tóxicos:

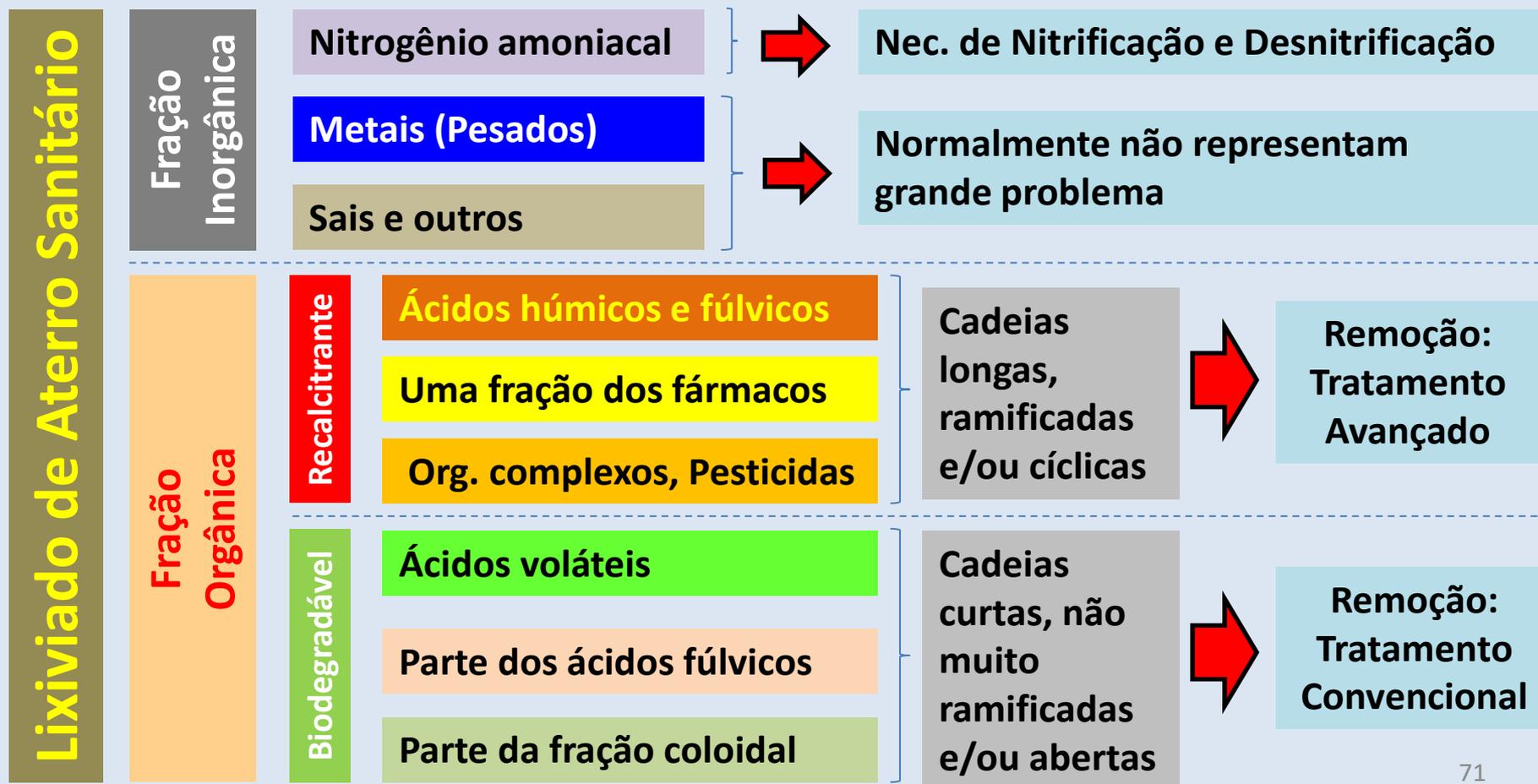
Continuação		Continuação		Continuação			
Compound	Range (µg/l)	Compound	Range (µg/l)	Compound	Range (µg/l)		
Tridimefon	2.1	<b>Aromatic sulfonates</b> Naphthalene-1-sulfonate	506-616	<b>Phosphonates</b>			
4-CPP	15-19			Tri-n-butylphosphate	1.2-360		
2,4-D <sup>2</sup>	1.0-5			Naphthalene-2-sulfonate	1143-1188	Triethylphosphate	15
2,4,5-T	1 <sup>4</sup>			Naphthalene-1,5-disulfonate	<2.5-51	<b>Miscellaneous</b>	
2,4-DP	0.3-5.2			Naphthalene-1,6-disulfonate	366-397	Acetone	6-4400
2,6-DCPP	0.7-1.3			Naphthalene-2,7-disulfonate	129-145	2(3H)-Benzothiazolone	10-50
<b>Phthalates</b>				2-aminonaphthalene-4,8-disulfonate	73-109	Camphor <sup>3</sup>	20.6-255.2
Monomethyl phthalate	1	p-toluenesulfonate	704-1084	Cumen	0.3-7.4		
Dimethyl phthalate	0.1-7.7			Fenchone	7.3-83		
Diethyl phthalate	0.1-660			Tetrahydrofuran	9-430		
Methyl-ethyl phthalate	2-340			Indane	0.2-20		
Mono-(2-ethylhexyl) phthalate	4-14			Methylethylketone	110-6600		
Di-(2-ethylhexyl) phthalate	0.6-235.9			Methyl-iso-butylketone	1.1-176		
Mono-butylphthalate	4-16			Dimethoxymethane	1.1		
Di-n-butylphthalate	0.1-70 5.0-15			MTBE	0.8-35		
Di-isobutylphthalate	3-6			Styrene	0.5-1.6		
Mono-benzylphthalate	6-16						
Butylbenzyl phthalate	0.2-8						
Dioctylphthalate	1-6						
Phthalic acid	2-14000						

