

# Presencia y tratamiento de compuestos disruptores endócrinos en aguas residuales de la Ciudad de México empleando un biorreactor con membranas sumergidas

## *Occurrence and Treatment of Endocrine Disrupter Chemicals in Mexico City Waste Water Semploing Submerged Membrane Bioreactor*

Estrada-Arriaga Edson Baltazar

*Subcoordinación de Tratamiento de Aguas Residuales  
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos  
Correo: edson\_estrada@tlaloc.imta.mx*

Mijaylova-Nacheva Petia

*Subcoordinación de Tratamiento de Aguas Residuales  
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos  
Correo: petiam@tlaloc.imta.mx*

Moeller-Chavez Gabriela

*Subcoordinación de Tratamiento de Aguas Residuales  
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos  
Correo: gmoeller@tlaloc.imta.mx*

Mantilla-Morales Gabriela

*Subcoordinación de Tratamiento de Aguas Residuales  
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos  
Correo: mantilla@tlaloc.imta.mx*

Ramírez-Salinas Norma

*Subcoordinación de Tratamiento de Aguas Residuales  
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos  
Correo: nramirez@tlaloc.imta.mx*

Sánchez-Zarza Manuel

*Subcoordinación de Tratamiento de Aguas Residuales  
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos  
Correo: manuells@tlaloc.imta.mx*

Información del artículo: recibido: abril de 2012, aceptado: julio de 2012

### Resumen

El objetivo de este trabajo fue detectar la presencia de tres compuestos disruptores endócrinos (estrógenos) en aguas residuales de la Ciudad de México y evaluar el desempeño de un biorreactor con membranas sumergidas (BRMS) a nivel planta piloto para remover estrógenos presentes en las aguas residuales de la zona metropolitana. Los compuestos estrona (E1), estradiol (E2) y  $17\alpha$ -etinilestradiol (EE2) fueron detectados en dos diferentes aguas residuales con concentraciones de hasta  $90 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ . El biorreactor fue operado durante 234 días. El biorreactor con membranas fue evaluado con tiempos de residencia hidráulico (TRH) de 7, 9, 10 y 12 horas. Con TRH mayores a 7 h y con un tiempo de retención celular (TRC) de 60 d, se obtuvieron remociones de E1, E2 y EE2 superiores a 96% con concentraciones en el efluente del reactor por debajo de  $1 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ . Se detectó la presencia de los estrógenos sobre el lodo activado con concentraciones de hasta  $70 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ . El ensuciamiento de las membranas fue menor con un TRH de 12 horas.

### Descriptoros:

- biorreactor con membranas sumergidas
- disruptores endócrinos
- estrógenos
- colmatación

### Abstract

The aim of this work was to detect the presence of three endocrine disruptor compounds (estrogens) in Mexico City's wastewater and to evaluate the performance of submerged membrane bioreactor (SMBR) pilot plant to remove estrogens present in the wastewater of the metropolitan area. Estrone (E1), estradiol (E2) and 17 $\alpha$ -ethinylestradiol (EE2) concentrations ranged up to 90 ng.L<sup>-1</sup> were detected in two Mexico City wastewaters. The bioreactor was operated for 234 days. The membrane bioreactor was evaluated at hydraulic residence time (HRT) of 7, 9.10 and 12 hours. At HRT higher than 7 hours and at solid retention time (SRT) of 60 days, the estrogen removals were higher than 96%. At these conditions, the estrogen concentrations in the reactor effluent were lower than 1 ng.L<sup>-1</sup>. Accumulated concentrations of estrogens were observed in the activated sludge (up to 70 ng.g<sup>-1</sup>). Membrane fouling was lower at HRT of 12 hours.

#### Keywords:

- submerged membrane bioreactor
- endocrine disruptor compounds
- estrogens
- fouling

### Introducción

Si bien es cierto que ya se han comenzado a tratar las aguas residuales municipales para su reúso, una nueva problemática surgió en años recientes en torno a su tratamiento y reúso y está relacionada con la presencia de compuestos disruptores endócrinos (CDE), farmacéuticos y productos para el cuidado personal. Ha sido bien documentado que algunos de estos compuestos causan serios problemas en los organismos vivos a niveles de ng.L<sup>-1</sup> y otros, además generan resistencia en poblaciones microbianas.

El término compuesto disruptor-endócrino define un conjunto diverso y heterogéneo de compuestos químicos capaces de alterar el equilibrio hormonal (USEPA, 1997b). En otras palabras, los CDE son compuestos que interfieren con el funcionamiento normal de los procesos hormonales del sistema endócrino.

Los principales CDE que generan un mayor efecto disruptivo sobre los seres vivos y los cuales se encuentran en las aguas residuales no tratadas y tratadas en concentraciones entre 1 y 400 ng.L<sup>-1</sup> son los estrógenos como la estrona (E1), 17 $\beta$ -estradiol (E2), estriol (E3) y 17 $\alpha$ -etinilestradiol (EE2) (Jürgens *et al.*, 2002). Aunque el E3 puede ser detectado en altas concentraciones en los efluentes de las plantas de tratamiento, es un disruptor-endócrino que genera una menor actividad estrogénica en los seres vivos comparados con el E1, E2 y EE2. El alto potencial estrogénico del E1, E2 y EE2 se cree que está relacionado con una alta acumulación en el plasma sanguíneo (Stumpf *et al.*, 1996; Larsson *et al.*, 1999). Los efectos nocivos de los estrógenos en varias especies de peces ya fueron estudiados (Sumpter y Jobling, 1995; Brown *et al.*, 2001; Bachmann *et al.*, 2002). Conforme al reporte emitido por la Comunidad Europea en el 2007 (Commission of the European Communities, 1999), se enlistan 553 compuestos como posibles candidatos de

generar disrupción endocrina en los seres vivos, los cuales están presentes en las aguas residuales municipales. Dentro de esta lista, 21 compuestos pueden generar un potencial estrogénico mayor, en los cuales se encuentran los estrógenos E1, E2 y EE2.

