

# Modelización de procesos de eliminación de nitrógeno en plantas depuradoras

Por Juan Carlos García Prieto  
Silvana Revollar Chavez



## 1. ¿Quiénes Somos?

El Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua (CIDTA) es un centro de la **Universidad de Salamanca** orientado al desarrollo de actividades I+D+i en el área de los **Recursos Hídricos**. Con vocación de servicio al sistema **productivo general** y mejora continua de la **competitividad**.

Es una organización basada en la experiencia de la Universidad de Salamanca que se ofrece a las **Empresas e Instituciones** para la realización de proyectos I+D+i, asistencia técnica, asesoría, servicios e impartición de cursos de formación

El CIDTA forma parte de un grupo de Acción y es socio de asociaciones como:

**EIP Water** Action Group  
Pooling resources – Innovating water

  
PLATAFORMA  
TECNOLÓGICA  
ESPAÑOLA DEL AGUA

  
aeris  
cluster de sostenibilidad ambiental

## Áreas de Interés

### Área:

**Procesos de Digestión Anaerobia de fangos de depuración y RSU**  
(Procesos de Hidrólisis Térmica, DAM, DAT, Postaireación, etc.)

### PROYECTO BIO+

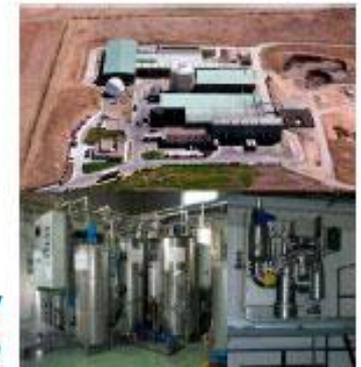
### Proyectos a desarrollar:

Pretratamientos HT en continuo, Optimización Energética, Estudios de revalorización.

Convocatorias Proyectos LIFE+, Horizonte H2O20, etc.

### Proyectos Relevantes últimos Años:

- Proyecto de asistencia técnica de ensayos para la evaluación de la eficacia y eficiencia técnica de la fracción orgánica y digestión anaerobia del hidrolizado de RSU en Planta Piloto". Proyecto BIO+ Convenio FCC - CIDTA
- "Proyecto de asistencia técnica para el control de ensayos de optimización en planta piloto de tratamiento de lodos en la EDAR de Salamanca" Convenio AQUALIA CIDTA
- "Proyecto Operación óptima de Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDARS). Entidad financiadora: DGI, Ministerio de Educación y Ciencia (Ref. DPI2009-14410-C02-01).



### Socios en proyectos:





## Áreas de Interés

### Área:

**Utilización de materiales fotocatalizadores en sistemas de tratamiento de agua de bajo coste para la descontaminación del agua**

### Proyectos a desarrollar:

Proyectos de demostración que pretenden desinfectar/detoxificar y/o reutilizar el agua tratada de salida de sistemas de depuración de bajo coste y construida/sometida a tratamientos terciarios por fotocatalísis solar.

Convocatorias Proyectos LIFE+, Horizonte H2O20, etc.

### Proyectos Relevantes últimos Años:

- Evaluación y Estudio de Reactores de fibra fotocatalítica de patente UBE Chemical Europa en la eliminación de contaminación orgánica y microbiológica.
- Reutilización y Depuración Sostenible de Aguas Residuales en Pequeños Municipios Ejemplos: Municipios de Villavieja de Yeltes y Monlevar
- Convenio Instituto Politécnica Nacional de México en la comparación de la detoxificación de aguas residuales industriales por sistemas fotocatalíticos ultravioleta y sistemas de fotocatalísis solar. 2013 - Actualidad



### Socios en proyectos:



## Requerimientos eliminación Nitrógeno

### Directiva Agua Residuales 91/271/CEE

Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo, de desarrollo del Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas («B.O.E.» 20 octubre)

Requisitos de los vertidos procedentes de instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas realizados en **zonas sensibles** cuyas aguas sean eutróficas o tengan tendencia a serlo en un futuro próximo. Según la situación local, se podrá aplicar uno o los dos parámetros. Se aplicarán el valor de concentración o el porcentaje de reducción

Parámetros	Concentración	Porcentaje mínimo de reducción	Método de medida de referencia
Fósforo total	2 mg/l P (de 10.000 a 100.000 h-e). 1 mg/l P (más de 100.000 h-e).	80	Espectrofotometría de absorción molecular.
Nitrógeno total	15 mg/l N (de 10.000 a 100.000 h-e). 10 mg/l N (más de 100.000 h-e).	70-80	Espectrofotometría de absorción molecular.