<sup>1</sup> 2-(2-methyl-4-chlorophenoxy)propionic acid (MCPP)  
<sup>2</sup> Dichlorophenoxyacetic acid  
<sup>3</sup> 1,7,7-trimethyl-bicyclo(-bicyclo[2.2.1]-heptane-2-one)  
<sup>4</sup> I: Identified

# Lixiviados de Aterros Sanitários

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Composição:**
  - De forma esquemática e simplificada:

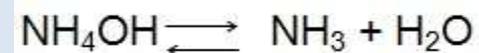
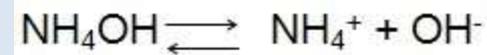


# Lixiviados de Aterros Sanitários

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Nitrogênio Amoniacal:**

- Pode ser oxidado a nitrito e nitrato o que consome energia ( $O_2$ );
- O nitrogênio (em suas diversas formas) pode causar eutrofização em rios e lagos, se não removido no tratamento → **Nutriente**;
- O N-amoniaco, dependendo da concentração, pode **inibir** ou **intoxicar** os microrganismos responsáveis pelo tratamento biológico;
- O nitrogênio amoniaco em solução apresenta-se em **duas frações**:
  - $NH_3$  (dissolvido, porém não dissociado) → **Amônia Livre (NAL)**
  - $NH_4^+$  dissolvido e dissociado → **Íon Amônio**
- A forma tóxica da amônia é a **Amônia Livre ( $NH_3$ )**.



$$K_a = \frac{[NH_4^+] \times [OH^-]}{[NH_4OH]}$$

# Lixiviados de Aterros Sanitários

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Nitrogênio Amoniacal:**

- O equilíbrio entre estas frações depende da concentração de Nitrogênio Amoniacal Total (NAT), da temperatura e do pH.

$$NAL = \frac{NAT}{1 + 10^{(pK_a - pH)}}$$

$$pK_a = 0,09018 + \frac{2729,92}{T + 273,15}$$

- Os graus de inibição ou limites de intoxicação variam de acordo com o tipo de tratamento biológico: **Aeróbio**, **Anóxico** ou **Anaeróbio**.
- Em alguns casos a remoção de matéria orgânica é prejudicada, e em outros a própria nitrificação é comprometida dependendo das concentrações de amônia livre.
- Adaptações são possíveis até **certas concentrações** de NAL.

