

10 – Lagoas de estabilização

Lagoas naturais ou artificiais com finalidade de tratar esgotos sanitários.

De pequena profundidade, estas lagoas são construídas em diques de terra e fundo compactadas e impermeabilizadas

REATORES ABERTOS NÃO MECANIZADOS

10.1 – Lagoas anaeróbias

- Convencionais
- Alta taxa

10.2 – Lagoas Facultativas

- Primárias
- Secundárias

10.3 – Lagoas de Maturação







<http://www.ufrj.br/institutos/it/de/acidentes/esg4.htm>

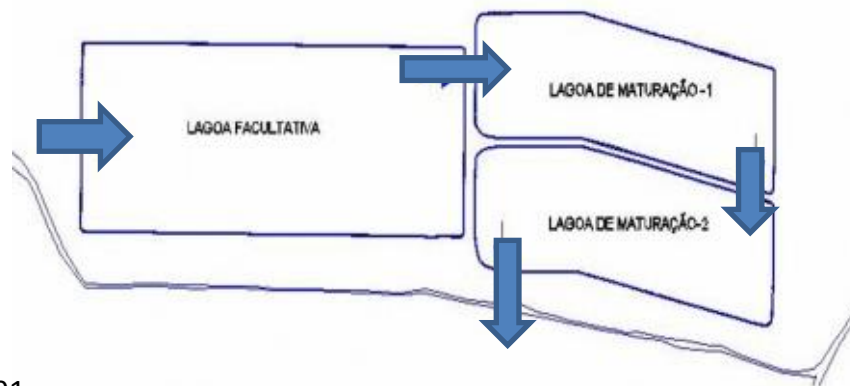
USP-Piveli





Lagoas de Estabilização
construída, pela SANEMAT, em 1986.
População: 50 mil hab, 4 bairros: CPA 2, 3,
4 e Novo Mato Grosso.

<http://www.sanecap.com.br/TNX/conteudo.php?sid=129&cid=2891>



Classificação

LAGOAS ANAERÓBIAS

Tratamento primário

Projetada para receber altas cargas

LAGOAS FACULTATIVAS

Tratamento primário

Ou também

Tratamento secundário

- Tratamento secundário: receber e tratar efluente das LA: ausência de OD, com amônia e sulfetos.

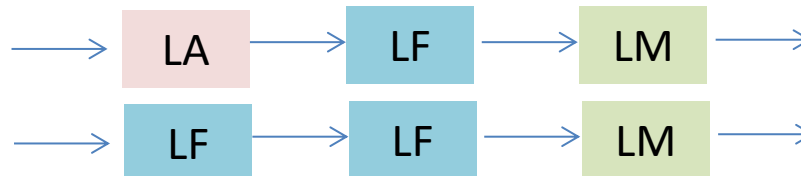
LAGOAS DE MATURAÇÃO

Lagoas facultativas terciárias
Lagoas de polimento

Tratamento terciário

- Principalmente para remoção de patogênicos
- Ocorre pequeno decaimento de MO

CONFIGURAÇÕES:



VANTAGENS

- Simplicidade construtiva
- Ausência de equipamentos mecanizados
- Facilidade operacional
- Eficiência satisfatória



DESVANTAGENS

- Requer maiores áreas que processos mecanizados → Grandes populações torna projeto inviável

PROCEDIMENTO MAIS USUAL PARA REDUÇÃO DE ÁREA:

Sistema australiano (Parker et al., 1950)