La causa principal de la presencia de estos microcontaminantes en los sistemas acuáticos son las descargas de las aguas residuales municipales, siendo la fuente principal de liberación de estos compuestos las excreciones humanas (heces fecales y orina) y el vertido incontrolado de medicamentos caducos. Los CDE se descargan en el ambiente sin recibir algún tratamiento y recientemente se ha estimado un aumento de éstos debido a la sobrepoblación de las áreas urbanas (Johnson *et al.*, 2000; Körne *et al.*, 2000; Katori *et al.*, 2002).

Estas descargas llegan al sistema de alcantarillado y de ahí a las plantas de tratamiento de aguas residuales en donde son removidos y/o biodegradados parcialmente, quedando concentraciones traza en sus efluentes, contaminando así las aguas superficiales y suelos. La feminización de organismos machos ha sido observada en ríos y lagos en los cuales se vierten los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales (Miles *et al.*, 1999; Masunaga *et al.*, 2000)

El objetivo de los sistemas de tratamiento de aguas residuales es remover materia orgánica fácilmente biodegradable, nitrógeno y fósforo, sin embargo, algunas investigaciones han descubierto que los CDE también pueden ser removidos en los sistemas de tratamiento de aguas residuales. Entre los sistemas de tratamiento de aguas residuales, el proceso de lodos activados es el más aplicado en todo el mundo en comparación con otros procesos físicos, fisicoquímicos y/o procesos biológicos no convencionales. Los estudios sobre la remoción de estrógenos en el proceso de lodos activados han mostrado que los estrógenos son biodegradados y/o adsorbidos en el lodo (Andersen *et al.*, 2003; Svenson *et*

*al.*, 2003; Braga *et al.*, 2005). En un proceso convencional de lodos activados se obtiene una biodegradación de estrógenos naturales y sintéticos entre 10 y 90%, mientras que el resto es removido por la adsorción de los compuestos en el lodo (90-10%) (Sedlak *et al.*, 2000; Schäfer y Waite, 2002). Aunque algunos procesos convencionales y no convencionales, tanto biológicos como fisicoquímicos obtienen remociones significativas de CDE, sus efluentes todavía presentan concentraciones relativamente altas.

Las bajas remociones de estos compuestos en las plantas de tratamiento se deben a que son recalcitrantes. Además de que las plantas de tratamiento actualmente instaladas no están diseñadas para la remoción de CDE, puesto que sólo están diseñadas para la remoción de materia orgánica y nutrientes. Una propuesta para mitigar esta problemática es la aplicación de nuevas tecnologías para el tratamiento del agua residual, para esto, son necesarios los procesos de tratamiento no convencionales que permitan obtener altas remociones de estos compuestos, un efluente con alta calidad de agua tratada y un área reducida. La tecnología de biorreactores con membranas (BRM) ofrece estas características.

En México se tienen pocos reportes sobre la presencia de CDE en las aguas residuales municipales y en los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales. Es de suma importancia investigar su presencia en diferentes matrices ambientales, cuya actividad de población e industrial sea alta. Por lo tanto, en México existe la necesidad de implementar nuevas tecnologías

de tratamiento de aguas residuales municipales e industriales para poder enfrentar nuevos retos como la presencia de CDE (especialmente estrógenos naturales y sintéticos) en las aguas residuales. El objetivo de esta investigación fue detectar concentraciones de tres compuestos disruptores endócrinos en aguas residuales de la Ciudad de México y la aplicación de la tecnología de biorreactores con membranas para su remoción.

## Material y métodos

### Esquema experimental

Se utilizó un biorreactor con membranas sumergidas (BRMS) a nivel planta piloto de 178 L (General Electric) para remover CDE en aguas residuales reales (figura 1). El sistema de tratamiento cuenta un panel de control del proceso con su respectivo temporizador para controlar los tiempos de succión/retrolavado, soplador, vacuómetro, bomba de succión/retrolavado. La microbomba tiene la capacidad de realizar la succión y el retrolavado. El módulo de membranas utilizado fue una unidad de fibra hueca de ultrafiltración (ZeeWeed10) de material polimérico PVDF (polifluoruro de vinilideno) el cual tiene un tamaño de poro de  $0.04 \mu\text{m}$  con un área superficial de  $0.93 \text{ m}^2$ .

Antes del arranque y operación del BRM piloto se determinaron las condiciones críticas y subcríticas de las membranas siguiendo el procedimiento descrito por Defrance y Jaffrin (1999). La concentración de la biomasa para la determinación de las condiciones críticas y



Figura 1. Biorreactor con membranas sumergidas a nivel planta piloto

subcríticas fue de  $7,260 \text{ mg SSV.L}^{-1}$ . Para obtener los valores de flujo crítico y subcrítico, el flujo a través de las membranas se incrementó de 10 hasta  $80 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  con intervalos de  $6-10 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  cada 30 min. La condición para la limpieza física de las membranas mediante la estrategia de succión/retrolavado fue fijada de acuerdo con las especificaciones del fabricante (20 min filtrado/20 s retrolavado). La limpieza química se realizó sumergiendo las membranas en un baño de  $200 \text{ mg NaClO.L}^{-1}$  y con ácido clorhídrico a pH de 2. La duración de cada baño fue 5 horas.