# Lixiviados de Aterros Sanitários

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Nitrogênio Amoniacal:**

- A forma convencional de se remover nitrogênio é através da oxidação do nitrogênio amoniacal a nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) e depois a nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) através de processos aeróbios (nitrificação), e em seguida a redução do nitrato a nitrogênio gasoso ( $\text{N}_2$ ) através de tratamento em meio anóxico (desnitrificação), acrescido de uma fonte de carbono (matéria orgânica biodegradável).
- Outra forma de se remover nitrogênio é através da remoção por via curta , na qual o nitrogênio amoniacal é oxidado a nitrito e depois reduzido diretamente a nitrogênio gasoso em meio anóxico, sem chegar a nitrato, o que gera economia de energia, pois exige menos aeração. Entretanto este processo é mais complexo e exige muito mais controle que o convencional.

# Lixiviados de Aterros Sanitários

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Metais:**

- Sempre foi uma das grandes preocupações relacionadas ao tratamento de lixiviados no passado, mas hoje, praticamente virou **mito**.
- Em geral, os lixiviados **não apresentam concentrações muito elevadas de metais pesados**.
- Isso se deve ao fato de os metais formarem **complexos muito pouco solúveis** (principalmente com enxofre, fósforo e matéria orgânica), que ficam retidos no próprio aterro sanitário, e praticamente não são carregados pelos lixiviados. Isso pode explicar também concentrações baixas de **S** e **P** em alguns lixiviados.
- Em sistemas de tratamento os metais podem ser removidos por processos físico-químicos. No tratamento biológico os metais podem ser adsorvidos pela matéria orgânica da biomassa (acúmulo no lodo).

# Lixiviados de Aterros Sanitários

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Sais:**

- Normalmente não representam problemas, tanto para os tratamentos biológicos, quanto para os físico-químicos.
- Mesmo quando as concentrações são elevadas, é possível a adaptação de microrganismos.
- Representam problema quando no tratamento se tem que adicionar produtos químicos, que elevam a salinidade a níveis inibitórios ou tóxicos ao tratamento biológico.
- Dependendo dos íons presentes, podem ocorrer formação de precipitados, incrustações e entupimentos.
- Os íons mais comuns presentes são:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{CO}_3^{--}$  e  $\text{Cl}^-$ .
- A remoção por membranas é a mais indicada, quando necessário.

# Lixiviados de Aterros Sanitários

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Matéria Orgânica Recalcitrante (Biorrefratária):**
  - Normalmente composta por substâncias orgânicas de cadeias longas, muito ramificadas ou cíclicas, que os microrganismos não conseguem decompor parcialmente ou totalmente no tratamento biológico, no tempo de detenção disponível.
  - Estes compostos, normalmente, apresentam  $DBO_5$  muito baixa e DQO elevada.

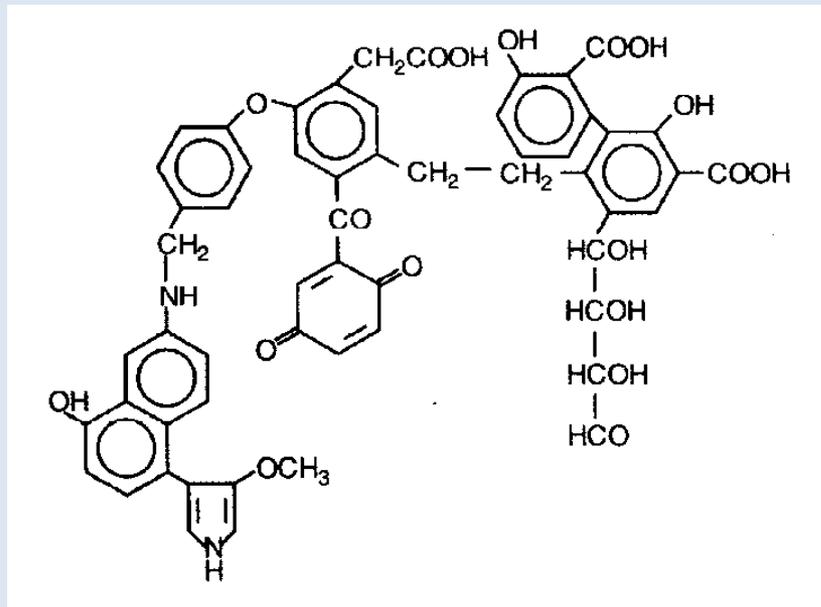
↓  $DBO_5$       ↑ DQO

- Relação  $DBO_5/DQO$  baixa.
- Podem ser divididos em dois grupos: os que não apresentam toxicidade e os que apresentam toxicidade.

