

## Evaluación del comportamiento de PPCP's en dos procesos: Ludzack-Ettinger y Ludzack-Ettinger modificado

>> Guillermo A. Ontiveros, Ludmila R. Alberto y Enrique A. Campanella

### RESUMEN

Los productos farmacéuticos y de higiene personal, son un grupo de compuestos químicos que comprenden fármacos, hormonas, agentes de diagnóstico y almizcles sintéticos, que se utilizan en la elaboración de productos de uso diario. Su resistencia a la biodegradación y sus propiedades de sorción, produjeron que su aparición y proporción haya aumentado en el ambiente. Las fuentes más comunes de estas sustancias son las descargas de aguas residuales, el esparcimiento de los lodos generados en las plantas depuradoras de aguas residuales y la percolación o escorrentía en los suelos utilizados para la ganadería.

En el presente trabajo, se busca analizar el comportamiento de estas sustancias a través de simulaciones.

### INTRODUCCIÓN

#### Acerca de los PPCP's

Los productos farmacéuticos y de higiene personal (en inglés, *pharmaceuticals and personal care products*, PPCP) constituyen un grupo de compuestos químicos integrado por fármacos, hormonas, agentes de diagnóstico y almizcles sintéticos, que se utilizan en la elaboración de productos de uso diario. Debido a esto último, a su resistencia a la biodegradación y a sus propiedades de sorción, han aumentado en aparición y proporción, en diferentes compartimentos ambientales. Además, algunos compuestos tienen la propiedad de permanecer activos y son perjudiciales para los organismos vivos. Las fuentes más comunes de PPCP's son las descargas de aguas residuales domésticas e industriales, el esparcimiento de lodos generados en las plantas depuradoras de aguas residuales que los tratan y la percolación o escorrentía en los suelos utilizados para la ganadería, entre otros.

### OBJETIVO

A través de la simulación con los métodos mencionados en la sección siguiente, se busca analizar el comportamiento de los PPCP's. Para esto se utilizó el simulador de procesos SuperPro Designer en su versión 7.0 (Intelligen, Inc.) a través del cual se armaron los esquemas para los procesos Ludzack-Ettinger y Ludzack-Ettinger Modificado (MLE).

### PROCESOS UTILIZADOS EN LA SIMULACIÓN

#### Ludzack-Ettinger

Es un proceso biológico de dos etapas, desnitrificación-nitrificación, con una zona anaeróbica seguida de una aeróbica. La zona anaeróbica se coloca antes que la aeróbica, lo cual permite que la zona de desnitrificación posea una fuente de materia orgánica. Esta fuente es necesaria para llevar a cabo el proceso de desnitrificación, tarea realizada por las bacterias desnitrificantes que utilizan el oxígeno contenido en el nitrato, para metabolizar la materia orgánica presente en el agua residual. En la segunda etapa se produce la reducción final de la materia orgánica, mediante un proceso de biodegradación en condiciones aerobias<sup>(6)</sup>.

#### Ludzack-Ettinger modificado (MLE)

El proceso es similar al anterior, con la adición un reciclo interno. La nitrificación ocurre en la zona aeróbica, que constituye la segunda etapa del sistema MLE. Esta es operada como una simple etapa de nitrificación. Gracias al reciclo interno, parte de la corriente nitrificada retorna a la zona anaeróbica donde, una vez consumido el oxígeno remanente, tiene lugar la desnitrificación. De esta manera, se obtienen altos niveles de desnitrificación debido a la retroalimentación del sistema<sup>(6)</sup>. El reciclo interno se opera en el rango de 1 a 4 veces el caudal de ingreso.

