



Ministerio de Vivienda  
Ordenamiento Territorial  
y Medio Ambiente.

**MVOTMA**

# **Guía: “Herramientas de diseño de sistemas de tratamiento de efluentes para remoción de nutrientes”**

Dipl. – Ing. Álvaro Carozzi

**DINAMA**

**Junio 2016**

# INTRODUCCIÓN

---

1. “Programa de Fortalecimiento de la Dirección Nacional de Medio Ambiente y de la capacidad de gestión ambiental del país” (URL 1083), Proyecto PNUD Uruguay/14/01,
2. *Plan de Acción para la protección de la calidad y la disponibilidad de las fuentes de agua potable, de la Cuenca del Río Santa Lucía*,”
3. Presentar la guía, y recibir aportes y sugerencias previo a su publicación impresa

# OBJETIVO y ALCANCE

---

1. Herramientas para el diseño de sistemas de tratamiento de remoción de nutrientes.
2. Recopilar los conocimientos y experiencia transmitida en el proceso de consultoría
3. NO consiste en una metodología de diseño de sistemas de tratamiento

# CONTENIDOS DE LA GUÍA

---

- Cap 4. Consideraciones generales sobre el nitrógeno y el fósforo
- Cap 5. Principios básicos de los sistemas de remoción de nutrientes
- Cap 6. Criterios para el diseño de sistemas de remoción de nutrientes
- Cap 7. Aspectos constructivos a tener en cuenta
- Cap 8. Configuraciones de los sistemas de remoción de nutrientes
- Cap 9. Aspectos operativos – lodos filamentosos y espumas
- Cap 10. Configuraciones de los sistemas en función del ramo industrial

---

## **Capítulo 4:**

# **Consideraciones generales sobre el nitrógeno y el fósforo**

# NITRÓGENO

---

Especies que pueden contener los efluentes industriales brutos, y los efluentes vertidos a curso de agua:

$N_{orgánico}$

$N_{amoniacal}$ :  
( $NH_3 \leftrightarrow NH_4^+$ )

$NO_3^-$

$NO_2^-$

**Balance de masa de nitrógeno en efluente:**

$$N_{total} = N_{orgánico} + N_{inorgánico} =$$

$$N_{orgánico} + N_{amoniacal} + N_{NO_3} + N_{NO_2} =$$

$$\underbrace{N_{orgánico} + N_{amoniacal}}_{NKT} + N_{NO_3} + N_{NO_2}$$

# Estándares adicionales al Dec 253/79

---

## Vertido a curso de agua

Parámetro	Estándar
DBO <sub>5</sub> *	60 mg/L
Amoníaco*	5 mg/L en N
Nitrógeno Kjeldahl (N orgánico + N amoniacal)**	10 mg de N/L
Nitrato**	20 mg de N/L
Fósforo total*	5 mg/L en P

## Vertido a colector del alcantarillado público

Parámetro	Estándar
DBO <sub>5</sub> *	700 mg/L
Nitrógeno Kjeldahl (N orgánico + N amoniacal)**	50 mg de N/L
Fósforo total**	10 mg/L en P

Técnica para determinación de Nitratos y Nitritos, expresada como Nitratos

# FÓSFORO

---

Especies que pueden contener los efluentes industriales brutos, y los efluentes vertidos a curso de agua:

- Fósforo orgánico, enlaces P-O-P
  - Paredes de células bacterianas
  - Pesticidas organofosforados
  - Plastificantes (fosforamidas, fosfoésteres)
- Ortofosfatos:  $H_3PO_4$  ,  $H_2PO_4^-$  ,  $HPO_4^{2-}$  ,  $PO_4^{3-}$
- Polifosfatos, enlaces P-O-C – compuestos inorgánicos condensados
  - Detergentes, suavizantes



# FÓSFORO (cont)

---

## Balance de masa de fósforo en efluente:

$$P_{total} = P_{orgánico} + P_{inorgánico} =$$

$$P_{total} = P_{orgánico} + \underbrace{polifosfatos + ortofosfatos} =$$

## Algunas consideraciones

- El ortofosfato es la única forma disponible para los microorganismos
- El polifosfato se convierte fácilmente en ortofosfatos por hidrólisis ácida
- El fósforo orgánico se convierte a fosfato mediante digestión
- Determinación de P total: digestión de la muestra y todas las especies se determinan como fosfato