# EDAR DE SALAMANCA

## Problemas eliminación nutrientes:

- Control del caudal recirculado
- Baja Edad del Fango
- Tratamiento de lixiviados Fangos
- Baja DQO línea de agua

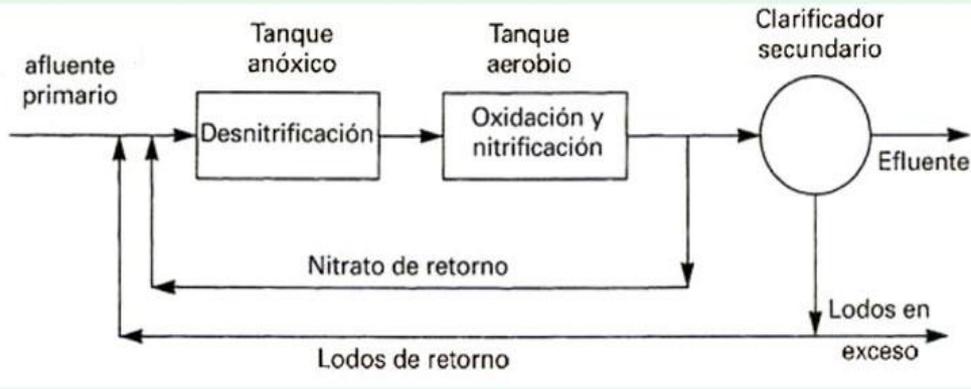


## Eliminación de nitrógeno Biológica:

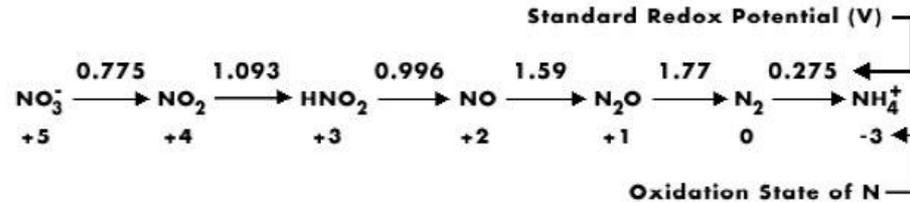
Relación DQO/N > 20 Bacterias Heterótrofas

Relación DQO/N < 5 Bacterias Autótrofas Anammox

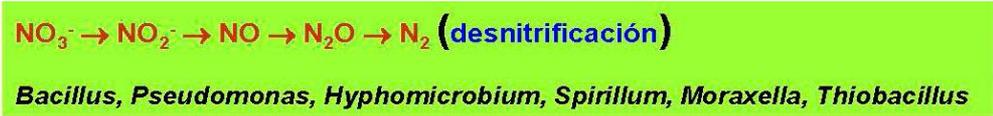
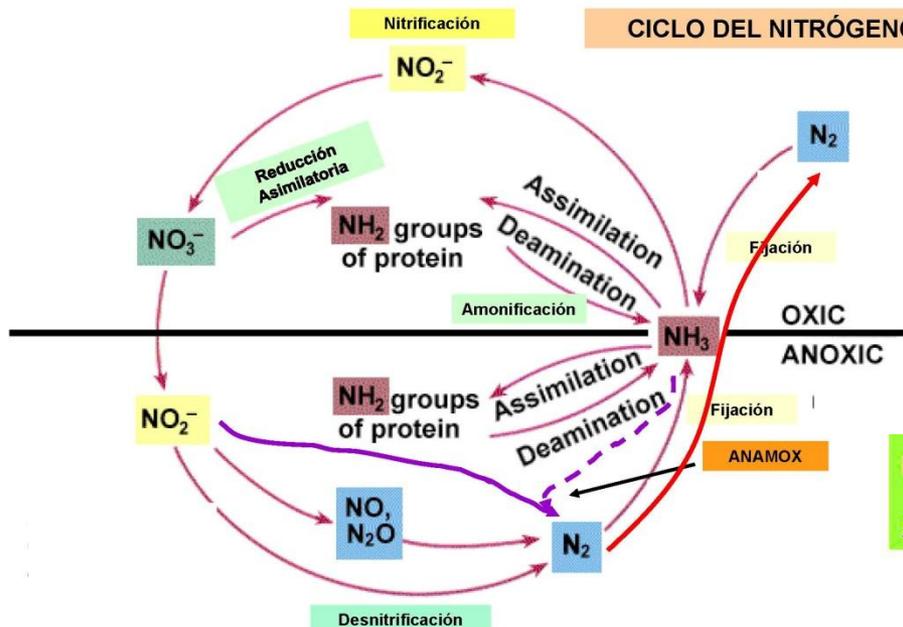
Eliminación nitrógeno procesos físicoquímicos: PAOX, stripping, intercambio iónico, membranas, etc.