Lagoas em série

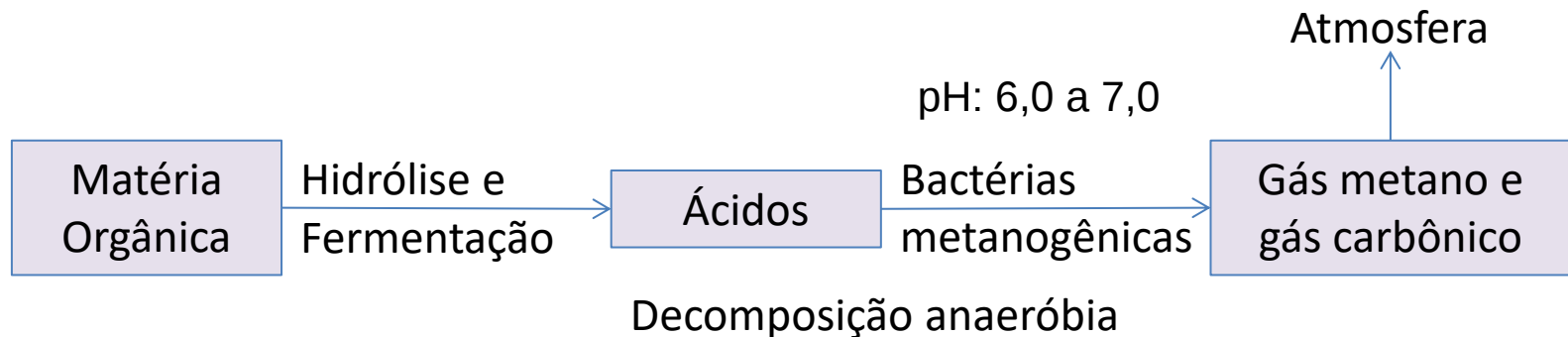


Redução de área aproximada: 30%

-
- **Dimensionamento** baseado em:
 - **Métodos empíricos e racionais**
 - O estabelecimento da **profundidade** está relacionado basicamente a:
 - Evitar crescimento da vegetação na lagoa: > 60 cm
 - Odor: $h > 1,5 \text{ m} \rightarrow$ cond. anaeróbia no fundo
 - Dados climáticos: evaporação, temperatura, insolação
 - Tipo da lagoa:
 - ~~(Aeróbia: 0,9-1,0 cm)~~
 - Facultativa: 1-1,5 m; 1,5-2,0 m
 - Anaeróbia: ~3m; 3-5m; 4-5m

10.1 - Lagoas anaeróbias

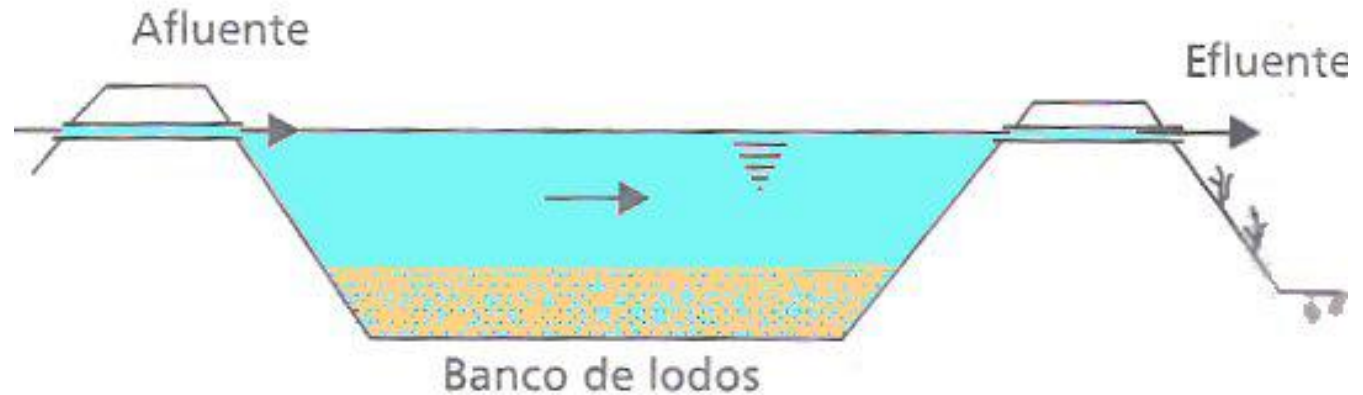
- Dimensionadas para receber carga orgânica elevada (Carga >> que das LF)
 - Menor área de implantação
 - Em toda a lagoa: completamente isenta de OD → decomposição da MO em condição anaeróbia
- Eficiência de remoção: 50-60% (bem projetadas e sob condições ambientais favoráveis)
- Processos:



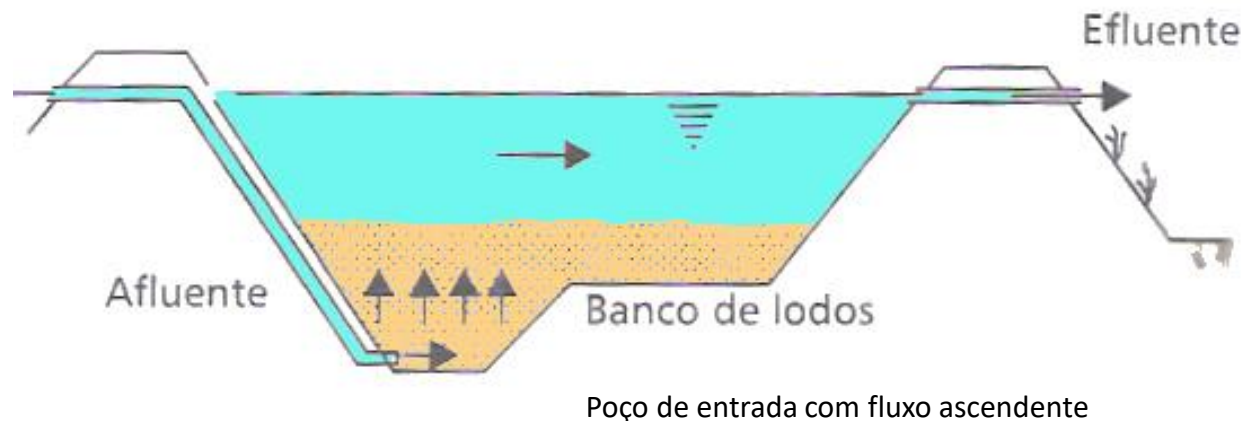
Modelos hidráulicos básicos

[Ref.2]