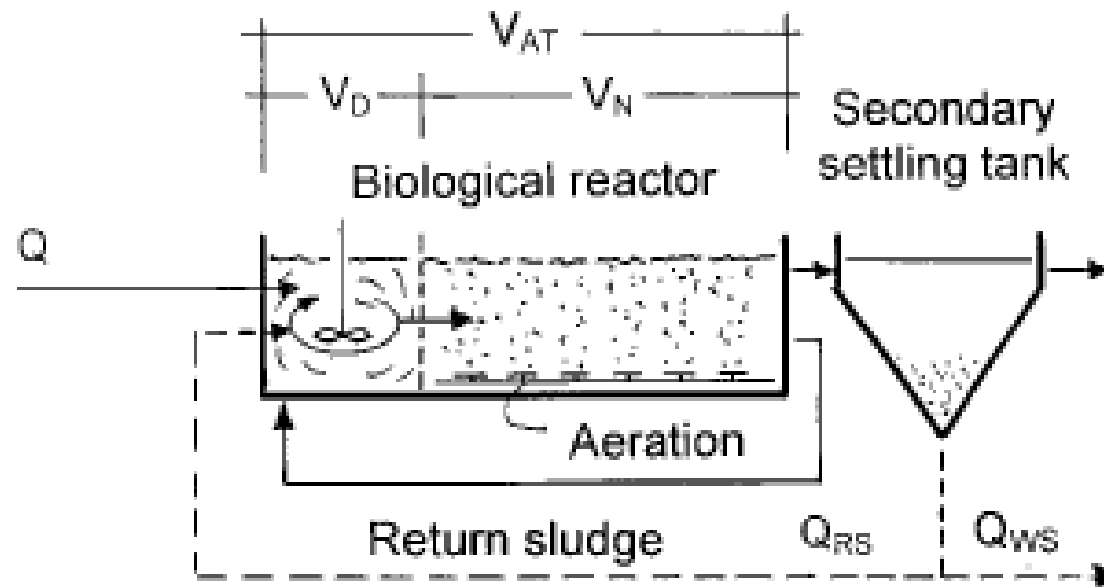
---

## **Capítulo 5:**

# **Principios generales de los sistemas de remoción de nutrientes**

# REACTOR DE LODOS ACTIVADOS

Tecnología más difundida—procesos de nitrificación/desnitrificación



*Valores a los que se puede llegar utilizando distintas configuraciones de esta tecnología:  $N_{tot}$ ,  $DBO_5$ ,  $SST$*

# REMOCIÓN DE FÓSFORO

---

## Remoción físico-química

Adición de:

- » sales trivalente Fe 3+, Al 3+ , reaccionan con fosfato
- » cal

DONDE: sedimentador primario,

RLA (ingreso lodos, vertedero salida)

sedimentador secundario

Agregado de sales: saludable y necesario para el

COMBATE DE LAS BACTERIAS FILAMENTOSAS

*Valores a los que se puede llegar con remoción físico-química*

: ***P<sub>tot</sub> < 1,0 mg/l*** asegurándose que ***SST < 10 - 15 mg/l***

# REMOCIÓN DE FÓSFORO

---

## Remoción biológica

Absorción selectiva y aumentada por masa microbiana

Contenido de fósforo en lodos de barros activados (peso seco):

- Condiciones normales: 1,5 a 2%
- Sometidos a stress ANA/ AER 3 a 4% (EPA dice 7 a 10%)