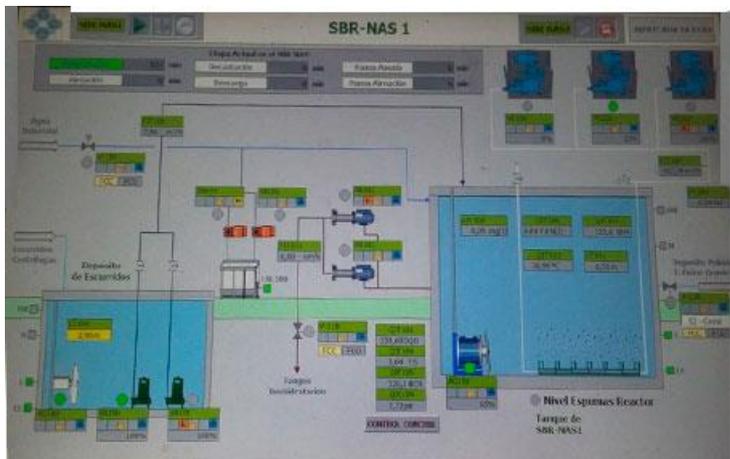


## Eliminación Biológica I



### Esquema Ludzack-Ettinger Modificado



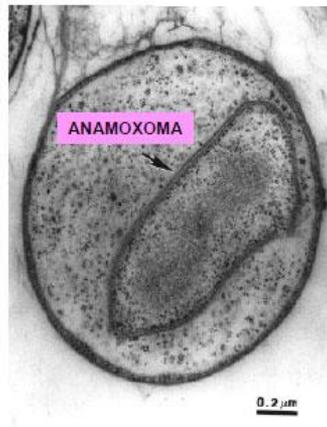
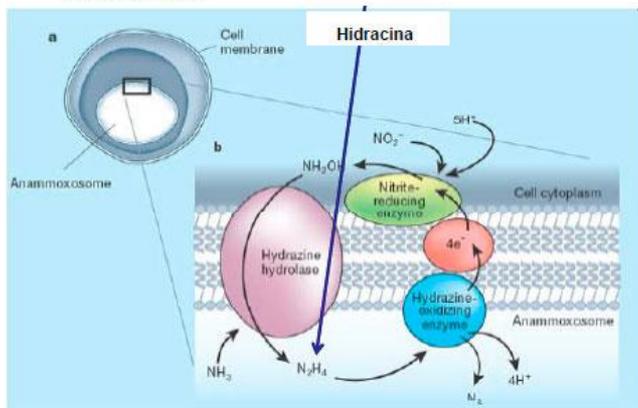


Esquema Anammox en una etapa



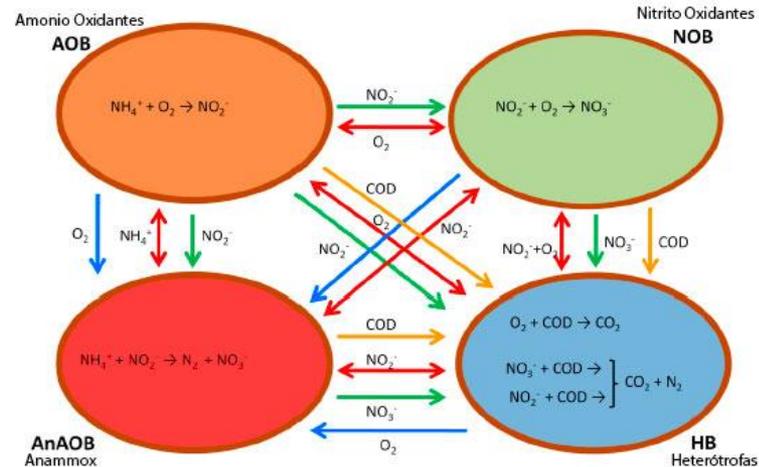
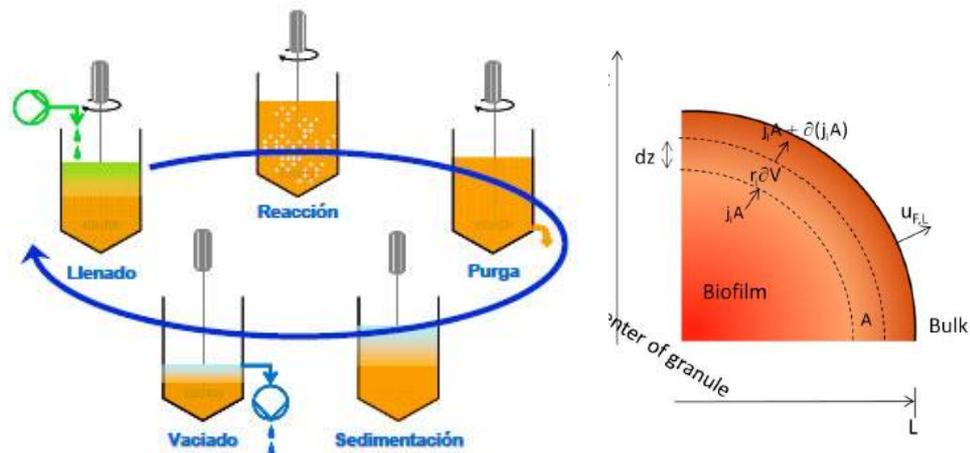
Aceptor de e<sup>-</sup>

