



# Contaminantes recalcitrantes, el reto en el tratamiento de aguas residuales

J. Edgar Carrera Crespo  
*Departamento de Química,  
Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa*



## Resumen

El agua es un recurso que utilizamos todos los días, es parte fundamental de nuestra existencia, tanto que requerimos al menos consumir 2 litros de agua diarios para un buen funcionamiento de nuestro organismo. Asimismo, la empleamos en nuestra higiene, en el lavado de prendas, frutas, utensilios, automóviles, como medio de arrastre de nuestros desechos, entre otras actividades. Toda esta agua se utiliza una sola vez y va directamente hacia el drenaje, mezclándose con otro tipo de aguas residuales, provenientes de industrias y hospitales, incrementando la variedad de contaminantes, hasta que llega a una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en el mejor de los casos. Sin embargo, algunos de los contaminantes presentes en el agua residual, no pueden ser degradados o removidos mediante los tratamientos convencionales que se emplean en las PTAR, por ejemplo, el de lodos activados, uno de los más utilizados en las plantas de tratamiento en México. Dentro de estos compuestos recalcitrantes se encuentran algunos productos de cuidado personal, de limpieza y medicamentos, especialmente antibióticos. Debido al envío de aguas tratadas a cuerpos de agua, como acuíferos y lagos, se ha detectado la presencia de antibióticos, representando un riesgo para la vida acuática y para la salud humana. Por lo tanto, es necesario trabajar en tratamientos avanzados para lograr la degradación o remoción de este tipo de contaminantes en aguas residuales. En este artículo se presenta un panorama de las aguas residuales, los problemas de los procesos de tratamiento convencionales para degradar ciertos compuestos orgánicos, así como algunos de los tratamientos avanzados que se están desarrollando para degradar o eliminar estos contaminantes recalcitrantes.

**Palabras clave:** Aguas residuales, contaminantes recalcitrantes, tratamientos avanzados, antibióticos

## Abstract

Water is a resource that we use every day, it is a fundamental part of our existence, so much so that we need to consume at least 2 liters of water daily for the proper functioning of our body. Likewise, we use it in our hygiene, for washing clothes, fruits, utensils, cars, for transporting our organic waste and other activities. All this water, which we generally use only once, goes directly to the drainage pipe, mixing with other types of wastewaters, such as those discharged by industries and hospitals, increasing the variety of pollutants until it arrives, in the best of cases, to wastewater treatment plant (WWTP). However, some of the contaminants contained in wastewater cannot be degraded or removed by conventional treatments used in WWTP, such as activated sludge, one of the most used in treatment plants in Mexico. Among these recalcitrant compounds are some personal care products, cleaning products and pharmaceuticals, especially antibiotics. The presence of these latter in water bodies such as aquifers or lakes, where part of the treated water is sent, represents a risk to aquatic life and human health. Then, this makes necessary to work in the search of advanced treatments to achieve the degradation or removal of this type of contaminants in wastewater. This article shows an overview of wastewater, the problems of conventional treatment processes to degrade certain organic compounds, as well as some of the advanced treatments that are being developed to degrade or eliminate these recalcitrant contaminants.

**Keywords:** Wastewater, recalcitrant contaminants, advanced treatments, antibiotics

## Introducción

El agua que usamos en nuestras actividades cotidianas, como en la ducha, lavado de manos, lavado de ropa, descarga de sanitarios, entre otras, generalmente es vertida hacia el sistema de drenaje. En el año 2020 en México, se generaron 8,820 hm<sup>3</sup> (hectómetros cúbicos) de aguas residuales municipales, equivalentes a 279.8 m<sup>3</sup>/s (CONAGUA, 2022), por lo que cada 3 horas se tuvo un volumen suficiente como para llenar el estadio Azteca. Sin embargo, de estas aguas residuales municipales generadas, sólo se recolectó mediante los sistemas de alcantarillado municipal alrededor del 77%, de la cual únicamente el 67.2% fue tratada en una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), es decir, del volumen total de agua residual municipal que se generó en México en el año 2020, sólo se trató el 51.7% (CONAGUA, 2022), quedando prácticamente la mitad de esta agua sin tratar. Además, falta considerar el agua residual no municipal desechada por otros sectores como la industria, que en el mismo año generó 7,010 hm<sup>3</sup>, tratando únicamente el 32.2%. Si juntamos el total de agua residual generada en el año 2020, municipal y no municipal, tenemos que sólo se trató el 43%, por lo que más de la mitad del agua residual desechada, pudo llegar a cuerpos de agua sin haber recibido algún tipo de tratamiento. Por otra parte, aún el agua residual después de ser tratada podría contener algunos tipos de contaminantes, debido a que los procesos convencionales que se utilizan en las PTAR, como el tratamiento mediante lodos activados, se encuentran limitados para llevar a cabo su degradación o remoción, ya que remueven principalmente desechos orgánicos de aguas residuales domésticas, los cuales pueden ser degradados mediante microor-