Lagoas Anaeróbias Convencionais



Lagoas Anaeróbias de Alta Taxa



10.1.1 – Lagoas Anaeróbias Convencionais

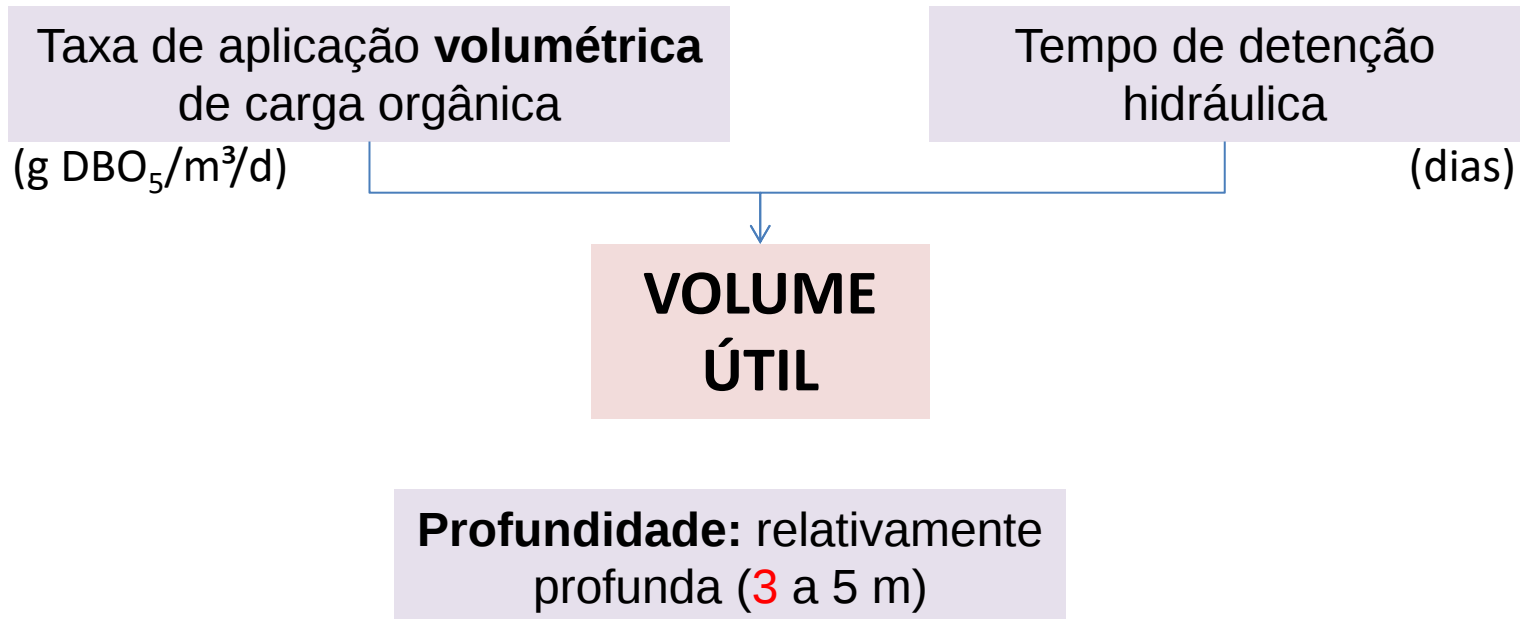
Valores determinados a partir de:

[Ref.2]

Observações
experimentais

Tipo de efluente
a ser tratado

Condições
ambientais locais

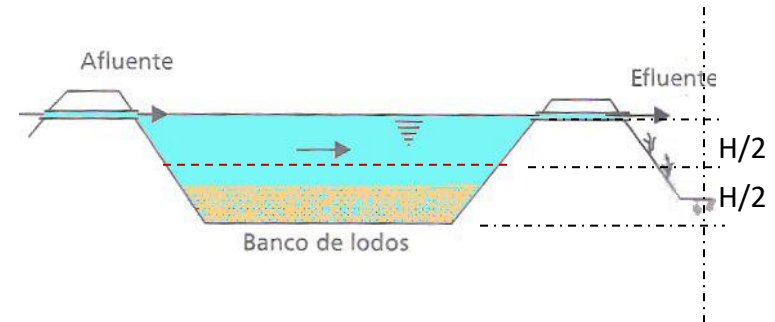


Carga volumétrica ou Taxa de aplicação volumétrica

Taxa de aplicação volumétrica

[Ref.2]

$$\lambda_v = \frac{L_i Q}{A_{1/2} H} \quad \text{ou} \quad \lambda_v = \frac{L_i}{T_d}$$



λ_v : Taxa volumétrica de DBO_5 , aplicada a lagoa [$\text{g}/(\text{m}^3\text{d})$]

L_i : DBO_5 afluente [mg/L]
 Q : Vazão [m^3/d]