Donador de e<sup>-</sup>



*Brocardia anamoxidans*  
(Planctomycetes)

## Eliminación Biológica II



## Modelo Considerado

**Volumen reactor:** 
$$\frac{dV}{dt} = [Q_{in} - Q_{out}]$$

**En el fluido en el reactor, para cada componente i:**

$$\frac{dM_{i,bulk}}{dt} = [Q_{in} \cdot C_{i,in} - Q_{out} \cdot C_{i,bulk} - j_{bio,i} \cdot A_{biofilm} + r_{i,bulk} \cdot V_{reactor}]$$

**En los gránulos:**

$$\frac{\partial M_i}{\partial t} = \frac{\partial (C_i \cdot V)}{\partial t} = \partial j_i \cdot A + \partial V \cdot r_i$$
$$j_{Solubles,i} = -D_{bio,i} \cdot \frac{dS_i}{dz}$$
$$j_{particulados,i} = -X_i \cdot u_F$$

**Enlaces:**

$$j_{bio\_S,i} = k_i \cdot (S_{i,bulk} - S_{i,L})$$
$$j_{bio\_X,i} = X_{i,L} \cdot u_D$$

[1] Vangsgaard, A. K., Sin, G., Gernaey, K., & Smets, B. F. (2013). Modeling, Experimentation, and Control of Autotrophic Nitrogen Removal in Granular Sludge Systems. Kgs. Lyngby: Technical University of Denmark, Department of Chemical and Biochemical Engineering.



## Modelo Considerado

Matriz Estequiométrica Coeficientes	S <sub>TAN</sub>	S <sub>O2</sub>	S <sub>TNN</sub>	S <sub>NO3</sub>	S <sub>N2</sub>	S <sub>S</sub>	X <sub>AOB</sub>	X <sub>NOB</sub>	X <sub>AnAOB</sub>	X <sub>HB</sub>	X <sub>S</sub>	X <sub>I</sub>
Compound <i>i</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Process <i>h</i>	g N m <sup>-3</sup>						g COD m <sup>-3</sup>					
1. Crecimiento Aminooxidantes							1					
2. Crecimiento Nitrificantes								1				
3. Crecimiento Anammox									1			
4. Decaimiento Aminooxidantes							-1			1-f <sub>i</sub>	f <sub>i</sub>	
5. Decaimiento Nitrificantes								-1		1-f <sub>i</sub>	f <sub>i</sub>	
6. Decaimiento Anammox									-1	1-f <sub>i</sub>	f <sub>i</sub>	
7. Crecimiento Heterótrofas 1										1		
8. Crecimiento Heterótrofas 2										1		
9. Crecimiento Heterótrofas 3										1		
10. Decaimiento Heterótrofas										-1	1-f <sub>i</sub>	f <sub>i</sub>
11. hidrolisis							1				-1	
12. Aireación	1											
N composition (g N/ g default unit)	1	0	1	1	1	0	f <sub>AOB</sub>	f <sub>NOB</sub>	f <sub>AnAOB</sub>	f <sub>HB</sub>	f <sub>S</sub>	f <sub>I</sub>
COD composition (g COD/ g default unit)	0	-1	-3.43	-4.57	-1.71	1	1	1	1	1	1	1