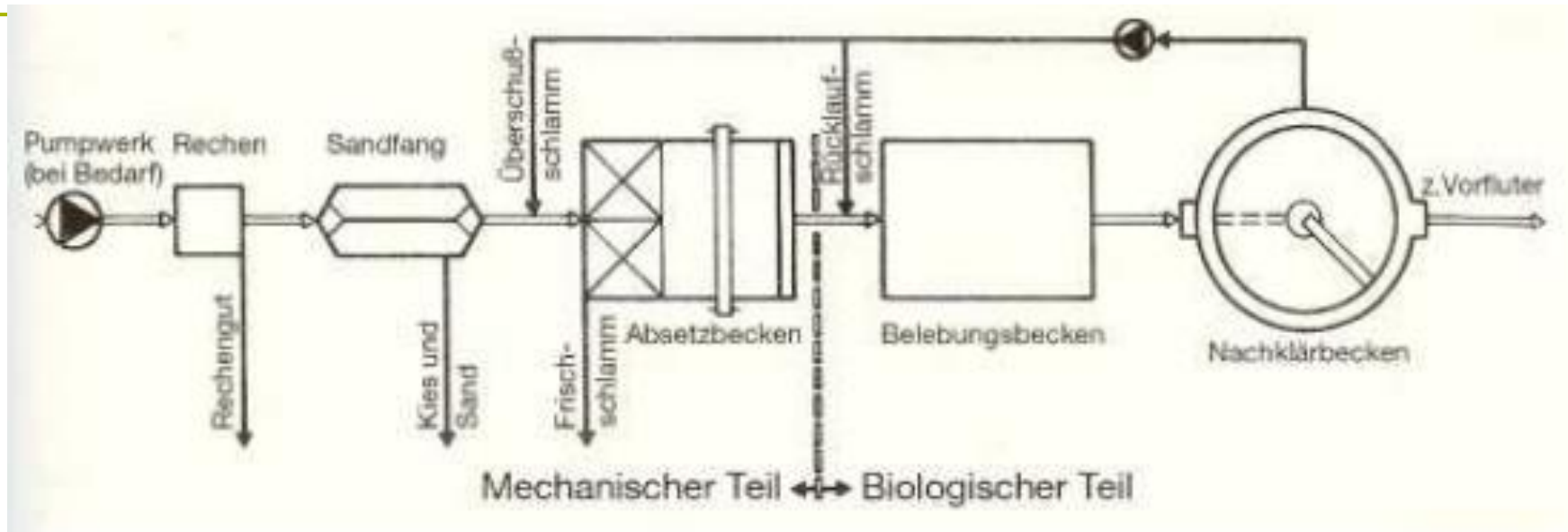
---

# **Capítulo 5:**

## **remoción de nutrientes**



# Esquema de PTE que incluye la remoción de nutrientes



## Recomendaciones:

- 1) Consumo de materia orgánica en el pre-tratamiento
- 2) Se requieren reactores, NO sirven lagunas
- 3) Recontaminación en lagunas posteriores al sistema de remoción de nutrientes
- 4) Recontaminación por lixiviados del tratamiento de lodos.

---

## **Capítulo 6:**

# **Criterios para el diseño de sistemas de remoción de nutrientes**



# Características del líquido bruto a tratar:

---

Conocer el líquido bruto:

- Temperatura del líquido, máxima y mínima
- Cargas sólidos suspendidos, Carga de carbono, Carga de nutrientes
- Carga de nitrato a desnitrificar
- Carga de fósforo a eliminar
- Definición de la carga hidráulica

# Parámetros de diseño del RLA

---

- Temperatura de diseño
- Edad de lodos
- Carga de lodos de DBO5
- Sobreproducción de lodos (kg SST/kg DBO5 o kg SST/kg DQO)
- Concentración de biomasa en el reactor – SST (gr/l)
- Volumen del reactor (\*)
- Índice de Lodos (ISL); (se describe en parámetros de diseño del sedimentador)
- Requerimientos de oxígeno
- Carga de lodos de nitrógeno

# Carga de lodos de DBO5

---

$$\text{carga de lodos} = \frac{\text{carga de DBO de entrada}}{\text{Vol reactor} \cdot \text{SST en reactor}} = \frac{\text{kg DBO/d}}{\text{m}^3 \cdot \text{gr SST/l}} = \frac{\text{kg DBO}}{\text{kg SST} \cdot \text{d}}$$

Carga de lodos típicas para efluentes para que ocurra nitrificación:

- Industriales entre 0,05 y 0,15 kg DBO/kg SST.d (máx 0,2 kg DBO/ kg SST.d)
- municipales

# Sobreproducción de lodos o Producción específica de lodos

---

$$\textit{Producción específica de lodos} = \frac{\textit{kg SST que se producen}}{\textit{kg DBO de entrada}}$$

Valores típicos de sobreproducción de lodos para efluentes:

- industriales: entre 0,4 y 0,9 kg SST/kg DBO entrada
- municipales entre 0,7 y 1,2 kg SST/ kg DBO entrada

No es lo mismo que el rendimiento  $Y$  (pero bacterias nitrificantes tienen crecimiento lento)

# Edad de Lodos – Tiempo de residencia celular

---

Bacterias nitrificantes crecen más lentamente que las heterótrofas – necesitan tiempos de residencia más largos

## Relación entre edad de lodos, carga de lodos y sobreproducción de lodos

$$\textit{Edad de lodos} = \frac{1}{\textit{carga de lodos} \times \textit{sobreproducción de lodos}}$$

Ejemplo:

$$\textit{edad de lodos} = \frac{1}{0,15 \frac{\textit{kg DBO}}{\textit{kg SST.d}} \times 0,6 \frac{\textit{kg SST}}{\textit{kg DBO}}} = 11 \textit{ días}$$

# Concentración de biomasa en el reactor

---

Se diseña en función de los SST

Fracción de biomasa , SSV – 75%

Algunos efluentes como papeleras tienen mayor proporción de inertes  
SSV = 40-60% de los SST

**Rangos típicos 3 a 5 gr/L (hasta 7,5 gr/L)**

# Volumen del reactor

---

$$\text{carga de lodos} = \frac{\text{carga de DBO de entrada}}{\text{Vol reactor} \cdot \text{SST en reactor}} = \frac{\text{kg DBO/d}}{\text{m}^3 \cdot \text{gr/l}} = \text{kg DBO}/(\text{kg SST} \cdot \text{d})$$

Profundidad: conveniente menor a 4 o 4,5 metros

<b>Para efluentes con contenido de nitrógeno</b>	<b>Relación de volúmenes (Vol reactor = Vol anóxico + Vol aireado)</b>
Alto (ej: harina de carne y hueso, frigoríficos)	Vol anóxico = Vol aireado
Medio (ej: municipal)	40% vol anóxico y 60% vol aireado
Bajo (ej: láctea)	20% Vol anóxico y 80% Vol aireado

# Sedimentador secundario

---

## OBJETIVOS



líquido clarificado a la salida



mantener concentración de biomasa adecuada en RLA

Eficiencia del sedimentador:

el escape de 10 mg/l de SST, aumenta la concentración de:

DBO5 en	3 a 10 mg/L
DQO en	8 a 14 mg/L
Ntot	0,8 a 1 mg/L
P en	0,2 a 0,4 mg/L

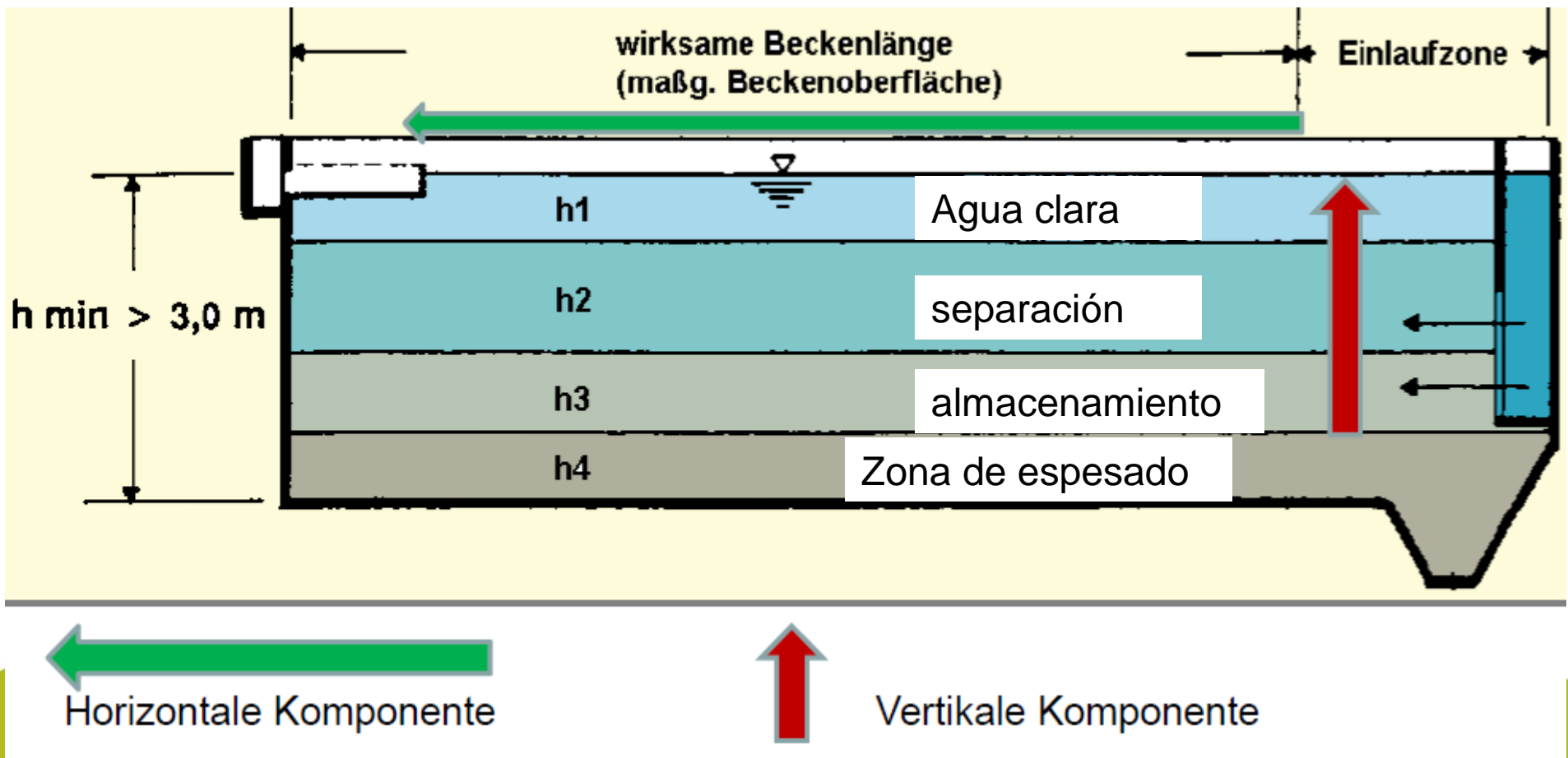
Sedimentadores de forma : circular y rectangular

Flujo horizontal y vertical (no hace referencia a forma geométrica)



# Sedimentador secundario

Norma alemana – 4 zonas



# Parámetros de diseño del sedimentador secundario

---

- Carga hidráulica ( $q_H$ )
- Índice de Lodos (ISL)
- Sólidos Suspendidos Totales en el reactor de lodos activados (SST en g/l)
- Tiempo de espesado
- Tipo de sedimentador y dimensiones

# Carga hidráulica

---

- $qH = Q_{\text{máximo horario}}(*) / \text{área superficial del sedimentador}$
- (\*) el caudal corresponde al que ingresa al RLA sin considerar la recirculación de lodos

$qH < 0,5 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{hr})$  para efluentes industriales.

más restrictivo que norma A 131 para efluentes municipales

- Dimensionado holgado, previendo 5 gr/L
- Concentración en la zona de espesado 10-12 gr/L