# Lixiviados de Aterros Sanitários

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Matéria Orgânica Recalcitrante (Biorrefratária):**
  - A fração orgânica recalcitrante que não apresenta toxicidade, é composta por ácidos húmicos e fúlvicos, que são responsáveis, em maior parte, pela coloração escura (castanha) dos lixiviados e, teoricamente, não representariam problema se lançados em corpos hídricos, pois são comuns na natureza.



Estrutura genérica de uma molécula de uma substância húmica.

Fonte: vanLoon & Duffy (2004).

# Lixiviados de Aterros Sanitários

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

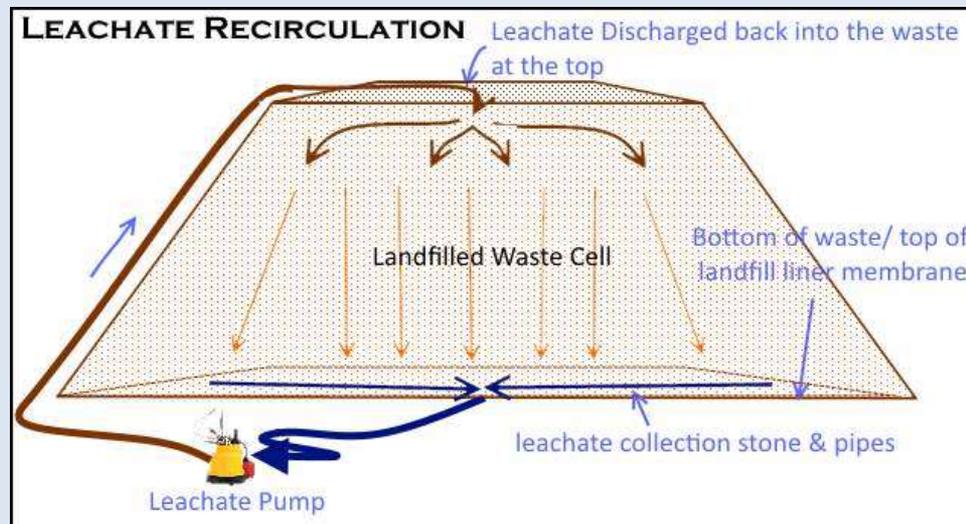
- **Matéria Orgânica Recalcitrante (Biorrefratária):**
  - A outra fração é aquela que confere toxicidade ao lixiviado.
  - Esta fração é composta por fármacos, pesticidas, solventes, plastificantes e uma série de substâncias químicas e orgânicas (alguns xenobióticos) com capacidade de reduzir e até cessar a atividade biológica de microrganismos e alguns organismos superiores.
  - **Estes compostos não são removidos em sistemas convencionais de tratamento!**
  - Os processos capazes de remover ou oxidar estas substâncias são: os Processos Oxidativos Avançados (POA), Membranas, Processos Enzimáticos, entre outros também caros e complexos.
  - **Cuidado!** → Alguns compostos oxidados podem ser mais tóxicos que os originais.

# Recirculação de Lixiviados no Aterro

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Características:**

- É uma técnica na qual os lixiviados são coletados através dos drenos do aterro e reintroduzidos no aterro através de um sistema de recirculação.
- Esta técnica considera que o aterro é um reator capaz de reduzir a concentração de matéria orgânica no lixiviado e também o volume de lixiviados gerados, devido à evapotranspiração do aterro.