Expresiones Procesos Cinéticos	
1. Crecimiento Bacterias amonioxidantes	$\mu_{AnAOB} X_{AnAOB} \frac{S_{NH_3}}{K_{NH_3,AnAOB} + S_{NH_3}} \frac{S_{O_2}}{K_{O_2,AnAOB} + S_{O_2}} \frac{K_{i\_HNO_2,AnAOB}}{K_{HNO_2,AnAOB} + S_{HNO_2}}$
2. Crecimiento Bacterias Nitrificantes	$\mu_{Nitrificantes} X_{Nitrificantes} \frac{S_{NO_2}}{K_{NO_2,Nitrificantes} + S_{NO_2}} \frac{S_{O_2}}{K_{O_2,Nitrificantes} + S_{O_2}}$
3. Crecimiento Bacterias Anammox	$\mu_{Anammox} X_{Anammox} \frac{S_{NH_3}}{K_{NH_3,Anammox} + S_{NH_3}} \frac{S_{HNO_2}}{K_{HNO_2,Anammox} + S_{HNO_2}} \frac{K_{i\_O_2,Anammox}}{K_{i\_O_2,Anammox} + S_{O_2}}$
4. Decaimiento amonioxidantes	$b_{AOB} X_{AOB}$
5. Decaimiento Nitrificantes	$b_{NOB} X_{NOB}$
6. Decaimiento Anammox	$b_{AnAOB} X_{AnAOB}$
7. Crecimiento Hetrótrofas 1	$\mu_{Heterotrofas 1} X_{HB} \frac{S_{O_2}}{K_{O_2,HB} + S_{O_2}} \frac{S_S}{K_{S,HB} + S_S} \frac{S_{TAN}}{S_{TAN} + K_{TAN,HB}}$
8. Crecimiento Hetrótrofas 2	$\mu_{Heterotrofas 2} X_{HB} \lambda_{HB} \frac{S_S}{K_{S,HB} + S_S} \frac{S_{TNN}}{K_{TNN,HB} + S_{TNN}} \frac{K_{i\_O_2,HB}}{K_{i\_O_2,HB} + S_{O_2}} \frac{S_{TAN}}{S_{TAN} + K_{TAN,HB}}$
9. Crecimiento Hetrótrofas 3	$\mu_{Heterotrofas 3} X_{HB} \lambda_{HB} \frac{S_S}{K_{S,HB} + S_S} \frac{S_{NO_3}}{K_{NO_3,HB} + S_{NO_3}} \frac{K_{i\_O_2,HB}}{K_{i\_O_2,HB} + S_{O_2}} \frac{S_{TAN}}{S_{TAN} + K_{TAN,HB}}$
10. Decaimiento Heterótrofas	$b_{HB} X_{HB}$
11. Hidrolisis	$k_h \frac{X_S}{K_X}$
12. Aireación	$k_a (S_{O_2, sat} - S_{O_2, bulk})$

A modo de ejemplo se presenta el crecimiento de la biomasa Anammox:

$$\rho_{AnAOB} = \mu_{AnAOB} \cdot X_{AnAOB} \left( \frac{S_{NH_3}}{K_{NH_3\_AnAOB} + S_{NH_3}} \right) \cdot \left( \frac{S_{O_2}}{K_{I,AnAOB} + S_{O_2}} \right) \left( \frac{K_{i\_HNO_2}}{K_{HNO_2,AnAOB} + S_{HNO_2}} \right)$$

$$S_{NH_3} = \left( \frac{S_{TAN}}{1 + 10^{-pH - pK_{NH_4}}} \right)$$

$$S_{HNO_2} = \left( \frac{S_{TNN}}{1 + 10^{pH - pK_{HNO_2}}} \right)$$

$$\mu_{AnAOB} = 0.028 \cdot \exp(0.096 \cdot (293 - T))$$



## Variables de modelo

<b>Variables independientes</b>	
Espacio: $z$ (m), tiempo: $t$ (d)	
<b>Variables dependientes</b>	<b>Variable</b>
Nitrógeno amoniacal total ( $\text{NH}_4^+ + \text{NH}_3$ ) (gr $N/\text{m}^3$ )	$S_{TAN}$
Nitrógeno en forma de nitrito ( $\text{NO}_2^- + \text{HNO}_2^-$ ) (gr $N/\text{m}^3$ )	$S_{TNN}$
Nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) (gr $N/\text{m}^3$ )	$S_{NO3}$
Oxígeno ( $\text{O}_2$ ) (gr $COD/\text{m}^3$ )	$S_{O2}$
Nitrógeno gas ( $\text{N}_2$ ) (gr $N/\text{m}^3$ )	$S_{N2}$
Materia orgánica soluble biodegradable (gr $COD/\text{m}^3$ )	$S_S$
Bacterias heterótrofas (gr $COD/\text{m}^3$ )	$X_{B,H}$
Bacterias amonio-oxidantes (cond. Aeróbicas) (gr $COD/\text{m}^3$ )	$X_{AOB}$
Bacterias nitrito-oxidantes (cond. Aeróbicas) (gr $COD/\text{m}^3$ )	$X_{NOB}$
Bacterias amonio-oxidantes (cond. Anaeróbicas) (gr $COD/\text{m}^3$ )	$X_{AnAOB}$
Material inerte (gr $N/\text{m}^3$ )	$X_I$
Materia orgánica particulada (gr $COD/\text{m}^3$ )	$X_S$
Volumen de reacción ( $\text{m}^3$ )	$V$

## Estudio del fraccionamiento de la materia orgánica

### Protocolos de Calibración

BIOMATH (Vanrolleghem et al. 2003)

STOWA (Roeleveld and Van Looschecht 2002)

HSG (Langergraber et al. 2004)

WERF (Melcer et al. 2003)

...