ganismos. Sin embargo, las aguas negras que reciben las PTAR son una mezcla de todas las aguas residuales generadas en la ciudad, como la de las industrias y hospitales, incrementándose la cantidad y variedad de contaminantes, de los cuales algunos no pueden ser degradados mediante los tratamientos convencionales utilizados en las PTAR, como el de lodos activados, que es el principal proceso de tratamiento de aguas residuales municipales empleado en el 49% de las PTAR en México (CONAGUA, 2022). Por lo tanto, estos contaminantes son conocidos como contaminantes recalcitrantes, que de acuerdo con la definición del Instituto Mexicano de Tecnología del agua (IMTA), son aquellos que, por tener una estructura muy estable químicamente, se resisten al ataque de los microorganismos o de cualquier mecanismo de degradación, sea biológico o químico (IMTA, 2012). La forma de identificar este tipo de contaminantes es analizando la composición del influente (agua a tratar) y del efluente (agua tratada) de las PTAR. Si las concentraciones de un compuesto detectadas en el influente y efluente son iguales o similares, nos estaría indicando la presencia de un contaminante recalcitrante, es decir, un compuesto que no pudo ser degradado mediante el proceso empleado en la PTAR. Por esta razón, se están desarrollando procesos alternos que sean capaces de degradar o eliminar estos contaminantes, los cuales son conocidos como tratamientos avanzados. Dentro de estos tratamientos, que están basados en la generación de especies altamente oxidantes, los procesos fotocatalíticos y fotoelectrocatalíticos han mostrado buenos porcentajes de degradación de contaminantes recalcitrantes en medios acuosos, en comparación con los logrados mediante procesos convencionales. En el

área académica de Catálisis de la UAM-Iztapalapa, sintetizamos, caracterizamos y evaluamos materiales en la degradación o remoción de compuestos orgánicos, empleando procesos fotocatalíticos y fotoelectrocatalíticos, colaborando en la búsqueda de materiales y procesos que puedan llevar a cabo la eliminación de los contaminantes recalcitrantes, que es el reto actual en el tratamiento de aguas residuales.

### **Contaminantes recalcitrantes**

Los contaminantes recalcitrantes son compuestos que no pueden ser degradados mediante procesos químicos o biológicos convencionales, por lo que su nombre está asociado a su alta estabilidad química. Dentro de este tipo de contaminantes se encuentran agroquímicos, fenoles, colorantes, surfactantes, pesticidas y compuestos farmacéuticos, que pueden permanecer por largos períodos en el ambiente y podrían ser dañinos para las especies vivas, incluyendo a los humanos (Fouad, 2021). Algunos de estos contaminantes se encuentran clasificados como contaminantes orgánicos persistentes (COP), que además de ser recalcitrantes, son tóxicos y pueden bioacumularse. El benceno, tolueno, xileno y pesticidas como aldrin, dieldrin, eldrin, mirex, hexaclorobenceno y diclorodifeniltricloroetano, este último mejor conocido como DDT, están clasificados como COP (Kumar, 2022). Debido al riesgo que representan estos contaminantes, en el año 2001 se llevó a cabo un tratado dentro del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP), donde se adoptó la Convención de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes, con directrices específicas basadas en el protocolo de Aarhus de 1998, para disminuir a escala global el nivel de COP en el medio ambiente (Ku-

mar, 2022). México firmó este convenio el 23 de mayo de 2001, ratificándolo el 10 de febrero de 2003. Fue el primer país de Latinoamérica que ratificó este convenio, el cual entró en vigor el 17 de mayo de 2004. Por otra parte, los productos farmacéuticos y de cuidado personal (PPCP) presentes como contaminantes en el ambiente, tales como derivados de fragancias, medicamentos, agentes antibacterianos o conservantes de cosméticos, no están clasificados como COP, aunque algunos tienen características similares a este tipo de contaminantes, como ser persistentes a la degradación, toxicidad y bioacumulación. A las concentraciones comúnmente reportadas en el ambiente, los PPCP raramente son tóxicos, pero la capacidad de estos compuestos para alterar los procesos y funciones ecológicas en los ecosistemas de agua dulce es frecuentemente subestimada (Richmond, 2017). Por lo anterior, es necesario detectar el tipo de compuestos orgánicos que contienen los efluentes de las PTAR, para desarrollar e implementar procesos que sean capaces de degradar o remover estos contaminantes, antes de que los efluentes sean vertidos en cuerpos de agua.