Una vez establecidas las condiciones subcríticas, el BRMS fue operado con tiempos de residencia hidráulicos (TRH) de 7, 9, 10 y 12 horas.

### Inóculo y agua residual

El BRM fue inoculado con licor mezclado proveniente de un proceso de lodos activados con modalidad de aeración extendida que trata aguas residuales municipales.

El agua residual que se utilizó para la alimentación del biorreactor fue de la zona metropolitana de la Ciudad de México en dos puntos de muestreo: Emisor Central y Gran Canal del Desagüe. Se seleccionó esta zona porque ahí se descarga gran parte de las aguas residuales generadas en la Ciudad de México (figura 2). Pri-

mero se seleccionó el punto de muestreo del Emisor Central (salida), de donde se tomaron aproximadamente  $10 \text{ m}^3$  de agua residual cada 20 días. El reactor fue alimentado con esta agua durante 109 días (julio-noviembre de 2008). Entre los meses de noviembre 2008 y febrero 2009, el reactor fue alimentado con agua residual proveniente del Gran Canal. La caracterización fisicoquímica del agua residual y la detección de los estrógenos se realizó en muestras simples (por triplicado).

### Métodos analíticos

Los CDE fueron determinados en el agua residual y en la biomasa del biorreactor siguiendo el procedimiento descrito por Estrada y Mijaylova (2011). Se utilizó un cromatógrafo de gases Varian CP-3800 acoplado a un espectrómetro de masas-masas Varian Saturn 2200. La columna utilizada fue de sílice fundida Varian VF-5MS ( $30 \text{ m} \times 0.25 \text{ mm} \times 0.25 \mu\text{m}$ ). Las muestras de agua residual se almacenaron en frascos de vidrio de ámbar de 1 L, las cuales fueron acondicionadas con metanol (2% v/v) a pH de 3 con ácido sulfúrico (98%). La muestra de lodo se secó a  $120^\circ\text{C}$  durante 24 horas. Las muestras de agua y lodo se almacenaron a  $4^\circ\text{C}$ . Posteriormente, las muestras se transportaron al laboratorio para su análisis al siguiente día.



Figura 2. Localización de puntos de muestreo del agua residual

## Discusión y análisis de resultados

### Muestreo y caracterización del agua residual municipal

En el agua residual del Emisor Central, los compuestos E1 y E2 fueron detectados con concentraciones entre 14 y 54  $\text{ng.L}^{-1}$  y entre 12 y 27  $\text{ng.L}^{-1}$ , respectivamente. El EE2 fue detectado con concentraciones menores a 8  $\text{ng.L}^{-1}$  y por debajo del límite de detección. En el agua residual del Gran Canal el E1, E2 y EE2 se encontraron con concentraciones entre 4 y 93  $\text{ng.L}^{-1}$ . Se puede notar que las concentraciones de los estrógenos en el agua residual del Gran Canal fueron más altas que las determinadas en el Emisor Central (figura 3).

Las concentraciones de los estrógenos encontradas en las aguas residuales de la Ciudad de México están dentro del rango reportado para otros países e incluso México (Ternes *et al.*, 1999a; Andersen *et al.*, 2003; Joss *et al.*, 2004; Clara *et al.*, 2005; Chia *et al.*, 2007; Gibson *et al.*, 2007; Hashimoto *et al.*, 2007; Hu *et al.*, 2007). Las variaciones de las concentraciones de los estrógenos entre uno y otros países pueden radicar en muchos factores tales como el tipo de muestreo realizado (muestra simple o compuesta), factor de dilución, densidad de población, método analítico, por mencionar otros.

Se detectó que las concentraciones de los compuestos en el influente al reactor no fueron iguales a las concentraciones detectadas en los muestreos realizados en los puntos de muestreos del emisor Central y Gran Canal (tabla 1). Las concentraciones de E2 determinadas

en el influente del reactor en toda la fase experimental fueron menores a las concentraciones detectadas en los muestreos de las aguas residuales, obteniéndose remociones de este compuesto entre 11 y 24%. Sin embargo, para el E1 y EE2 no se observó este mismo efecto, ya que las concentraciones determinadas en el influente del reactor fueron mayores a las cuantificadas en los muestreos. Esta variación puede ser debida a la desconjugación de los compuestos E1 y EE2 en su forma inactiva, la cual posiblemente se llevó a cabo en el tanque de almacenamiento del agua residual (tanque de alimentación). Los estrógenos son liberados principalmente al ambiente en una forma biológica inactiva como conjugaciones de sulfatos y glucurónidos (Panter *et al.*, 1999). Una cantidad de estas conjugaciones son biotransformadas o desconjugadas a su forma activa mediante la acción de microorganismos que se encuentran de manera natural en el agua residual durante su transporte en el sistema de alcantarillado, sin embargo, ciertas cantidades de estos compuestos en sus formas inactivas quedan latentes para su posterior biodegradación. Joss *et al.* (2004) reportaron que el E2 puede ser removido en condiciones anaerobias y el E1 y EE2 resultan ser recalcitrantes bajo estas condiciones. De acuerdo con esto, la disminución del E2 pudo deberse a una biodegradación, y el aumento del E1 y EE2 pudo estar relacionado a la biotransformación de sus formas conjugadas.