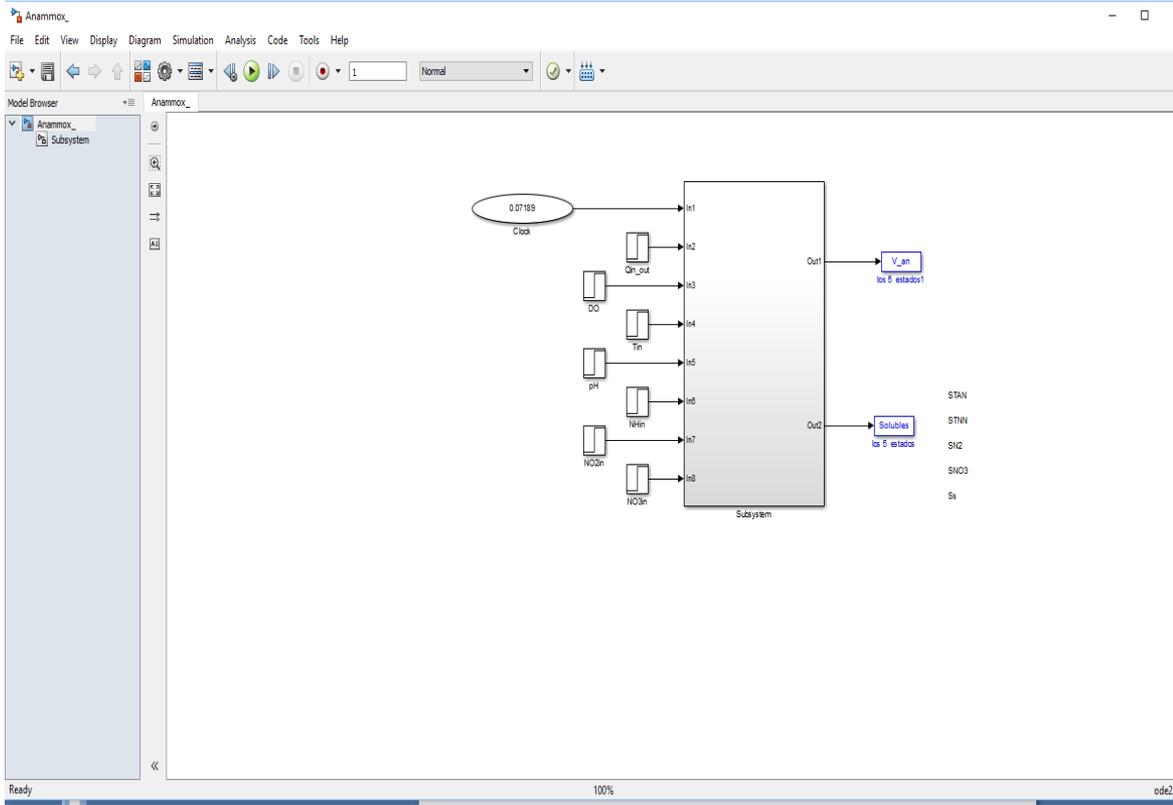
Seguimiento de de la DQO, DBO<sub>u</sub>, COT, SSV, SSF, etc.

Periodo de estudio (Enero-Junio 2017)

	SBR Entrada		SBR Salida	
	DQO Total	DQO disuelta	DQO Total	DQO disuelta
Promedio (mg/L)	450	234	293	43
CV (%)	16 %	14 %	32 %	20%
	S <sub>s</sub>	S <sub>i</sub>	X <sub>s</sub>	X <sub>i</sub>
Promedio (% DQO)	15 %	37 %	40 %	7%
Rango (%)	11 - 19	33 - 41	38 - 42	5 - 9