# Recirculação de Lixiviados no Aterro

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Características:**

- A recirculação pode ser feita através de bombeamento do lixiviado para massa do aterro através de um sistema de distribuição, ou diretamente para seus drenos de gás, apesar desta última ser menos efetiva. Outra forma é a aspersão do lixiviado sobre o aterro utilizando-se aspersores, ou caminhões tanques ou carretas com sistemas de aspersão. Nesta última técnica, espera-se que a evaporação consuma grande parte do lixiviado antes de infiltrar.
- Esta técnica tem como vantagem a redução da carga orgânica biodegradável do lixiviado, bem como o seu volume e também, a aceleração da bio-estabilização da matéria orgânica aterrada.

# Recirculação de Lixiviados no Aterro

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Características:**

- O grande perigo desta técnica é o aumento excessivo da umidade da massa de resíduos no aterro, que em conjunto com o acréscimo da geração de gases, aumentam a pressão neutra dentro do aterro tendendo a desestabilizar os seus taludes, gerando riscos de deslizamentos.
- Por conta disso esta técnica requer muitos cuidados, principalmente com reação ao monitoramento da pressão neutra no aterro (piezômetros) e da estabilização de seus taludes (placas de recalque e deslocamento). Devido a estes riscos, as companhias ambientais costumam restringir e até proibir a utilização desta técnica.

# Tratamento Biológico de Lixiviados

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Características:**

- Em geral os tratamentos biológicos não são capazes sozinhos de tratar lixiviados produzindo efluentes que podem ser lançados nos corpos hídricos atendendo seus padrões de lançamentos.
- O tratamento mais simples e também considerados na maioria dos primeiros aterros foram as lagoas de estabilização, que na prática funcionam muito mais como tanques de contenção ou equalização, do que um sistema de tratamento em si, devido às baixas eficiências observadas na prática.



# Tratamento Biológico de Lixiviados

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Características:**

- Reatores anaeróbios são bons redutores de carga orgânica, porém seus efluentes não chegam nem perto das características necessárias para lançamento. Eles se adaptam bem às altas concentrações de nitrogênio amoniacal, porém a remoção de nitrogênio é praticamente insignificante nestes reatores.



Fonte:

<http://www.temes.com.br/produto.php?titulo=Distribuidor+Rotativo&id=140>



Fonte:

<http://meioambientedjc.blogspot.com.br/2011/10/ete-tratamento-secundario.html>

# Tratamento Biológico de Lixiviados

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Características:**

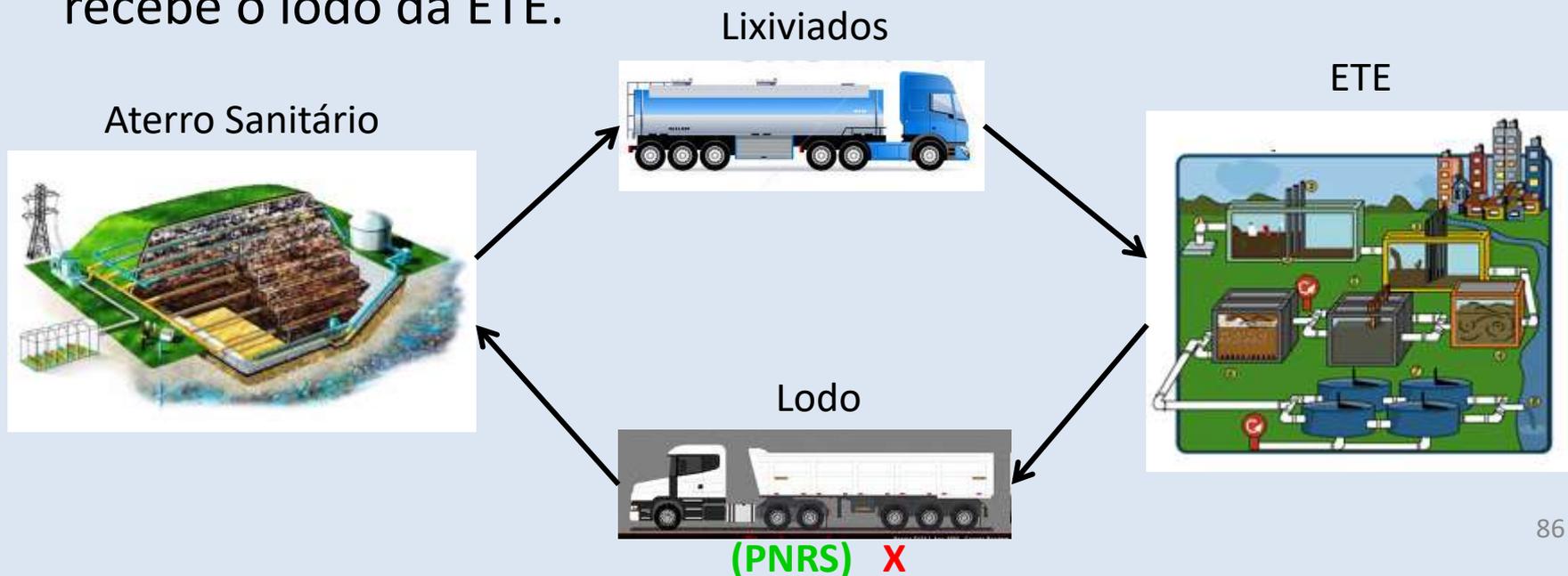
- Os reatores e sistemas aeróbios são normalmente mais eficientes que os anaeróbios. Conseguem remover mais matéria orgânica e ainda são capazes de oxidar o nitrogênio amoniacal a nitrito e nitrato.
- Sistemas anóxicos são normalmente utilizados para redução do nitrito ou nitrato a nitrogênio gasoso, promovendo a remoção do nitrogênio.
- Os alagados construídos, ou “*wetlands*” são sistemas que normalmente não funcionam com lixiviados sem pré-tratamento. São recomendados para remoção de nutrientes em baixas concentrações. A aplicação de lixiviado bruto nos alagados, com as características encontradas no Brasil, levam à morte da vegetação devido à elevada carga orgânica e de nitrogênio amoniacal.