} Carga de MO afluente

H : profundidade da lagoa [m]

T_d : tempo de detenção [d]

$A_{1/2}$: área da lagoa a meia profundidade [m^2]

Temperatura média do mês mais frio do ano (°C)	Taxa de aplicação volumétrica (g DBO ₅ . m ⁻³ .d ⁻¹)	Remoção de DBO ₅ (%)	Fonte
< 10	100	40	Mara & Pearson (1986) [Ref.2]
10-20	20.T - 100	2T + 20	
> 20	300	60	
	100 a 400 Recomendado: 250		Silva & Mara

T: Temperatura (°C)

$\lambda_v < \lambda_{mín}$ → difícil manter a lagoa completamente anaeróbia

$\lambda_v > \lambda_{máx}$ → risco de mau odor

Tempo de detenção hidráulica

Valores recomendados:

Temperatura da água da lagoa (°C)	Tempo de detenção hidráulica (d)	Remoção provável de DBO (%)	Fonte
10-15	4-5	30-40	Arceivala (1981) [Ref.2 - Prosab]
15-20	3-4	40-50	
20-25	2,5-3	50-60	
25-30	2-5	60-70	
>20 (mesmo no inverno)	3-5		[Ref.1 - Nuvolari]
<20	4-6		
	5		Parker & Mara

Recomenda-se: $3d < T_d < 6d$

Taxa de aplicação superficial

[Ref.2]

Em Lagoas Anaeróbias funciona como parâmetro de verificação da condição anaeróbia do sistema.

$$\lambda > 1.000 \text{ kg DBO}_5 \text{ ha}^{-1} \text{ d}^{-1} \rightarrow \text{garante condição anaeróbia}$$

[Ref.1]

Início de plano:

$$\lambda_{\text{mín}} \gg 20 T_v - 60$$

Assegurar não ocorrência de condição aeróbia

T_v : Temperatura máxima de verão

λ : kg/(ha.d)

Para $T=35^\circ\text{C} \rightarrow \lambda \gg 640 \text{ kg}/(\text{ha.d})$

Fim de plano:

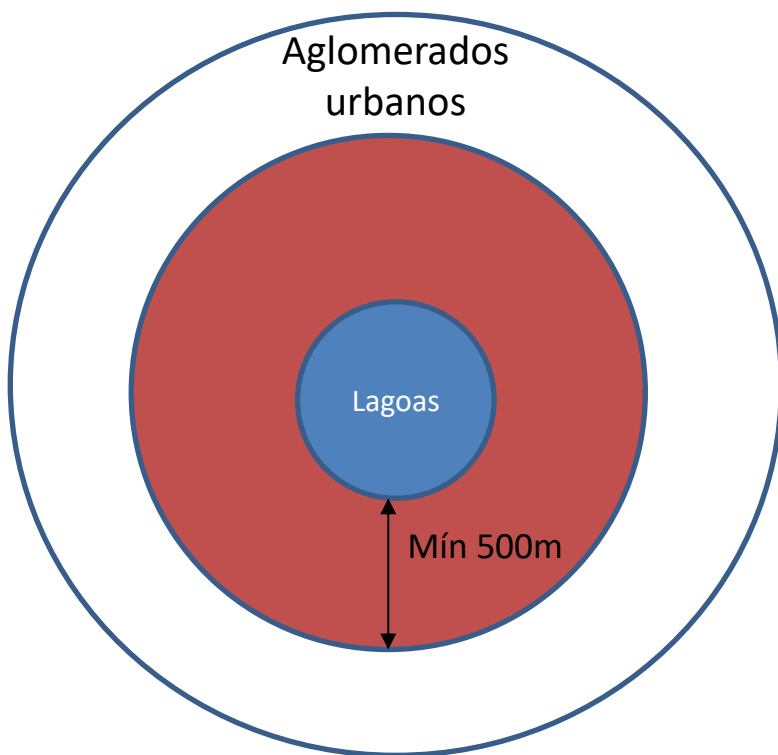
$$\lambda_{\text{máx}} < 2000 \text{ kg DBO}/(\text{ha.d})$$

Assegurar não ocorrência de maus odores

Estado de SP:

$$500 < \lambda < 1500 \text{ kg DBO}/(\text{ha.d})$$

Distância mínima de aglomerados urbanos:



Ver: Vento
predominante

Formato das lagoas:

- Não é regular, se adapta a topografia (diminuir custos com movimentos de terra)
- evitar zonas mortas (hidráulica)
- Relação comprimento/largura na faixa de 1:1 a 3:1, para evitar mau cheiro

Eficiência de remoção esperada

Eficiência de remoção da DBO solúvel:

Ref.1

Resultado de estudo realizado por Kawai et al. (1983)

- Dados de 6 lagoas anaeróbias primárias dos Estados de SP e PR
- Taxa de aplicação superficial: 530 a 2300 kg DBO/(ha.d)

$$\lambda_{\text{remov}} = 0,6867 \lambda_{\text{aplic}} - 14,4555$$

No Brasil, tem-se adotado:

- Eficiência máxima de 50% para T até 20°C
- Eficiência máxima de 60% para T acima de 20°C

Eficiência de remoção de coliformes fecais:

- Remoção da ordem de 67-94% (CETESB, 1981, valores de 7 sistemas de lagoas de SP)
- Remoção em condições anaeróbias é menor que em condições aeróbias (Von Sperling)

10.1.2 – Lagoas Anaeróbias de Alta Taxa

- Poucos resultados disponíveis quanto ao desempenho e taxa de acúmulo de sólidos
- Importante:
 - Distribuição, o mais uniforme possível, do esgoto afluyente junto ao fundo do reator
 - Tempo de detenção hidráulica para cálculo do volume do poço de entrada (>24h)
- Projetada e operada sem previsão de descarte de lodo
→ necessário previsão de volume adicional para lodo digerido = $f(\text{grau de adensamento do lodo digerido, tempo de armazenamento desejado})$

Cuidados – Projeto e Implantação

Ref.2

- Garantir adequada mistura do afluente com o conteúdo da lagoa
 - Minimizar curtos circuitos
 - Minimizar formação de camadas estratificantes
 - Comprimento $< 3 \times$ Largura
- Dimensionamento: T nas condições de inverno
 - Regiões de clima temperado e subtropical: T a meia profundidade são 2 a 4°C acima da média da T_{ar} no mês mais frio do ano

Taxa de acumulação do lodo

0,003 a 0,004 m³/(hab.d)

Remoção: quando atingir metade de sua profundidade.

Isto pode ocorrer a cada n anos:

$$n = \frac{1}{2} \frac{V}{K \text{Pop}}$$

V : volume da lagoa [m³]

K : taxa de acumulação de lodo [m³/(hab.ano)]

Pop: número de habitantes

SISTEMA: LAGOA ANAERÓBIA - LAGOA FACULTATIVA



Tratamento
preliminar

Tratamento
primário

Tratamento
secundário

(+) Reduz
dimensões dos
tratamentos
posteriores

(-) Competição
entre org.
produtores de
metano e org.
indesejáveis

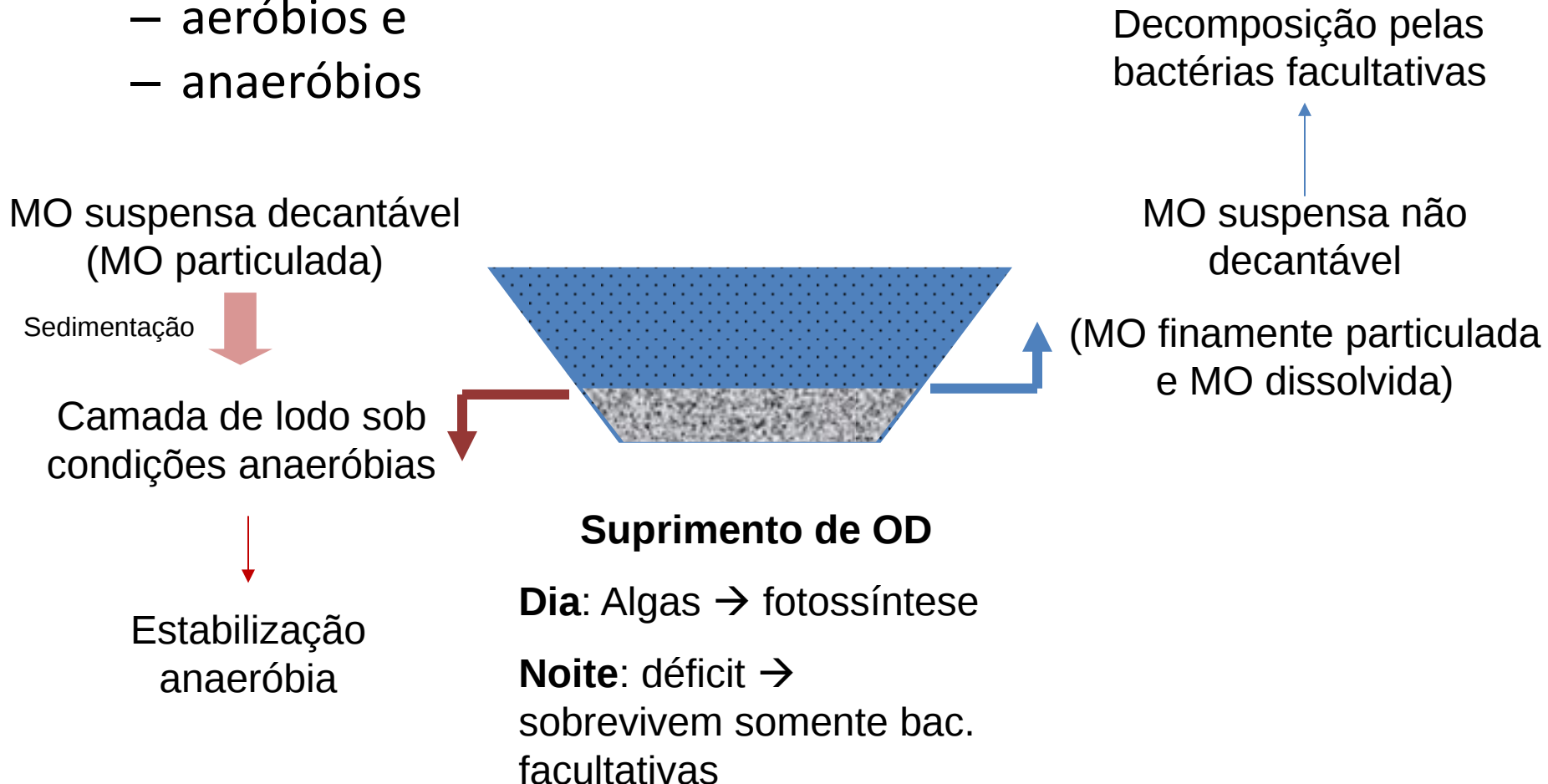
Ex: Bactérias redutoras de
sulfatos, responsáveis pelo
mau cheiro