Las concentraciones de E1 en el influente del reactor en toda la fase experimental variaron entre 1 y 70  $\text{ng.L}^{-1}$ , para el E2 entre 2 y 50  $\text{ng.L}^{-1}$  y para el EE2 entre el límite de detección y 60  $\text{ng.L}^{-1}$ .

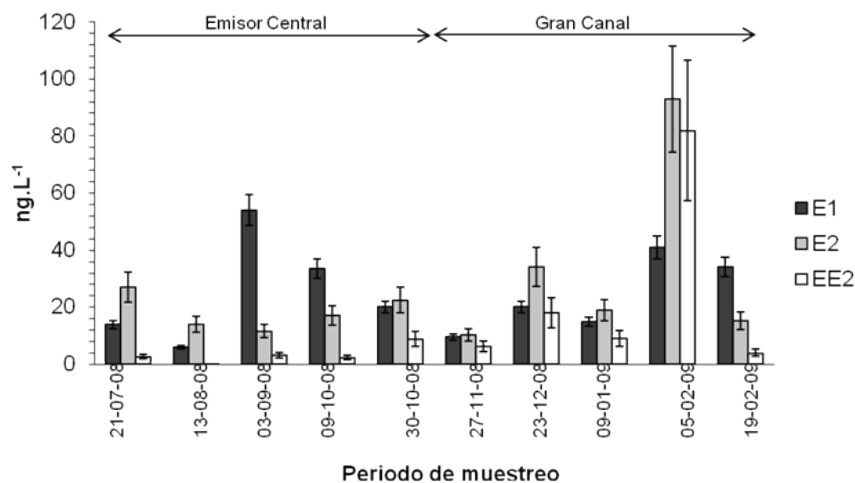


Figura 3. Detección de estrógenos encontrados en el agua residual provenientes del Emisor Central y Gran Canal

	Emisor Central			Gran Canal		
	E1	E2	EE2	E1	E2	EE2
Muestreo (ng.L <sup>-1</sup> )	25 ±19	19 ±6	4 ±3	24 ±13	34 ±34	24 ±33
Influente BRM (mg.L <sup>-1</sup> )	29 ±21	17 ±4	9 ±9	31 ±29	26 ±24	27 ±31
Remoción (%)	-16 ± 11	11± 33	-125 ± 200	-29 ± 123	24± 29	-13 ± 6

Tabla 1. Variación de las concentraciones de estrógenos en los muestreos y en el influente de BRMS piloto

Evaluación del BRM piloto sobre la remoción de E1, E2 y EE2 presentes en el agua residual municipal

En la figura 4 se presentan las remociones de los estrógenos obtenidas con TRH de 7, 9, 10 y 12 h con un TRC de 60 d. Se observa que para un TRH de 7 h, las remociones de E1, E2 y EE2 fueron entre 87 y 98%. Para TRH mayores de 7 h, las remociones de los tres estrógenos tienden a incrementarse por arriba de 96%, alcanzado valores hasta de 100%. La variación del TRH sí afectó la eliminación de los compuestos, especialmente para el E1. Para el E2, el aumento del TRH no afectó su eliminación, determinándose remociones por arriba de 98% bajo estas condiciones. Asimismo, en la figura 5 se presentan las concentraciones de los compuestos en el efluente del reactor con estas mismas condiciones de operación. Para un TRH de 7 h las concentraciones de E1 y EE2 en el efluente del reactor piloto fueron de 3 y 2.3 ng.L<sup>-1</sup>, respectivamente. Estas concentraciones se consideran altas, ya que posiblemente puedan causar disrupción endocrina en los organismos vivos (Ternes *et al.*, 1999b; Larsson *et al.*, 1999; Thorpe *et al.*, 2003; Palace *et al.*, 2006). Se observó que la concentración del estradiol en el efluente del reactor se mantuvo por debajo de 0.5 ng.L<sup>-1</sup>. Con el aumento del TRH las concen-

traciones de los tres estrógenos fueron menores a 1 ng.L<sup>-1</sup>, indicando también de esta manera que con TRH superiores a 7 h se pueden obtener eliminaciones considerablemente altas con una concentración baja de E1, E2 y EE2 en el efluente del reactor piloto.

Se ha reportado que mediante la tecnología de biorreactores con membranas que utilizan principalmente módulos de membranas de microfiltración y ultrafiltración no es posible remover contaminantes disueltos con pesos moleculares menores que 1,000 g.mol<sup>-1</sup>.