# Índice de Lodos (ISL)

---

Describe la capacidad de espesado del lodo –  
depende de sedimentabilidad del efluente a tratar y de la biomasa en el reactor

$$ISL = \frac{\text{Volumen de lodos}}{\text{SST en el reactor}} = \frac{\text{ml SST/l reactor}}{\text{gr/l}} = \frac{\text{ml SST}}{\text{gr}}$$

sedimentabilidad adecuada:

$$60 - 70 \text{ ml/gr} < \text{ISL} < 120 - 150 \text{ ml/gr}$$

Volumen de lodos en ensayo normalizado – tubo de 1 litro, durante una hora

# Tiempo de espesado

---

El suficiente para lograr que lodo tenga consistencia adecuada y no demasiado largo como que comiencen procesos anaerobios de desnitrificación con desprendimiento de nitrógeno en burbujas

Tiempo de espesado  $< 2$  horas  
Profundidad del sedimentador  $> 4$  metros

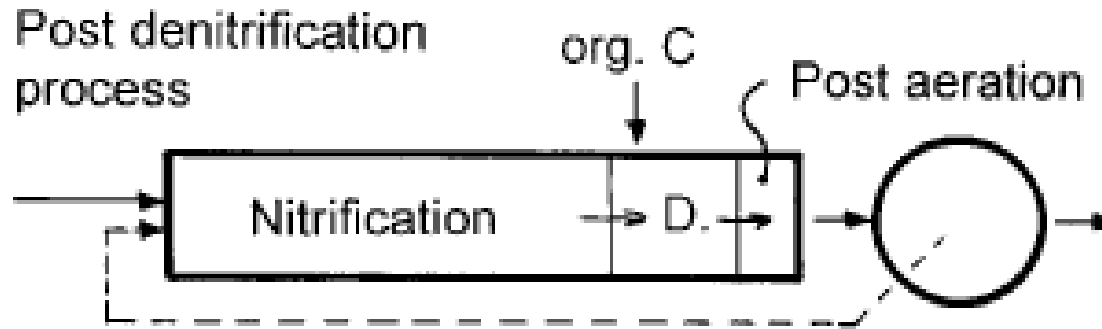
---

## **Capítulo 8:**

# **Configuraciones de los sistemas de eliminación de nutrientes**

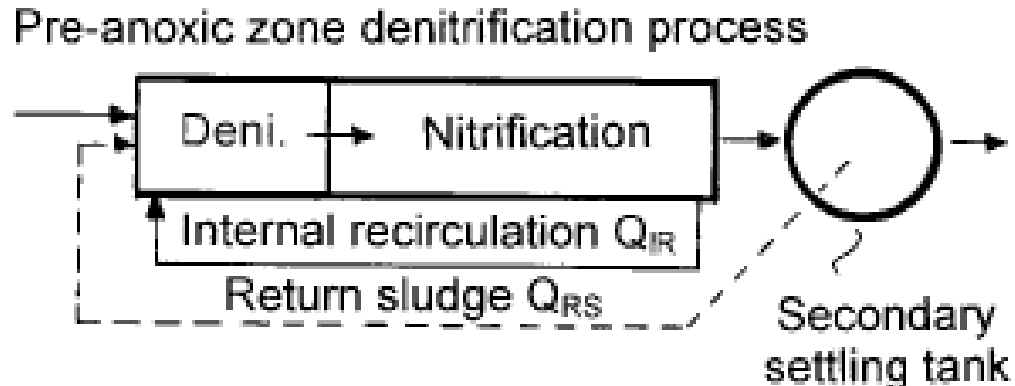
# RLA con desnitrificación posterior al nitrificador

---



- Solo si utiliza si el efluente tiene una relación C/N tan baja que hace ineludible el agregado de materia orgánica externa.
- Tanque de pos-aereación para eliminación N<sub>2</sub> (g)

# RLA con nitrificación de cabeza



- Explicación del sistema
- Ingreso: efluente, recirculación de lodos y recirculación interna en Reactor de Denitrificación
- Materia orgánica disponible para nitratos - conveniente en la cabecera
- Recirculación interna minimizada para evitar interferencias negativas de altas cargas de oxígeno disuelto en la denitrificación
- No es conveniente en efluentes con altas cargas de nitrógeno



# RLA con nitrificación de cabeza (cont)

$$R_{total} = \frac{1}{1 - E_{DN}} - 1$$

Siendo  $R_{total}$  la recirculación y  $E_{DN}$  la eficiencia de nitrógeno en %