#### SuperPro Designer V7.0

Es un ambiente computacional que permite modelar, evaluar y optimizar procesos integrados en un amplio rango de industrias. Incluye un paquete denominado EnviroPro

#### > Palabras clave

Tratamiento de aguas residuales, productos farmacéuticos, hormonas, impactos ambientales, simulación

**Tabla 1. Clasificación de los PPCP's estudiados y sus características para la simulación**

Grupo		Compuesto	Concentración habitual en plantas de tratamiento [ug/L]	Kb (L/g.d) Degradación aeróbica	Kd (L/kg) Sorción
Fármacos	Antibióticos	Roxitromicina	0,0620	0,3	-
		Sulfametoxazol	0,342	1	-
	Analgésicos	Diclofenac	1,34	0,06	16
		Ibuprofeno	14,6	40	7
		Naproxeno	26,4	1	26,4
		Paracetamol	80,00	100	0,4
Antiepilépticos	Carbamezepina	0,968	0,008	1,2	
Hormonas	Naturales	Estrona	0,0672	400	-
	Sintéticas	Etinilestradiol	0,0042	8	349
Agentes de contraste		Iopromida	4,49	4	11
Almizcles sintéticos		Galaxolida	2,51	0,05	1807
		Tonalida	0,99	0,02	2372

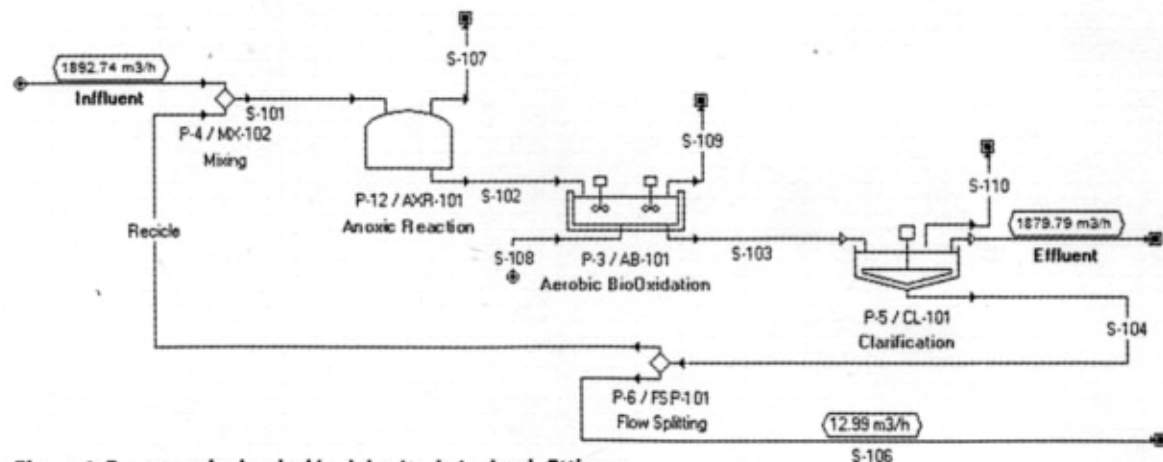
que permite trabajar con operaciones y procesos de incumbencia ambiental, como la purificación de agua, el tratamiento de aguas residuales y el control de la contaminación atmosférica<sup>[2]</sup>. La simulación se efectúa a través de etapas que incluyen: la determinación de los componentes que actuarán en el proceso, la selección de los equipos a utilizar en la simulación, la confección del esquema de tratamiento a través de la unión de los equipos por medio de corrientes y la introducción de los datos de entrada que requiera el simulador. Este último paso demanda un trabajo mayor, ya que deben proporcionarse datos de las corrientes de entrada, determinarse los parámetros de cálculo (modo diseño) o dimensiones (modo evaluación) de cada uno de los equipos y fijarse los parámetros de las reacciones relacionadas con los procesos físico-químicos y biológicos simulados. Finalmente, a través del balance de materia y energía, el simulador determina el valor de las propiedades físico-químicas y biológicas de cada una de las corrientes de salida y el volumen de los equipos, si se optó por el modo diseño.

## SIMULACIÓN Y RESULTADOS

### PPCP's en la Simulación

En la **Tabla 1** pueden apreciarse los PPCP's incluidos en la simulación, que corresponden a aquellos más estudiados debido a su carácter tóxico y/o uso muy frecuente. Dada su composición química, se adoptaron las mismas estequiometrias de reacción que involucran a la materia orgánica carbonácea y una cinética de degradación aeróbica de pseudo-primero orden, donde también interviene la concentración de biomasa<sup>[2]</sup>. También se tuvo en cuenta la sorción de los PPCP's en los lodos<sup>[2]</sup>.