Sin embargo, parece que partículas tales como coloides, material particulado y materia orgánica natural que se encuentran de forma natural en las aguas residuales, tienen la capacidad para adsorber contaminantes, las cuales pueden significativamente incrementar el potencial de la MF y UF para remover contaminantes trazas tales como el E2 (Cho *et al.*, 2000; Schäfer *et al.*, 2002). Junto con esto y la concentración de biomasa dentro del BRM generan una obstrucción de los poros de las membranas reduciendo su tamaño, haciendo que las membranas funjan como una barrera física para los estrógenos, impidiendo su paso a través de las membranas. En los sistemas biológicos convencionales, tales como los lodos activados en sus diferentes modificaciones y/o otros procesos biológicos para el tratamiento de

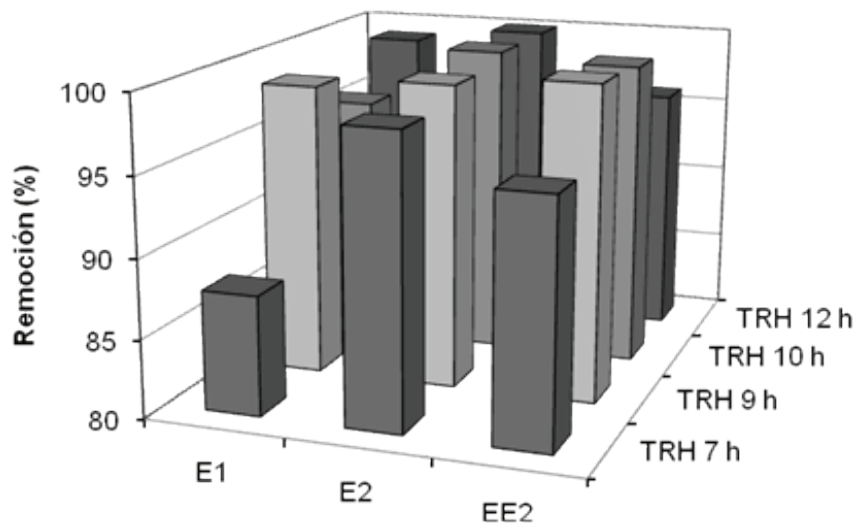


Figura 4. Remociones de estrógenos con diferentes TRH en el BRM piloto

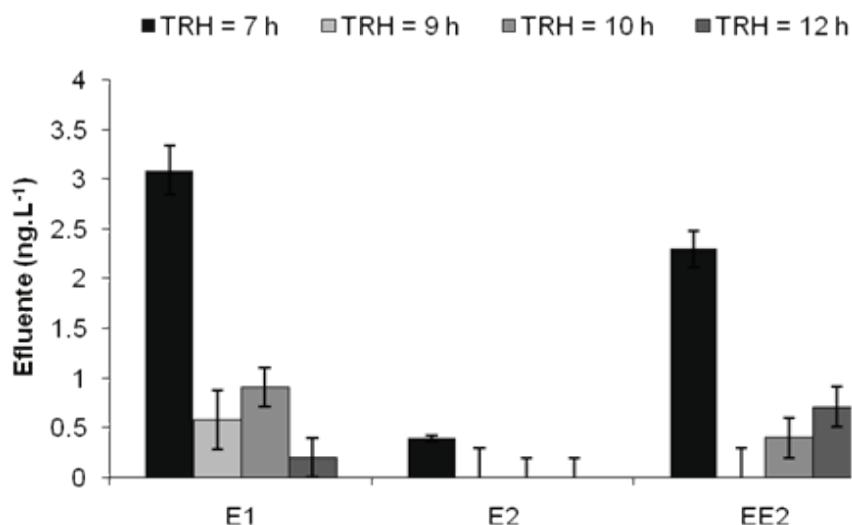


Figura 5. Concentraciones de los estrógenos con diferentes TRH en el efluente del BRM piloto

aguas residuales, estas partículas se escapan y están presentes en sus efluentes. Los compuestos adsorbidos en estas partículas pueden desorberse hacia la fase líquida, generando la presencia de compuestos disruptores-endócrinos en los efluentes de los procesos biológicos.

#### Concentración de estrógenos en la biomasa del BRMS

Durante los 234 días de operación del BRM piloto se determinaron concentraciones de los estrógenos en la biomasa activa (figura 6). Los resultados mostraron que los estrógenos son adsorbidos en la biomasa. Se observa que las máximas concentraciones de E1, E2 y EE2 fueron encontradas los primeros 94 días de operación,

las cuales estuvieron entre los límites de detección y hasta valores de  $70 \text{ ng.g}^{-1}$ . A partir de este día, existió una disminución en la concentración de los compuestos sobre la biomasa, indicando una mayor actividad de los microorganismos para degradar a los estrógenos dentro y fuera de los floculos biológicos. Las concentraciones de E1, E2 y EE2 en la biomasa fueron menores a  $18.4 \text{ ng.g}^{-1}$ . Este hecho, mostró que alrededor de 15% de los compuestos encontrados en la fase líquida fueron removidos por adsorción. Las tasas de biodegradación se mantuvieron con valores entre  $1 \text{ y } 12 \text{ ng.g SSV}^{-1}.\text{d}^{-1}$ . Esto demuestra que la remoción de los estrógenos en el BRM piloto se llevó a cabo por una combinación de procesos de biodegradación-adsorción simultánea siendo la biodegradación el principal mecanismo de remoción de los estrógenos.