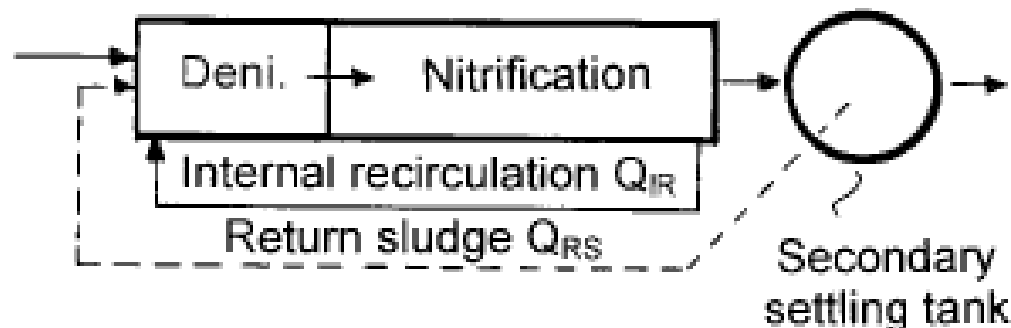
Efluente de planta de harina de carne, con alto contenido de nitrógeno, por ej 1000 mg/l; para reducir hasta un valor de nitrógeno de 10 mg/l en el efluente final se requiere una remoción de 99%

$$R_{total} = \frac{1}{1 - 0,99} - 1 = \frac{1}{0,01} - 1 = \text{recirculación de } \mathbf{99 \text{ veces}} \text{ del caudal de entrada}$$

Líquido municipal, con valores de nitrógeno a la entrada de 250 mg/l, para reducir a valores 10 mg/l en el efluente final se requiere una remoción de 75%

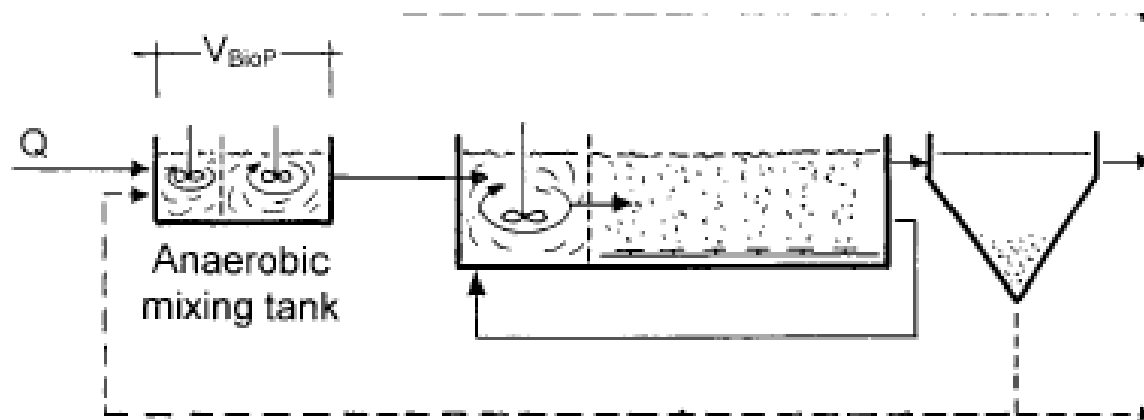
$$R_{total} = \frac{1}{1 - 0,75} - 1 = \frac{1}{0,25} - 1 = \text{recirculación de } \mathbf{3 \text{ veces}} \text{ del caudal de entrada}$$

Pre-anoxic zone denitrification process



# RLA con selector anaerobio

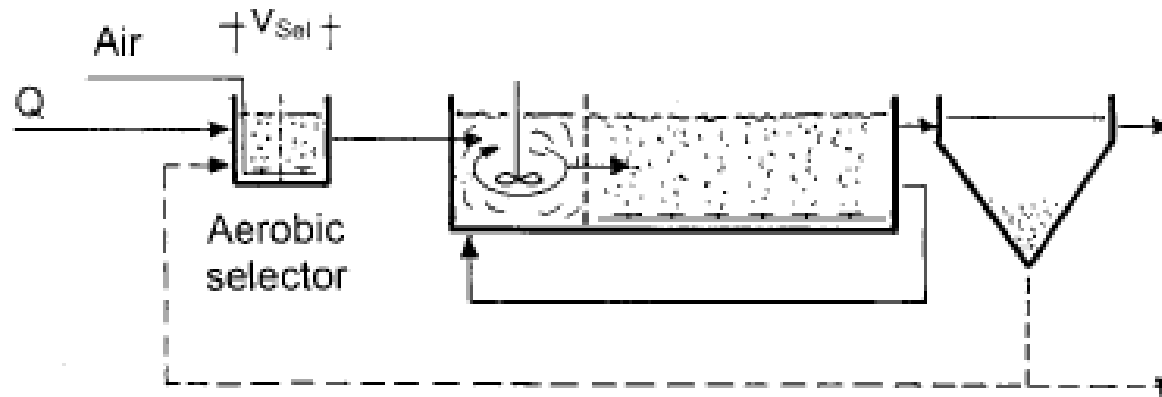
---



- Función: proveer condiciones ANA / AER alternadas para provocar stress en biomasa y tener una incorporación aumentada de fósforo
- Selector anaerobio: solo hasta la etapa de acidogénesis