Para iniciar la simulación se abordó un caso base, Planta de tratamiento municipal con remoción de nutrientes, incluido dentro del paquete del software SuperPro Designer, haciendo énfasis sólo en el tratamiento secundario. Las reacciones contempladas y adoptadas para la simulación incluyen la desnitrificación, nitrificación y degradación de la materia orgánica. Luego se construyeron los dos esquemas a utilizar en la simulación, que pueden apre-



**Figura 1. Esquema de simulación del método Ludzack-Ettinger**

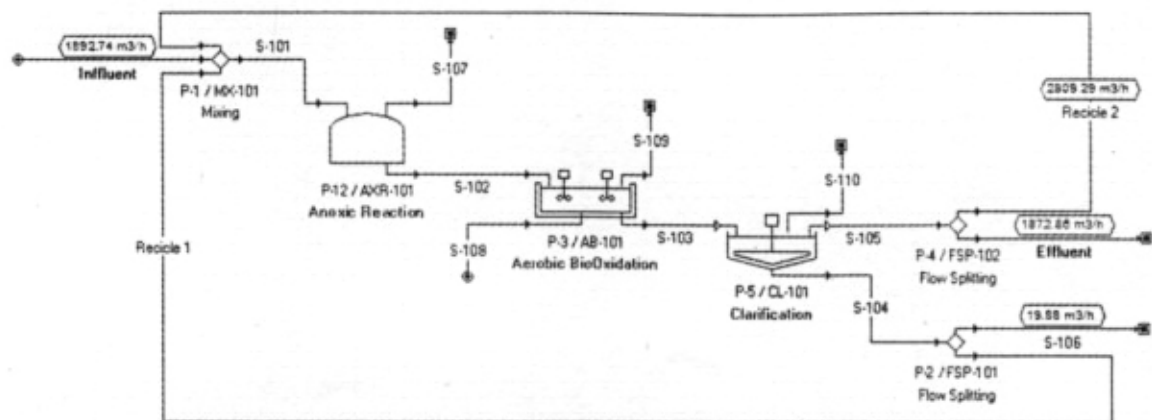


Figura 2. Esquema de simulación del método Ludzack-Ettinger modificado

ciarse en la Figura 1 (Ludzack-Ettinger) y en la Figura 2 (Ludzack-Ettinger Modificado). Para efectuar la simulación se tomaron los mismos datos de la corriente de entrada, donde  $Q=45.426 \text{ m}^3/\text{d}$ ,  $[\text{DBO}_5]=105 \text{ mg/L}$ ,  $[\text{NO}_3]=2,6 \text{ mg/L}$  y  $[\text{NH}_4^+]=21,13 \text{ mg/L}$  y se añadieron las concentraciones iniciales correspondientes a cada uno de los PPCP's estudiados<sup>[4]</sup>. Hay que destacar que se optó por el método de simulación de diseño, donde los volúmenes de los reactores no se fijaron sino que se calcularon a partir del tiempo de residencia fijado en la simulación. De acuerdo con los valores recomendados en la bibliografía, se adoptó un tiempo de residencia de 2,5 h para la etapa anaeróbica y de 8 h para la zona aeróbica<sup>[5]</sup>. Como resultado en la pri-

mera simulación, se obtuvo 1 reactor anaeróbico de  $9.349 \text{ m}^3$  (P-12, Figura 1) y 2 aeróbicos de  $14.957 \text{ m}^3$  (P-3 Figura 1) mientras que en la segunda simulación, 2 reactores anaeróbicos de  $9.809 \text{ m}^3$  (P-12, Figura 2) y 5 reactores aeróbicos de  $12.556 \text{ m}^3$  (P-3, Figura 2) con un reciclo interno del 150 % (Recicle 2 en la Figura 2).