# Tratamento Conjunto de Lixiviados

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Características:**

- É uma alternativa atraente, pois resolveria dois problemas em um único local, ou seja, a Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) trataria esgotos e lixiviados.
- Muitos municípios possuem acordos entre as ETEs e os aterros sanitários, na qual a ETE recebe os lixiviados do aterro e o aterro recebe o lodo da ETE.



# Tratamento Conjunto de Lixiviados

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Considerações:**

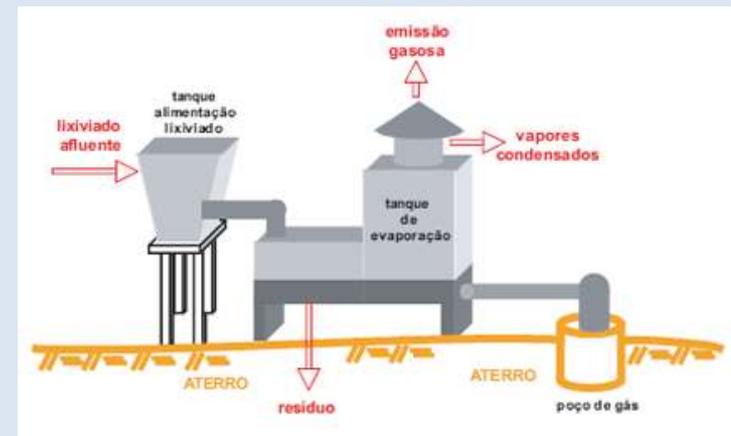
- Quando a preocupação era toda voltada à remoção de DBO (até a década de 90) podia-se enxergar como vantajoso o tratamento conjunto. **Principalmente quando se pensava na diluição!**
- No caso dos recalcitrantes, uma ETE convencional praticamente só dilui estes compostos (**tratamento por diluição é crime!**).
- Pensando-se na remoção de recalcitrantes e toxicidade, o tratamento conjunto é menos favoráveis à remoção destes compostos (**condições não otimizadas** para estes compostos).
- Apesar da diluição, os acréscimos nas concentrações de N-amoniacal **são relevantes** e ainda podem **gerar inibições**.
- Os metais possuem **efeito cumulativo** no lodo da ETE (precipitação, adsorção, assimilação, etc.).