# RLA con selector aerobio

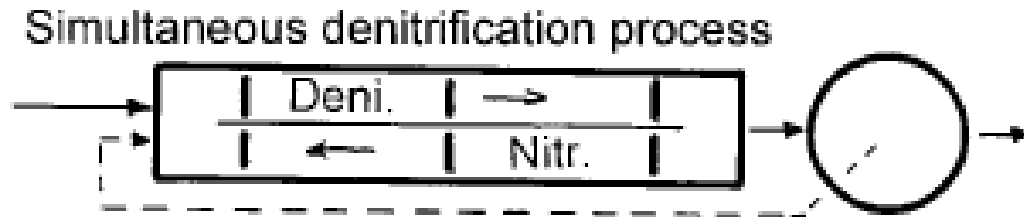
---



- Función: reducir el desarrollo de bacterias filiformes
- Mejora la sedimentabilidad de los lodos (ISL-l/mg)

# RLA simultáneo

---



- Se dan zonas anóxicas y aerobias en el mismo reactor, flujo tipo carrusel
- No requiere de recirculación interna
- Debe asegurarse que en zona anóxica no haya oxígeno disuelto
- Requiere control de OD, medidores en línea de  $\text{NO}_3$ ,  $\text{NH}_4$ , potencial redox, OD

## RLA simultáneo (cont)

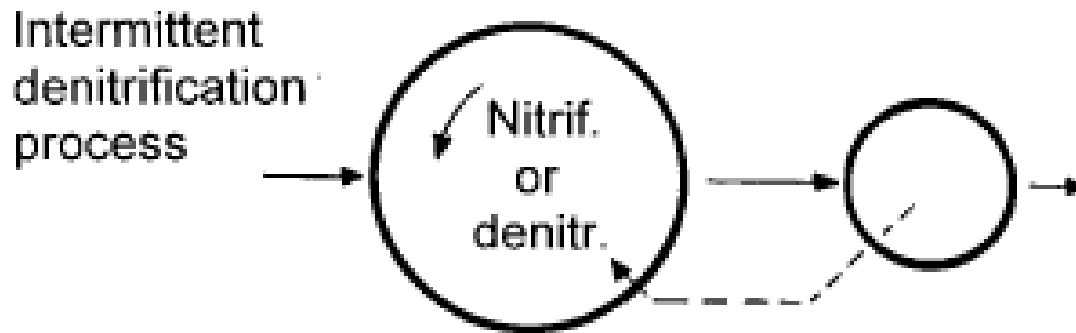


Entrada de efluente en zona anóxica, para que bacterias desnitrificantes utilicen el carbono biodegradable



# RLA intermitente

---



- La zona anóxica y aerobia se diferencian en el tiempo
- Un lapso se airea y luego se detiene aireadores, agitadores siempre prendidos
- No requiere de recirculación interna
- Debe asegurarse que en zona anóxica no haya oxígeno disuelto
- Requiere control de OD (apagado y prendido de sopladores), medidores en línea de  $\text{NO}_3$ ,  $\text{NH}_4$ , potencial redox, OD
- se asemejan a reactores de mezcla completa

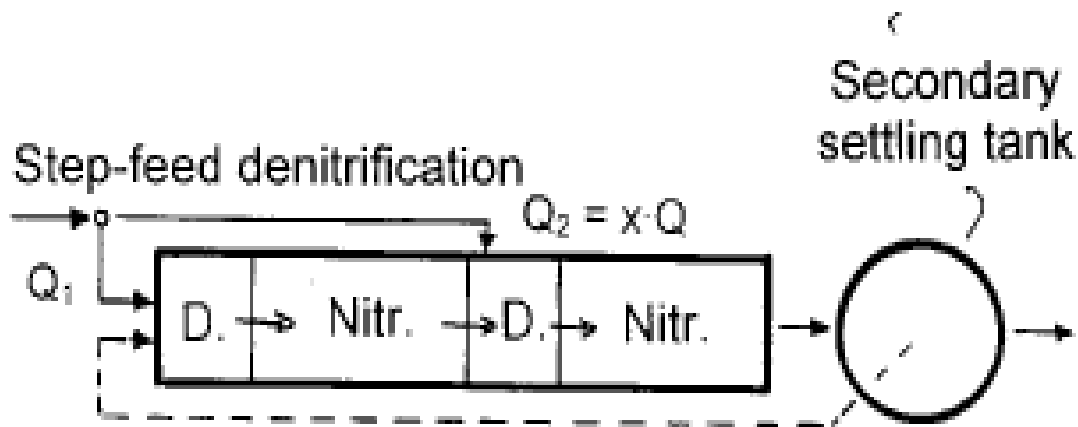
# RLA intermitente

---



Planta municipal con alto contenido de liquido industrial

# RLA en cascada



- Cada etapa con reactor de denitrif. o denitrif. Simultánea
- Entrada se reparte en proporciones
- No requiere recirculación interna (de nitratos)
- La concentración del licor de mezcla es mayor en el primer tanque. Distintas concentraciones de SST - sirve cuando el sedimentador está cargado
- Crea un gradiente de concentración – útil para minimizar desarrollo de bacterias filamentosas