## CONCLUSIONES

Como observación más relevante, se destaca que el segundo esquema produjo mejores resultados que el primero, en reducción de la DBO, PPCP's y en el nivel de nitrificación del efluente. Dado el incremento de los volú-

Tabla 2. Resumen de las corrientes de entrada y salida para las dos simulaciones

Simulación	Inicial	Ludzack - Ettinger				Ludzack-Ettinger modificado			
		S - 102	S - 103	Efluente	% de remoción	S - 102	S - 103	Efluente	% de remoción
Caudal [ $\text{m}^3/\text{d}$ ]	45.426	76.286	76.287	45.115	-	16.0087	16.091	44.948	-
Parámetro	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	-	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	%
$\text{DBO}_5$	105	55	0,94	0,33	99,686 %	22,82	0,21	0,219020	99,8 %
$\text{NO}_3$	2,6	0,09	30,8	30,92	Alto $\text{NO}_3$	0,15	17,02	17,53699	Media $\text{NO}_3$
$\text{NH}_4$	21,13	13	1,02	1,02	95,173 %	6,52	0	0,733963	97,33 %
PPCP's	[ug/L]	[ug/L]	[ug/L]	[ug/L]	-	[ug/L]	[ug/L]	[ug/L]	%
Carbamezepina	0,96844	0,964598	0,964585	0,96844	0 %	0,965704	0,965679	0,96844	0 %
Diclofenac	1,34061	1,311867	1,277420	1,28285	4,31 %	1,284526	1,263756	1,267661	5,44 %
Estrona	0,06724	0,040108	0,000178	0,00017	99,75 %	0,019178	0,000139	0,000140	99,79 %
Etinilestradiol	0,00420	0,002700	0,000492	0,00049	88,33 %	0,001475	0,000395	0,000397	90,55 %
Galaxolida	2,51114	2,355242	2,204644	2,25914	10,04 %	2,181472	2,063142	2,095445	16,55 %
Ibuprofeno	14,6066	8,849478	0,377351	0,37890	97,41 %	4,357238	0,297039	0,297932	97,96 %
Iopromida	4,49204	3,054224	0,943510	0,94745	78,91 %	1,828481	0,774127	0,776486	82,71 %
Naproxeno	26,4119	21,22416	13,67057	13,7277	48,02 %	16,12908	12,06892	12,10571	54,17 %
Paracetamol	80,0363	47,99662	0,839946	0,84334	98,95 %	23,18226	0,658953	0,660906	99,17 %
Roxitromicina	0,06202	0,056488	0,048624	0,04882	21,28 %	0,050475	0,045950	0,046086	25,69 %
Sulfametoxazol	0,34215	0,274966	0,177106	0,17782	48,03 %	0,208950	0,156351	0,156815	54,17 %
Tonalida	0,99045	0,938420	0,902091	0,92990	6,11 %	0,887767	0,853389	0,869953	12,17 %

menes de las etapas entre uno y otro esquema, es necesario incluir un análisis de beneficio-costo para determinar cuál es el esquema óptimo. El análisis de la degradación de PPCP's permite concluir que aquellos compuestos cuyos Kb son mayores a 1 L/kg.d, experimentan una degradación mayor al 48 %. No obstante, deberían posteriormente, considerarse y evaluarse cinéticas que incluyan un término de inhibición. La carbamezepina no experimenta degradación significativa y la virtual degradación de las fragancias (tonalida y galaxolida) se debe a su sorción, resultando un factor importante a considerar en la corriente de purga, más aún, si el tratamiento terciario es una digestión biológica.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Joss, A., Keller, A.; Alder, A.; Göbel, A.; McArdell, C.; Ternes, T.; Siegrist, H. (2004). Removal of pharmaceuticals and fragrances in biological wastewater treatment.
- [2] Project acronym Poseidon (2004). Assessment of technologies for the removal of pharmaceuticals and personal care products in sewage and drinking water facilities to improve the indirect potable water reuse. Ver <http://www.eu-poseidon.com>.
- [3] SuperPro Designer® User's Guide. Intelligen, Inc.
- [4] C. Miège; J. M. Choubert; L. Ribeiro; M. Eusebe; M. Coquery (2009). Fate of pharmaceuticals and personal care products in wastewater treatment plants. Conception of a database and first results. Environmental

Pollution 157, 1721-1726.

- [5] Leslie Grady, Jr.; Glen T. Daigger; Nancy G. Love; Carlos D.M. Filipe (2010). Biological wastewater treatment, Third Edition. Versión previa online. Taylor & Francis, Inc.
- [6] Biological nutrient removal. Technology Updates. Hatch Mott MacDonald.