10.2 - Lagoas facultativas

[Ref. 1]

- Possui processos de digestão da MO:

- aeróbios e
- anaeróbios



10.2.1 - Lagoas Facultativas Primárias

- **Profundidade:**
 - 1,0 a 1,5 m → efluentes na faixa de 50 a 70 mg/L
 - Recomendado: 1,5 a 2,0 m (usual: 1,8 m) → [Ref.1]
 - >2,0 m → recomendado para climas áridos com alta taxa de evaporação e em climas frios para preservar a energia térmica existente no afluente.
- **Taxa de carga orgânica superficial máxima permissível** → garantia de condições não anaeróbias
- **Métodos de dimensionamento:**
 - Método de cargas superficiais
 - Método da degradação de primeira ordem
 - Método do escoamento com carga parcialmente dispersa
 - Método empírico de McGarry e Pescod
 - Método de Gloyna
 - Método de Morais e Shaw

a) Método das cargas superficiais

Método mais utilizado

$$A = \frac{L_i Q}{\lambda_s}$$

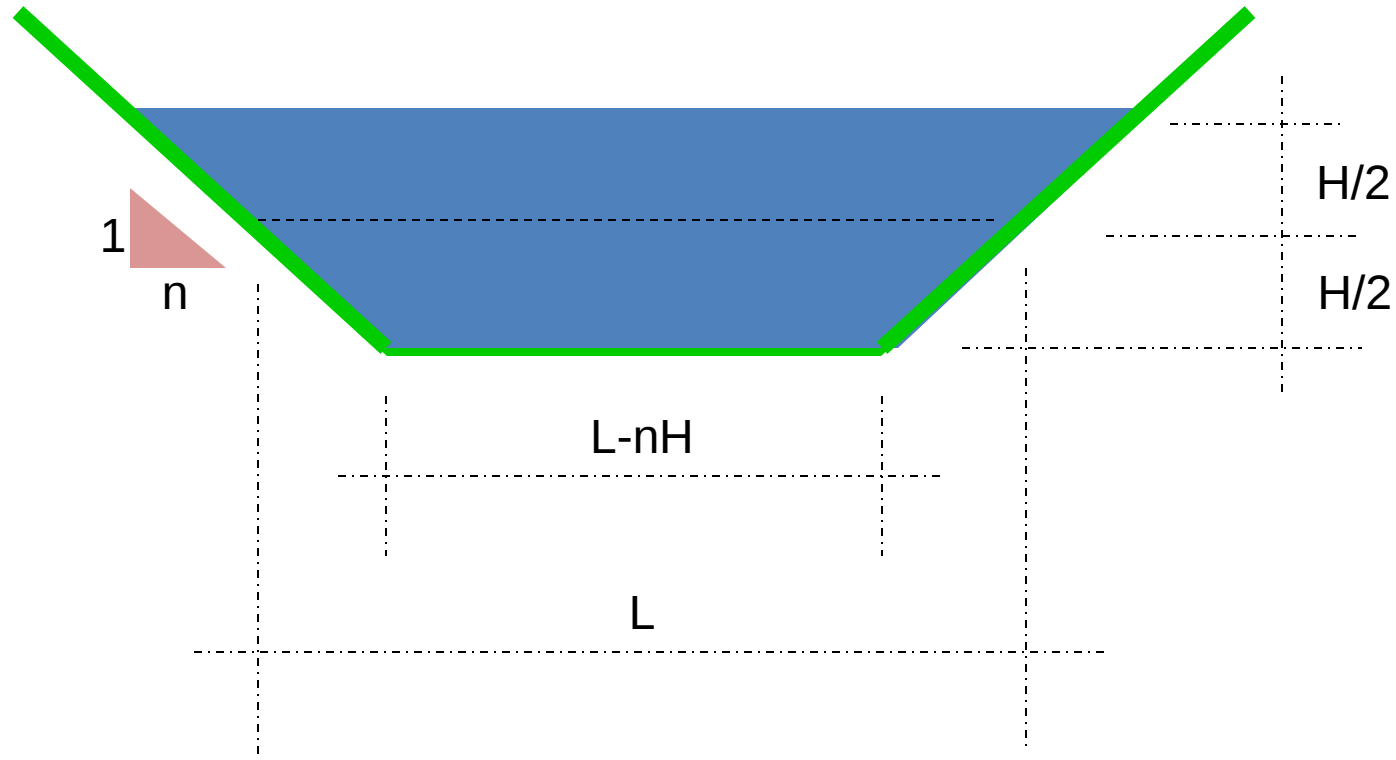
A : Área a ½ profundidade

Q : vazão afluente

L_i : DBO₅ afluente

λ_s : Taxa de aplicação de DBO₅ de projeto

Cálculo das dimensões de fundo em função de A



b) Método empírico de McGarry e Pescod

- Indicado para regiões com pouca ou nenhuma experiência em lagoas de estabilização
- A carga superficial máxima de DBO_5 (para que não se torne predominantemente anaeróbia nas condições críticas de inverno):

$$\lambda_{S,\max} = 60,29(1,0993)^T = 400,5(1,0993)^{T-20}$$

Máxima carga de DBO_5 (kg/ha/d) – final de plano

Temperatura média do ar nos meses mais frios do ano ($^{\circ}\text{C}$)

Fórmula adaptada para clima mais quente:

$$\lambda_{S,\max} = 20T - 60$$

As lagoas não devem ser dimensionadas para operarem próximas ao ponto limite: fator de correção de 0,67

c) Método da degradação de primeira ordem

Suposição de que devem funcionar como **reatores com carga completamente misturada**, nos quais a remoção de DBO_5 processa segunda degradação de primeira ordem.

DBO efluente (L_e):

$$L_e = \frac{L_i}{1 + k_1 T_d}$$