# Sistemas de Evaporação

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Características:**

- Um sistema com aplicação eminente é o da evaporação dos lixiviados utilizando-se o próprio gás do aterro como combustível.
- Um problema deste sistema é a transferência da amônia e compostos orgânicos voláteis para o ar. Outro problema é o resíduo concentrado que sobra e que é recirculado no aterro. Além disso, eventualmente há necessidade de complementação com outra fonte de gás para evaporação de lixiviado.



# Novas Tendências

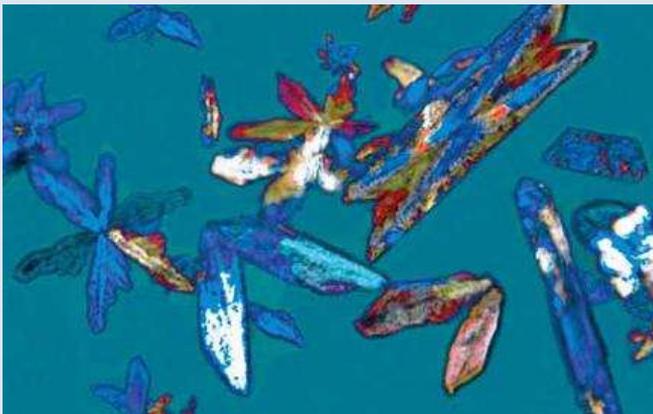
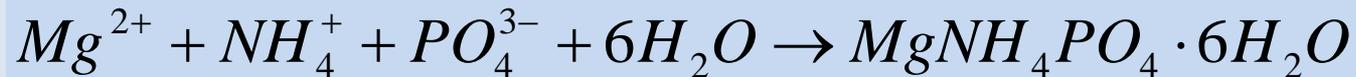
Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Recuperação de Nutrientes:**
  - Atualmente o conceito em prática no Brasil é o da **remoção de nutrientes**, ou seja, transferir o nutriente da fase líquida para as fases gasosa (atmosfera) ou sólida (lodo).
  - Este conceito terá que mudar para o da recuperação de nutrientes.
  - É um desperdício gastar recursos e energia para se remover N e P, sendo que estes são de difícil obtenção e essenciais na agricultura.
  - Hoje, se por um lado o Brasil importa e paga caro por insumos agrícolas, por outro lado gasta recursos e energia para remover estes nutrientes das águas residuárias, levando **N-amoniaco** e **N-Orgânico** a **N<sub>2</sub>** (fase gasosa) que vai para atmosfera e restando **P** nos **lodos** (fase sólida) que vão para aterros sanitários.

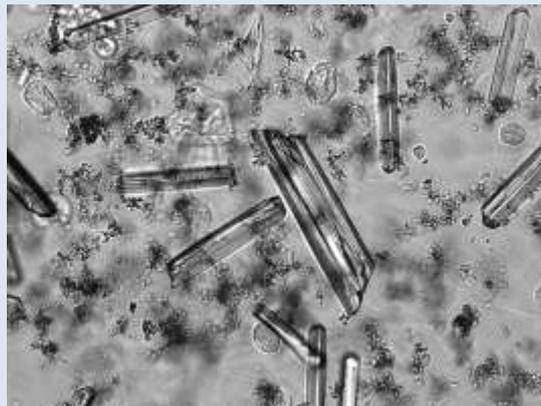
# Novas Tendências

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Recuperação de Nutrientes:**
  - **Porque não recuperar estes nutrientes e utilizá-los na agricultura?**
  - **Possibilidades no caso dos lixiviados de aterros sanitários:**
  - Recuperação simultânea de N, P e Mg através da precipitação de estruvita.