## Sobre los autores:

**Enrique Ángel Campanella** es Ingeniero Químico, egresado de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Litoral (UNL) Argentina y PhD en Ingeniería Química, egresado de la Universidad de Florida, Estados Unidos. Se desempeña como docente de la Carrera de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la UNL y como investigador del CONICET en INTEC. Puede ser contactado en la dirección electrónica: <[tquique@santafe-conicet.gov.ar](mailto:tquique@santafe-conicet.gov.ar)>.

**Ontiveros Guillermo Alejandro** es Ingeniero Ambiental, egresado de la Universidad Nacional del Litoral. Es becario de CONICET y estudiante de posgrado del Doctorado en Tecnología Química de la UNL. Puede ser contactado en la dirección electrónica: <[gontiveros@intec.unl.edu.ar](mailto:gontiveros@intec.unl.edu.ar)>.

**Ludmila Alberto** es estudiante de Ingeniería Ambiental de la UNL y becaria del Programa de Becas de Iniciación en la Investigación (Cientibeca). Puede ser contactada en la dirección electrónica: <[ludmilaalberto@hotmail.com](mailto:ludmilaalberto@hotmail.com)>.

## BREVES

### CIUDAD DE BUENOS AIRES: PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL CAMBIO CLIMÁTICO

La Ciudad presentó el pasado 4 de diciembre en el Planetario, el Plan de Acción de Cambio Climático Buenos Aires 2030. El Plan fue elaborado por técnicos de la Agencia de Protección Ambiental y del Equipo Interministerial de Cambio Climático y supervisado por reconocidos especialistas en la materia.

En marzo de 2009 el Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires sancionó el Decreto 137/09, que dio el marco institucional para diseñar e implementar el **Plan de Acción en materia de Cambio Climático de la Ciudad**. El decreto creó dos espacios de trabajo y coordinación: un equipo interministerial y un consejo asesor externo, ambos presididos por la Agencia de Protección Ambiental de la Ciudad, con el objetivo final del desarrollo de políticas que permitan evaluar e implementar medidas concretas de adaptación y mitigación frente al cambio climático.

El documento presenta, en primer lugar, aspectos generales acerca del cambio climático y los efectos causados por la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) tanto a nivel global como de país y en segundo lugar, se expone la situación concreta de la Ciudad de Buenos Aires a través de los cambios ya observados en sus variables climáticas y las proyecciones futuras para las mismas. En ese contexto, se incluye la actualización del Inventario de Gases de Efecto Invernadero de la Ciudad (año 2003) que identifica el aporte a las emisiones de GEI de cada sector y permite establecer la línea de base a partir de la cual se plantean las distintas políticas a implementar.

El documento presenta, además, el escenario climático esperable para el año 2030, así como un posible escenario BAU (Busi-

ness as usual) sin la implementación de medidas de reducción de emisiones.

Se plantean, asimismo, medidas de adaptación, sobre la base de un análisis previo de vulnerabilidad y de riesgo de las diferentes áreas sensibles a los efectos del cambio climático. Por otra parte, se considera el efecto de "isla urbana de calor", así como las posibles medidas de mitigación del mismo. Este fenómeno hace referencia a que principalmente durante noches sin viento y escasa nubosidad, las ciudades son más cálidas que el medio rural que las rodea. En general, la temperatura en la ciudad se distribuye de forma tal que los valores más altos se registran en el área céntrica donde las construcciones forman un conjunto denso y compacto. El calentamiento que resulta de la isla de calor urbana es un ejemplo de cambio climático local.

Los impactos de la isla de calor urbana y del calentamiento global son a menudo muy similares. Por ejemplo, algunos sitios experimentan períodos más largos de crecimiento de plantas debido a uno o ambos fenómenos.

El trabajo también evalúa el potencial de desarrollo de proyectos enmarcados en el "Mecanismo de Desarrollo Limpio" (MDL) en el ámbito de la Ciudad de Buenos Aires.

A partir de un análisis exhaustivo de las acciones de mitigación al Cambio Climático y su respectiva evaluación en cuanto a la reducción de emisiones de GEI, la Ciudad de Buenos Aires se plantea como meta global reducir aproximadamente el 30 % de emisiones de GEI en referencia a las emisiones del año 2008. Esto significa 5.130.881 toneladas menos de CO<sub>2</sub>eq/año para el año 2030.