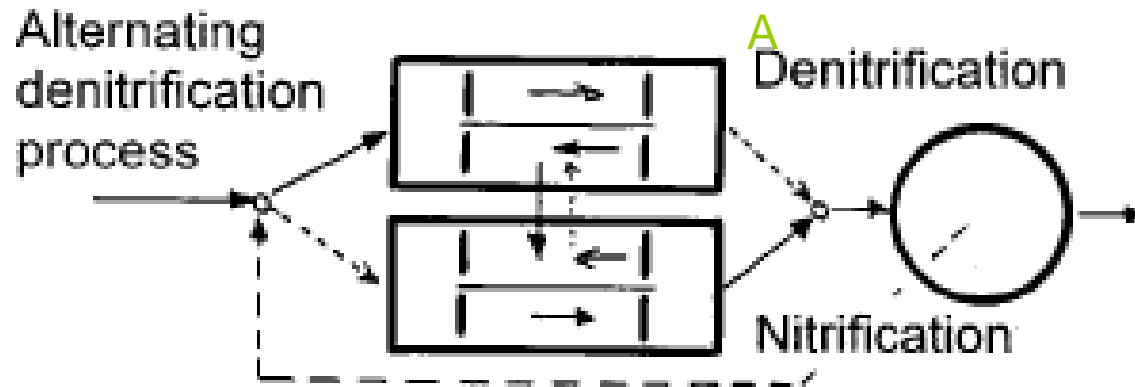
## RLA en cascada

---



# RLA alternado (Biodenitro)

---



Dos reactores aereados intermitentemente. Se airea B, se carga A y luego B uno a continuación del otro. El efluente fluye desde desde el reactor anóxico (A), cargado, al reactor aireado (B), y de ahí al sedimentador secundario.

La duración de ciclos de carga y de las fases de nitrif y denitrif están controladas por tiempo.

Como contenido alto de OD al final de fase aeróbica perjudica la desnitrif

---

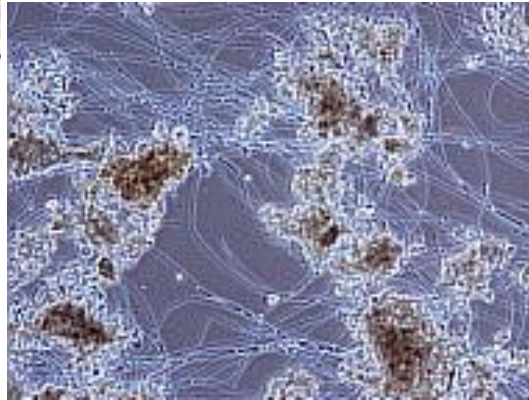
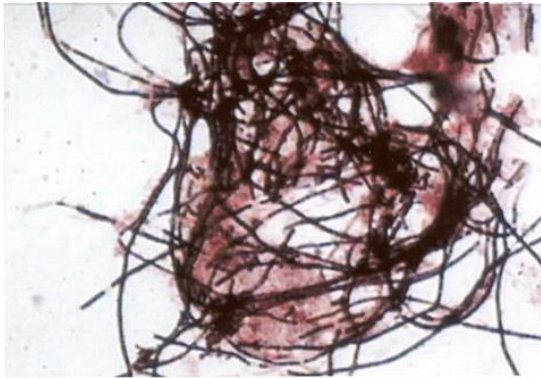
## **Capítulo 9:**

# **Problemas asociados a la operación de los sistemas de remoción de nutrientes**

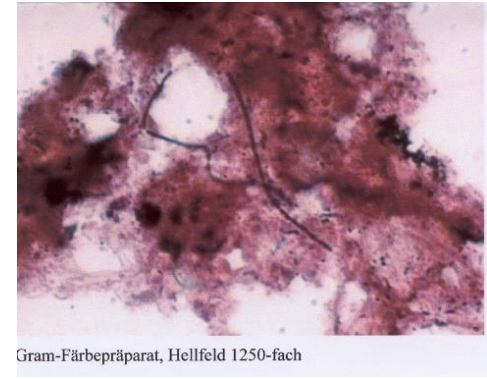
# LODOS FILAMENTOSOS Y ESPUMAS

---

Condiciones que se deben proveer para los procesos de nitrificación (carga de lodos, edad de lodso ), son las mismas que favorecen el crecimiento de las bacterias filamentosas



Lodos con filamentosas



Gram-Färbepreparat, Hellfeld 1250-fach

Lodos sin filamentosas

# Secuencial Batch Reactor (SBR)

---

## CARACTERÍSTICAS

- Todo ocurre en un solo reactor
- Necesariamente automatizado
- Las condiciones del proceso varían con el tiempo
- Sistemas de llenado y vaciado discontinuos
- El nivel del líquido del reactor es variable
- Se reduce inversión inicial y costo de operación

---

**MUCHAS GRACIAS!**

A decorative footer bar at the bottom of the slide, consisting of a light green wavy shape on the left and a solid dark green horizontal bar extending across the rest of the width.