Área a $\frac{1}{2}$ profundidade ($A_{1/2}$):

$$A_{1/2} = \frac{Q}{Hk_{1,T}} \left(\frac{L_i}{L_e} - 1 \right)$$

Eq. De Arrhenius

$$k_{1,T} = k_{1,20} \theta^{(T-20)}$$

Sugerido:

$$k_{1,20} = 0,3 \text{ d}^{-1} \\ \text{e } \theta = 1,05$$

Tempo de detenção (T_d)

$$T_d = \frac{AH}{Q}$$

Eficiência (E):

$$E = \frac{k_i T_d}{1 + k_1 T_d}$$

L_e : DBO efluente [mg/L]

L_i : DBO afluente [mg/L]

K_1 : constante de degradação de primeira ordem da remoção da DBO [d^{-1}]

T_d : tempo de detenção [d]

A : Área a $\frac{1}{2}$ profundidade [m^2]

Q : vazão [m^3/d]

T : Temperatura [$^{\circ}C$]

$K_{1,T}$: constante de degradação de primeira ordem da remoção da DBO a temperatura T [d^{-1}]

$K_{1,20}$: constante de degradação de primeira ordem da remoção da DBO a temperatura de $20^{\circ}C$ [d^{-1}]



Esgoto conhecido →
valores em literatura

Esgoto desconhecido →
fazer ensaios

d) Método de Gloyna

Fórmula obtida de análise estatística de 200 lagoas situadas entre as latitudes 20°N e 20°S.

VOLUME NECESSÁRIO à remoção de 90% de DBO₅ afluyente, relacionada a um tempo necessário T_d a 35°C:

$$V = \frac{L_i Q}{200} t_d \theta^{(35-T)}$$

V : Volume necessário [m³]

Q : vazão afluyente [m³/s]

L_i : DBO afluyente [mg/L]

T_d : tempo de detenção necessário a 35°C [d]

T : Temperatura mínima mensal [°C]

Valores de uso prático:

T_d = 3,5 d (Hermann & Gloyna)

7,5 d (Marais)

7,0 d (Huang & Gloyna)

Θ = 1,072 (Hermann & Gloyna)

1,085 (Marais & Gloyna)

1,047 (mais usual no Brasil)

Concentração solúvel de DBO no efluente da lagoa

Na prática, nas lagoas ocorre o **fluxo disperso**, intermediário entre o regime de mistura completa e o de fluxo em pistão.

$$S_e = S_0 \frac{4 a e^{1/2d}}{[(1+a)^2 e^{a/2d}] - [(1-a)^2 e^{-a/2d}]}$$

$$a = (1 + 4 K t_d d)^{0,5} \text{ (adimensional)}$$

S_e : DBO do substrato solúvel não removido (mg/L)

S_0 : concentração da DBO afluente à lagoa (mg/L)