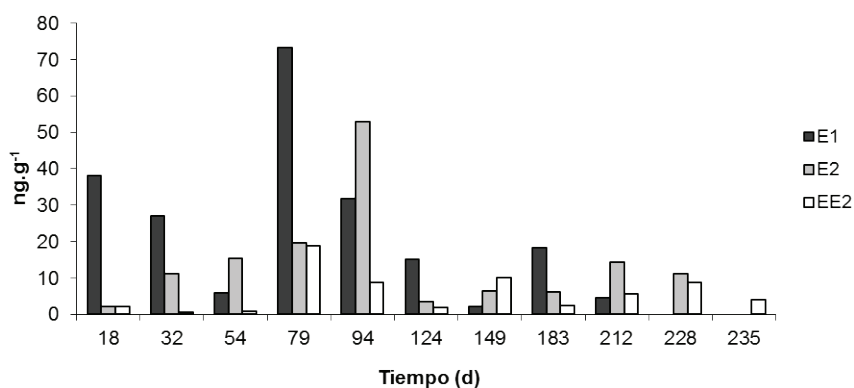


Figura 6. Concentración de estrógenos en la biomasa del BRMS

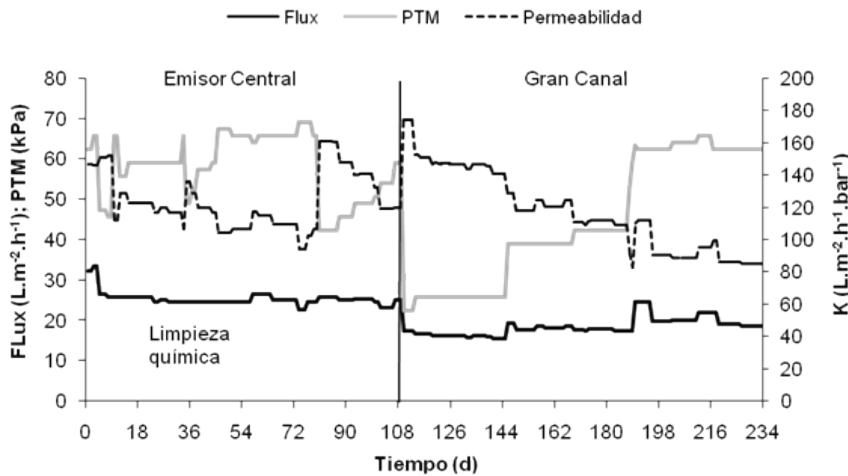


Figura 7. Evolución de la colmatación de la membrana en el tratamiento del agua residual de la Ciudad de México

### Seguimiento de la colmatación de las membranas en el tratamiento del agua residual municipal

El desempeño de la colmatación de las membranas es un factor muy importante en la operación de un BRMS (Judd, 2008), por lo tanto, el flujo a través de las membranas (flux), la presión transmembrana (PTM) y la permeabilidad (K) fueron evaluados diariamente en el biorreactor (figura 7). Se observó que existe una rápida velocidad de taponamiento de las membranas durante los primeros días de operación al trabajar con diferentes TRH, este fenómeno se debe principalmente a la acumulación de sólidos sobre la superficie de las membranas. Sin embargo, después de la colmatación, el flujo a través de las membranas se estabilizó y permaneció constante con un incremento paulatino de la PTM y la K. El taponamiento de las membranas fue inevitable aún con TRH altos.

### Conclusiones

Durante los muestreos de las aguas residuales del Emisor Central y Gran Canal del Desagüe se encontraron concentraciones de E1 entre 9-34 ng.L<sup>-1</sup>, de E2 entre 10 y 93 ng.L<sup>-1</sup> y entre 0.14 y 82 ng.L<sup>-1</sup> de EE2. La tecnología de biorreactores con membranas puede ser potencialmente considerada como una tecnología prometedora para la remoción compuestos disruptores-endócrinos generando agua tratada de excelente calidad para su reúso. Con el aumento en el TRH, las concentraciones de los tres estrógenos fueron menores a 1ng.L<sup>-1</sup>, indicando de esta manera que con TRH superiores a 7 h se pueden alcanzar remociones altas de los estrógenos que están presentes en los influentes de las plantas de tratamiento

de aguas residuales, asegurándose concentraciones de E1, E2 y EE2 en los efluentes menores a 1 ng.L<sup>-1</sup>, disminuyéndose posiblemente el efecto disruptivo que presentan estos compuestos sobre los organismos vivos que viven en los cuerpos receptores que reciben estas descargas. La cuantificación de los estrógenos en el agua y en la biomasa dentro del BRMS indicó que la remoción de estos compuestos se lleva a cabo por un mecanismo simultáneo de adsorción-biodegradación.

### Agradecimientos

Se agradece el apoyo al Laboratorio de Calidad del Agua del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua por la ayuda en la implementación y validación de la técnica analítica y por el uso y manejo del cromatógrafo de gases y el espectrómetro de masas-masas.

### Referencias

Andersen H., Siegrist H., Halling-Sorensen B., Ternes T.A. Fate of Estrogens in Municipal Sewage Treatment Plant. *Environmental Science and Technology*, volumen 37, 2003: 4021-4026.

Bachmann C.L., Winther N.M., Helweg C. Feminisation of Fish-The Effect of Estrogenic Compounds and Their Fate in Sewage Treatment Plant and Nature. Environmental Project No. 729, Danish Environmental Protection Agency, 2002.

Braga O., Smythe G.A., Schafer A.I., Feitz A.J. Steroid Estrogens in Primary and Tertiary Wastewater Treatment Plants. *Water Science and Technology*, volumen 52, 2005: 273-278.

Brown R.P., Greer R.D., Mihaich E.M., Guiney P.D. A Critical Review of the Scientific Literature on Potential Endocrine-Mediated Effects in Fish and Wildlife. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, volumen 49, 2001: 17-25.