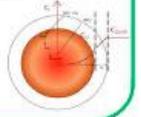
# Objetivos del Estudio



## MODELIZACIÓN

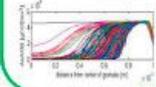
Modelos dinámicos que describen el proceso  
Operación Secuencial Discontinua  
Difusión y Biología

$$\frac{\partial S_i}{\partial t} = D_{bio,i} \frac{1}{z^2} \frac{\partial}{\partial z} \left( z^2 \frac{\partial S_i}{\partial z} \right) + r_i$$



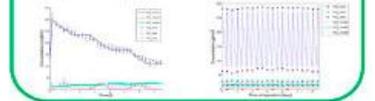
## ESTUDIO DE LAS VARIABLES

Identificación de parámetros  
Interacción Microorganismos  
Sensibilidad y variabilidad



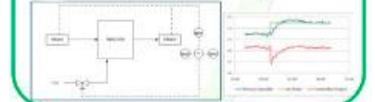
## CALIBRACIÓN DEL MODELO

Calibración en función de los datos  
Validación de los modelos



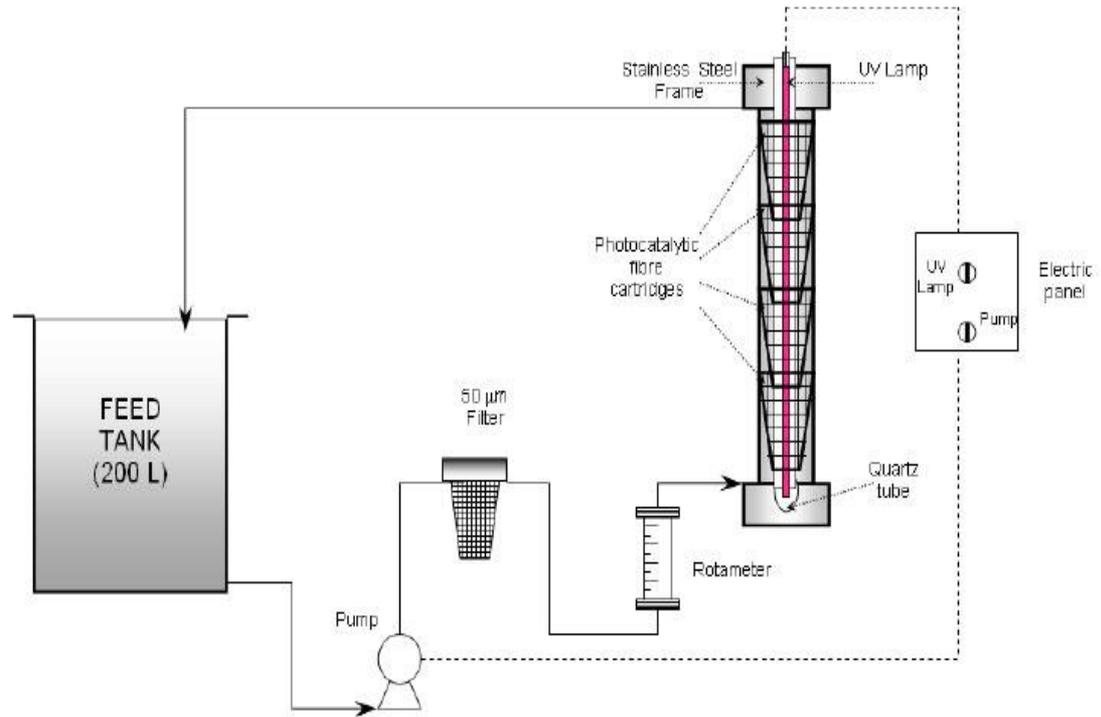
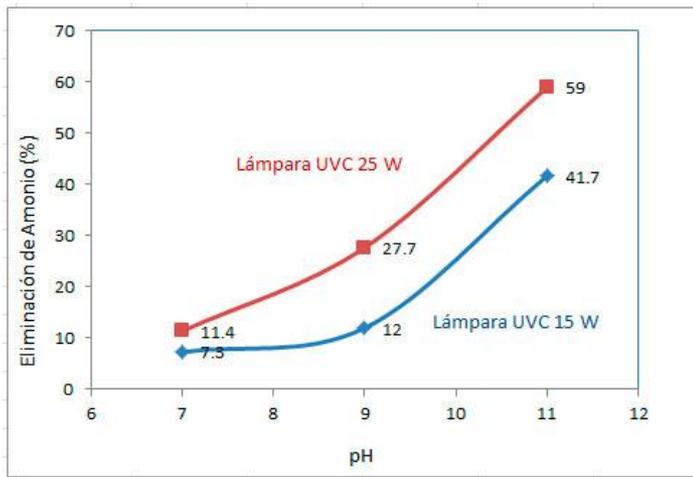
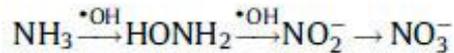
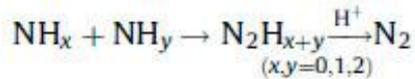
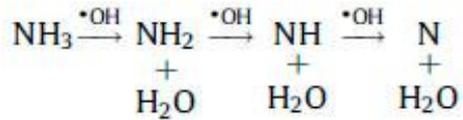
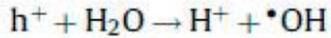
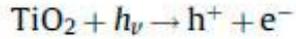
## CONTROL DEL PROCESO