K : taxa específica de remoção de substrato (d^{-1})

t_d : tempo de detenção hidráulico (dias)

d : número de dispersão (adimensional)

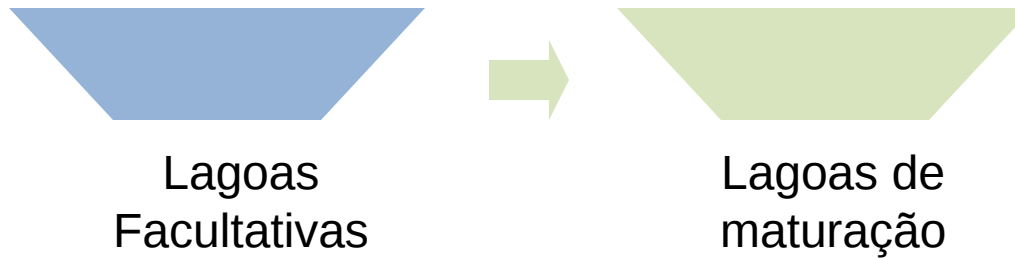
10.2.2 - Lagoas Facultativas Secundárias [Ref.1]

- Profundidade: 1,2 a 1,8m (usual: 1,5m)
- Além Sobrinho recomenda:
 - Relação comprimento/largura: 6:1 a 7:1
- Kawai et al. (1983):
 - Dados de 7 lagoas facultativas secundárias
 - Taxa de aplicação superficial: 50 a 170 kgDBO/(ha.dia)
 - $\lambda_{\text{remov}} = 0,7702 \lambda_{\text{aplic}} - 5,4188$

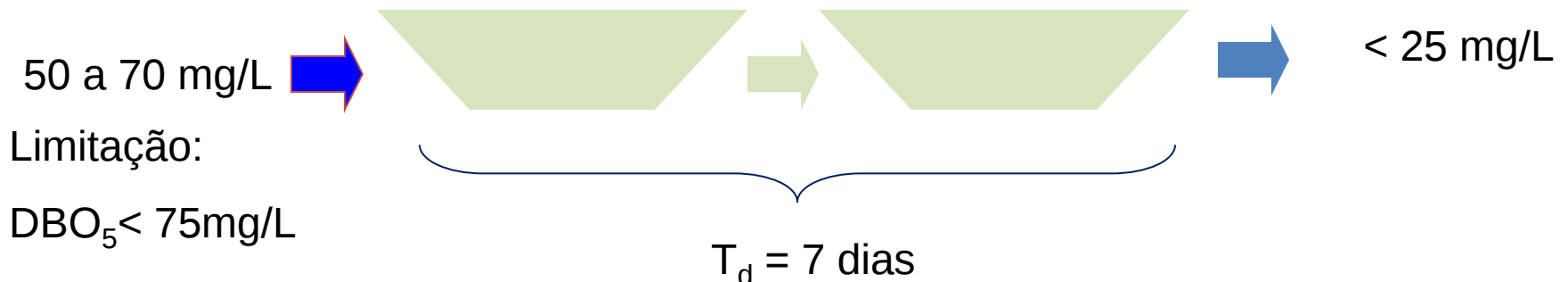
8.3 – Lagoas de maturação

Normalmente empregadas como tratamento terciário.

Podem ser utilizadas:



Remoção de DBO_5 é pequena:



- Profundidade

- 0,8 a 1,2m (crescimento de vegetação → placas de concreto no talude) → Ref.1: Nuvolari
- Mesma da lagoa facultativa com a qual estiver associada (1 a 1,5m) → Silva & Mara

- Eficiência esperada

- Expressa em termos de remoção de coliformes fecais: 90 a 99,99%

Redução de bactérias

Em lagoas de estabilização (facultativa ou de maturação) é determinada como obedecendo uma degradação de 1ª ordem.

N_e – Número de CF/100 mL no efluente:

$$N_e = \frac{N_i}{1 + k_b T_d}$$

N_i – Número de CF/100 mL no afluente

k_b – Cte de degradação de 1ª ordem para remoção de CF (dia^{-1})

T_d – tempo de detenção → mínimo: 3 dias

Para n lagoas em série:

$$N_e = \frac{N_i}{(1 + k_b T_{d,1})(1 + k_b T_{d,2}) \dots (1 + k_b T_{d,n})}$$

Correção da taxa para a temperatura:

$$k_{b,T} = 2,6(1,19)^{T-20}$$

Von Sperling: $k_{b,20} = 0,3$ a $0,8 \text{ d}^{-1}$

$T_{d,n}$: Tempo de detenção na n-ésima lagoa

$N_i = 4,0 \times 10^7$ CF/100mL (valor normalmente adotado)

Bibliografia

- [Ref.1] Nuvolari. Esgoto Sanitário
- [Ref.2] Campos, J.R. (Coord). 1999. Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbico e disposição controlada no solo. Rio de Janeiro: ABES. Projeto PROSAB.