- Chia-Yang C., Tzu-Yao W., Gen-Shuh W., Hui-Wen C., Ying-Hsuan L., Guang-Wen L. Determining Estrogenic Steroids in Taipei Waters and Removal in Drinking Water Treatment Using High-Flow Solid-Phase Extraction and Liquid Chromatography/Tandem Mass Spectrometry. *Science Total Environmental*, volumen 378, 2007: 352-365.
- Cho J., Amy G., Pellegrino J. Membrane Filtration of Natural Organic Matter: Factors and Mechanisms Affecting Rejection and Flux Decline with Charged Ultrafiltration (UF) Membrane. *Journal Membrane Science*, volumen 164, 2000: 89-110.
- Clara M., Strenn B., Gans O., Martínez E., Kreuzinger N., Kroiss H. Removal of Selected Pharmaceuticals, Fragrances and Endocrine Disrupting Compounds in a Membrane Bio-reactor and Conventional Wastewater Treatment Plants. *Water Research*, volumen 39, 2005: 4797-4807.
- Commission of the European Communities. Community Strategy for Endocrine Disrupters - a Range of Substances Suspected of Interfering with the Hormone Systems of Humans and Wildlife, en: COM 1999, Bruselas, Bélgica, diciembre de 1999.
- Defrance L., Jaffrin M.Y. Comparison Between Filtration at Fixed Transmembrane Pressure and Fixed Flux: Application to a Membrane Bio-Reactor Used for Wastewater Treatment. *Journal Membrane Science*, volumen 152, 1999: 203-210.
- Estrada-Arriaga E.B., Mijaylova P.N. Influence of Operational Parameters (Sludge Retention Time and Hydraulic Residence Time) on the Removal of Estrogens by Membrane Bioreactor. *Environmental Science and Pollution Research*, volumen 18 (número 7), 2011: 1121-1128.
- Gibson R., Becerril-Bravo E., Silva-Castro V., Jimenez B. Determination of Acidic Pharmaceuticals and Potential Endocrine Disrupting Compounds in Wastewaters and Spring Waters by Selective Elution and Analysis by Gas Chromatography-Mass Spectrometry. *Journal Chromatography A*, volumen 1169, 2007: 31-39.
- Hashimoto T., Onda K., Nakamura Y., Tada K., Miya A., Murakami T. Comparison of Natural Estrogen Removal Efficiency in the Conventional Activated Sludge Process and the Oxidation Ditch Process. *Water Research*, volumen 41, 2007: 2117-2126.
- Hu J.Y., Chen X., Tao G., Kekred K. Fate of Endocrine Disrupting Compounds in Membrane Bio-Reactor Systems. *Environmental Science and Technology*, volumen 41, 2007: 4097-4102.
- Johnson A.C., Belfroid B., Di-Corcia A. Estimation of Steroid Estrogens Inputs Into Activated Sludge Treatment Works and Observations on their Removal From the Effluent. *Science Total Environmental*, volumen 256, 2000: 163-173.
- Joss A., Andersen H., Ternes T., Richle P.R., Siegrist H. Removal of Estrogens in Municipal Wastewater Treatment Under Aerobic and Anaerobic Conditions: Consequences for Plant Optimization. *Environmental Science and Technology*, volumen 38 (número 11), 2004: 3047-3055.
- Judd S. The Status of Membrane Bioreactor Technology. *Trends in Biotechnology*, volumen 26 (número 2), 2008: 109-116.
- Jürgens M.D., Holthaus K.I.E., Johnson A.C., Smith J.J.L., Hetheridge M., Williams R.J. The Potential for Estradiol and Ethinylestradiol Degradation in English Rivers. *Environmental Toxicology and Chemistry*, volumen 21 (número 3), 2002: 480-488.
- Katori Y., Ksu Y., Utsumi H. Estrogens-Like Effect and Cytotoxicity of Chemical Compounds. *Water Science and Technology*, volumen 46, 2002: 363-366.
- Körner W., Bolz U., Sussmuth W., Hiller G., Schuller W., Hanf V., Hagenmaier H. Input/Output Balance of Estrogenic Active Compounds in Major Municipal Sewage Plant in Germany. *Chemosphere*, volumen 40, 2000: 1131-1142.
- Larsson D.G. J., Adolffson-Erici M., Parkkonen J., Pettersson M., Berg A.H., Olsson P.E., Forlin L. Ethinylestradiol- An Undesired Fish Contraceptive? *Aquatic Toxicology*, volumen 45, 1999: 91-97.
- Masunaga S., Itazawa S.T., Furuichi T., Sunardi, Villeneuve D.L., Kanan K., Giesy J.P., Nakanish J. Occurrence of Estrogenic Activity and Estrogenic Compounds in the Tama River, Japan. *Environmental Science and Technology*, volumen 7, 2000: 101-117.
- Miles-Richardson S.R., Pierens S.L., Nichols K.M., Kramer V.J., Snyder E.M., Snyder S.A., Render J.A., Fitzgerald S.D., Giesy J.P. Effects of Waterborne Exposure to 4-Nonylphenol and Nonylphenolethoxylate on Secondary Sex Characteristics and Gonads of Fathead Minnows (*Pimephales promelas*). *Environmental Research*, volumen 80, 1999: S122-S137.
- Palace V., Wautier K., Evans R., Blanchfield P., Mills K., Chalan-chuk S., Godard D., McMaster M., Tetreault G. Peters L., Vandeblylaardt L., Kidd A. Biochemical and Histopathological Effects in Pearl Dace (*Margariscus Margarita*) Chronically Exposed to a Synthetic Estrogen in a Whole Lake Experiment. *Environmental Toxicology and Chemistry*, volumen 25, 2006: 1114-1125.
- Panter G.H., Thompson R.S., Beresford N., Sumpter J.P. Transformation of a Non-oestrogenic Steroid Metabolite to an Oestrogenically Active Substance by Minimal Bacterial Activity. *Chemosphere*, volumen 38, 1999: 3579-3596.
- Sedlak D.L., Gray J.L., Pinkston K.E. Understanding Microcontaminants in Recycled Water. *Environmental Science and Technology*, volumen 34 (número 23), 2000: 508-515.
- Schäfer A.I., Waite T.D. Removal of Endocrine Disrupters in Advanced Treatment-The Australian Approach, en: International Water Association, 2002, pp. 37-48.
- Schäfer A.I., Mastrup M., Jensen R.L. Particle Interactions and Removal of Trace Contaminants from Water and Wastewaters. *Desalination*, volumen 147, 2002: 243-250.
- Stumpf M., Ternes T.A., Iiaberer K., Baumann W. Determination of Natural and Synthetic Estrogens in Sewage Plants and River Water. *Vom Wasser*, volumen 87, 1996: 251-261.
- Sumpter J.P., Jobling S. Vitellogenesis as a Biomarker for Estrogenic Contamination of the Aquatic Environment. *Environmental Health Perspectives*, volumen 103, 1995: 173-178.