<http://dogaware.com/articles/wdjstruvites.html>



[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Struvite\\_crystals\\_\(urine\) -  
\\_Str%C3%BCvit\\_kristalleri\\_\(idrar\)\\_-\\_02.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Struvite_crystals_(urine)_-_Str%C3%BCvit_kristalleri_(idrar)_-_02.png)



[lotusindustrial.en.busytrade.com/products/info/2427564/Struvite-Mineral-magnesium-Ammonium-Phosphate-.html](http://lotusindustrial.en.busytrade.com/products/info/2427564/Struvite-Mineral-magnesium-Ammonium-Phosphate-.html)

# Novas Tendências

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

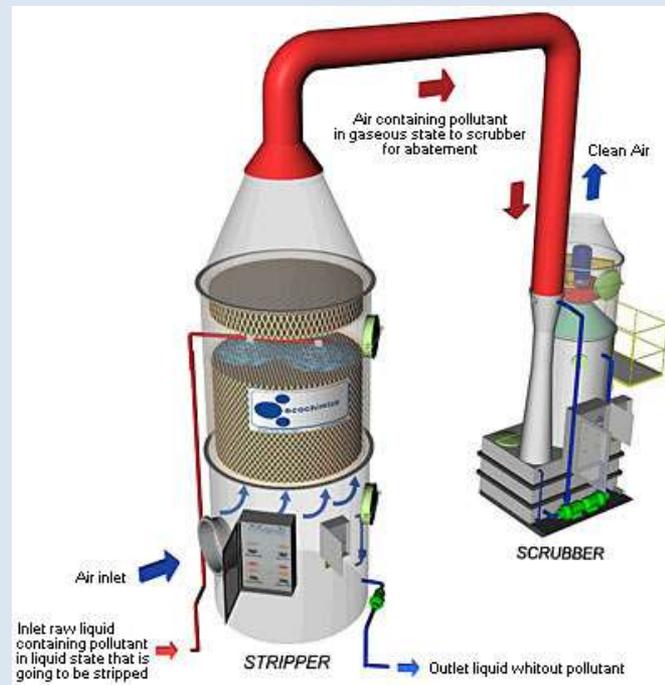
- **Recuperação de Nutrientes:**
  - Precipitação de outros sais contendo nutrientes, mesmo que não sejam tão completos quanto à estruvita.
  - Ex: Cloreto de Amônio, Cloreto de Potássio, Nitrato de Amônio, Sulfato de Amônio, Fosfatos em geral, etc...
  - Para cada local, dependendo das características e concentrações de nutrientes existentes no lixiviado, a obtenção de um determinado sal pode ser vantajosa em relação a outros.
  - Pode-se também **adicionar outros íons** ao lixiviado para favorecimento da precipitação de determinados sais.
  - A extração pode ser feita também a partir de **concentrados** provenientes de tratamentos térmicos ou com membranas.

# Novas Tendências

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Recuperação de Nutrientes:**

- *Stripping* da amônia com sua recuperação na forma de carbonato de amônia, cloreto de amônio ou sulfato de amônio, etc. através da lavagem dos gases do *stripping*.
- Evita o lançamento de amônia para atmosfera e proporciona recuperação de nutrientes.



<http://www.ecochimica.com/eng/TORRE%20STRIPPA%20GGIO%20SERIE%20TW-STR.php>

# Cuidado!

- **O Tratamento Conjunto de Lixiviados e Esgotos:**
  - Deve ser a **última alternativa** a ser considerada para o tratamento de lixiviados pois, **gera impactos negativos nos sistemas de tratamento de esgotos**;
  - Só deve ser considerada, caso a ETE tenha sido projetada para **remoção de nutrientes**, caso contrário, esta alternativa **nem deve ser considerada**;
  - Somente **dilui** a maior parte dos componentes dos lixiviados ao invés de tratá-los (compostos recalcitrantes);
  - Requer **adaptação da biomassa** em sistemas biológicos de tratamento;

# Cuidado!

- **O Tratamento Conjunto de Lixiviados e Esgotos:**
  - **Eleva os custos** de operação da ETE (aumento de carga orgânica e de nitrogênio além do controle e gestão necessários);
  - **Piora a qualidade** dos efluentes tratados da ETE;
  - Aumenta o **risco de contaminação dos corpos hídricos** em caso de instabilidades ou falhas operacionais;
  - **Dificulta a recuperação de nutrientes** com valor comercial e potencial para uso agrícola;
  - **Assim como no tratamento de resíduos sólidos, a mistura de diferentes resíduos, com características diferentes, só dificulta o tratamento, então por quê a mistura de dois efluentes tão diferentes iria facilitar a solução do problema?**