Control del rendimiento del sistema  
Simulación y Evaluación del proceso





## Eliminación Nitrógeno por PAOX



Rendimiento eliminación de amonio en función de la intensidad de la lámpara y el pH ( $C_0 = 200 \text{ mg/L}$ )  $T = 20^\circ \text{C}$



## Modelización del Reactor

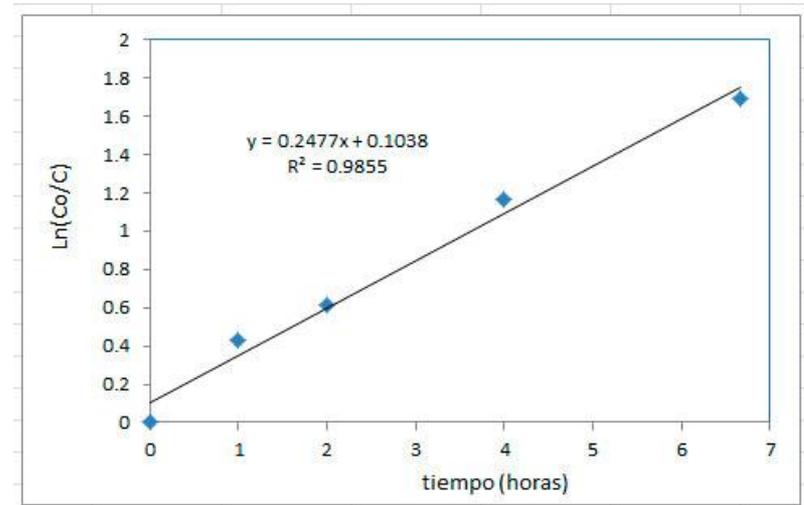
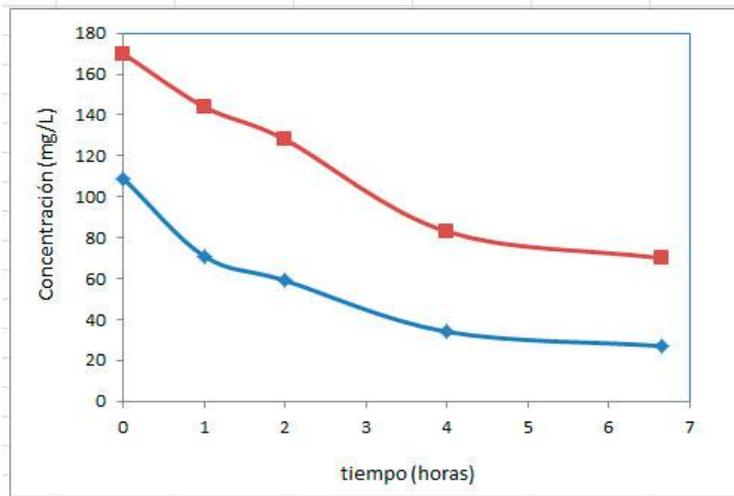
Modelo moomolecular de Langmuir- Hinshelwood:

$$r = K_{app}\theta = k \frac{KC}{1+KC} \longrightarrow \mathbf{KC \gg 1 \text{ pseudo orden cero}} \\ \mathbf{r = k}$$

$$\frac{1}{K_{app}C} = \frac{1}{kK} + \frac{C}{k}$$

$\mathbf{KC \ll 1 \text{ pseudo primer orden}}$

$$\ln \frac{C_0}{C} = k K t = K_{app}t$$



Pseudo primer orden degradación de amonio ( $C_0 = 100 \text{ mg/L}$  lámpara 25 W,  $\text{pH} = 11$ ,  $T = 25^\circ \text{C}$ )



## Contacto

**CIDTA**

**Centro de Investigación y  
Desarrollo Tecnológico del Agua  
Universidad de Salamanca**

**Campus Unamuno Facultad de  
Farmacia**

**Teléfono: +34 923294670**

**Fax: +34 923294744**

**<http://cidta.usal.es>**

**e-mail: [cidta@usal.es](mailto:cidta@usal.es)**

**37007 Salamanca**

**España**