- Svenson A., Allard A.S., Ek M. Removal of Estrogenicity in Swedish Municipal Sewage Treatment Plants. *Water Research*, volumen 37, 2003: 4433-4443.
- Ternes T.A., Stumpf M., Mueller J., Haberer K., Wilken R.D., Sevo M. Behaviour and Occurrence of Estrogens in Municipal Sewage Treatment Plants-I. Investigations in Germany, Canada y Brazil. *Science Total Environmental*, volumen 225, 1999a: 91-99.
- Thorpe K.L., Cummings R.I., Hutchinson T.H., Scholze M., Brighty G., Sumpter J.P., Tyler C.R. Relative Potencies and Combination Effects of Steroidal Estrogens in Fish. *Environmental Science and Technology*, volumen 37, 2003: 1142-1149.
- United States Environmental Protection Agency. *Special Report on Environmental Endocrine Disruptions: An Effects Assessment and Analysis*. EPA-630/R-96-012, febrero, 1997b.

#### Este artículo se cita:

##### Citación estilo Chicago

Estrada-Arriaga, Edson Baltazar, Petia Mijaylova-Necheva, Gabriela Moeller-Chavez, Gabriela Mantilla-Morales. Presencia y tratamiento de compuestos disruptores endócrinos en aguas residuales de la Ciudad de México empleando un biorreactor con membranas sumergidas. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XIV, 02 (2013): 275-284.

##### Citación estilo ISO 690

Estrada-Arriaga E.B., Mijaylova-Necheva P., Moeller-Chavez G., Mantilla-Morales G. Presencia y tratamiento de compuestos disruptores endócrinos en aguas residuales de la Ciudad de México empleando un biorreactor con membranas sumergidas. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, volumen XIV (número 2), abril-junio 2013: 275-284.

#### Semblanza de los autores

*Estrada-Arriaga Edson Baltazar*. Doctor en ingeniería por la Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería Campus Morelos en 2011. Actualmente es especialista en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) en la subcoordinación de tratamiento de aguas residuales. Sus áreas de interés son el tratamiento de aguas residuales municipales y efluentes industriales mediante procesos físico-químicos y procesos biológicos; aplicación de biorreactores con membranas para el tratamiento y reuso de aguas residuales; contaminantes emergentes, generación de electricidad mediante celdas de combustible microbiana a partir de desechos sólidos orgánicos y aguas residuales; así como la generación de bio-hidrógeno.

*Mijaylova-Nacheva Petia*. Doctora en ciencias técnicas por el Instituto Superior de Ingeniería Civil en Moscú, Rusia. Especialista en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) en la subcoordinación de tratamiento de aguas residuales. Sus áreas de interés son el tratamiento de aguas y lodos residuales municipales e industriales, procesos físico-químicos, Sistemas biológicos aerobios y anaerobios. Sistemas de reuso del agua.

*Moeller-Chavez Gabriela*. Doctora en ingeniería por la Universidad Nacional Autónoma de México. Actualmente es coordinadora del área de tratamiento y calidad del agua en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Sus áreas de interés son el tratamiento de aguas residuales por métodos convencionales y no convencionales, procesos biológicos de tratamiento; reuso de aguas; manejo, tratamiento y disposición de lodos residuales; calidad del agua; microbiología del agua.

*Mantilla-Morales Gabriela*. Doctora en ciencias y técnicas del medio ambiente por la Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, París. Actualmente es subcoordinadora del área de tratamiento de aguas residuales en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Sus áreas de interés son el tratamiento de aguas municipales e industriales (refinación del petróleo).

*Ramírez-Salinas Norma*. Maestra en calidad por la Universidad La Salle. Actualmente es subcoordinador del área de calidad del agua. Sus principales líneas de investigación son el cálculo de la incertidumbre en mediciones fisicoquímicas y desarrollo de sistemas de gestión de calidad.

*Sánchez-Zarza Manuel*. Químico por la Universidad Nacional Autónoma de México. Actualmente es especialista en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) en la subcoordinación de calidad del agua. Su área de interés es el desarrollo e implementación de metodologías para la detección de contaminantes en el agua y lodos por cromatografía gases-masas y cromatografía de líquidos de alta resolución.