### **Contaminantes en influentes y efluentes de PTAR en México**

En México, se han realizado estudios para cuantificar algunos contaminantes presentes en los influentes y efluentes de las PTAR (Figura 1), como el llevado a cabo por Peña-Álvarez y Castillo-Alanís (Peña-Álvarez, 2015), donde analizaron los influentes y efluentes de 3 PTAR localizadas en la Ciudad de México, la de Cerro de la Estrella, la de Ciudad Universitaria (CU) y una en Coyoacán. Aunque no mencionan el tipo de tratamiento de las PTAR, al menos las dos primeras emplean el pro-

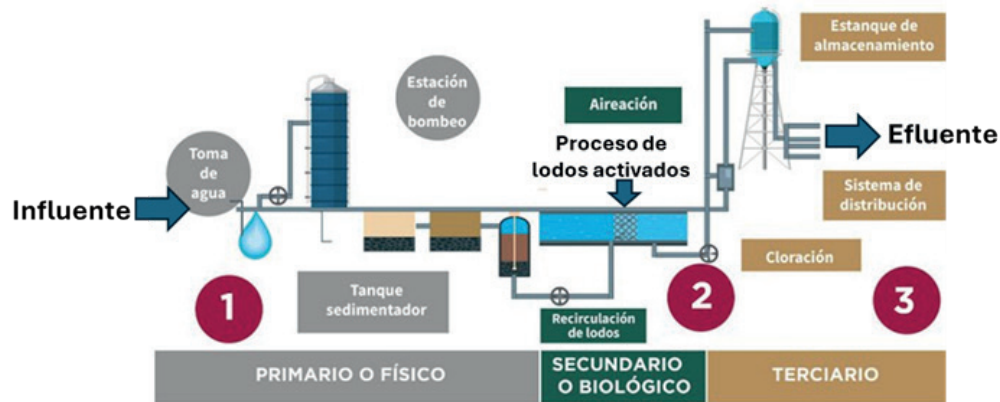


Figura 1. Esquema de las etapas del tratamiento de aguas residuales, donde se utiliza el proceso de lodos activados (imagen tomada de la página de X, antes twitter, de SACMEX, modificada con fines ilustrativos).

ceso de lodos activados, el más utilizado en las PTAR en México, que consiste principalmente en el uso de lodos conteniendo bacterias, capaces de alimentarse de materia como los desechos orgánicos de los humanos (Figura 1). Algunas plantas se encuentran trabajando por debajo de su

capacidad o están fuera de operaciones, como fue el caso de la PTAR de CU en el año que se realizó esta investigación, por tal motivo sólo se analizó el influente en esta planta. En la Tabla 1 se muestran los resultados de los análisis realizados a los influentes y efluentes.

Planta		Contaminantes				
		Ibuprofeno (ng/mL)	Clorofeno (ng/mL)	Naproxeno (ng/mL)	Triclosán (ng/mL)	Bisfenol A (ng/mL)
Cerro de la Estrella (8/sep/08)	Influente	0.38	0.14	3.47	1.52	2.46
	Efluente	NC	ND	0.30	0.08	0.21
Cerro de la Estrella (22/sep/08)	Influente	0.49	1.79	8.93	0.87	2.44
	Efluente	0.34	1.34	0.20	0.19	0.41
Cerro de la Estrella (29/sep/08)	Influente	2.15	1.51	21.03	8.04	0.43
	Efluente	0.08	0.25	0.76	0.22	NC
Coyoacán (8/sep/08)	Influente	0.41	0.23	3.45	2.50	1.18
	Efluente	0.16	NC	0.41	0.64	0.07
Coyoacán (22/sep/08)	Influente	1.80	2.40	18.94	6.66	1.19
	Efluente	0.06	1.38	NC	0.32	0.03
Coyoacán (29/sep/08)	Influente	1.85	1.48	24.86	9.34	0.81
	Efluente	0.03	0.95	NC	2.63	0.02
CU (12/sep/08)	Influente	0.23	0.21	2.85	1.15	0.29
CU (22/sep/08)	Influente	0.62	0.07	4.10	1.43	0.33
CU (29/sep/08)	Influente	0.57	0.12	8.92	1.59	0.81

NC=No cuantificado  
ND= No detectado

Tabla 1. Cuantificación de los contaminantes seleccionados para ser detectados en los influentes y efluentes analizados (Peña-Álvarez, 2015).

Contaminante	Influyente (promedio) µg/L	Efluente (promedio) µg/L	% de remoción*
Tetraciclina	72.7	64.9	10.7
Cefaclor	3.2	2.3	28.1
Cefadroxilo	5.0	4.7	6
Ampicilina	17.1	15.5	9.3
Clonazepam	1.3	0.7	46.1
Lormetazepam	13.5	12.2	9.6
Cis-androsterona	2.9	2.6	10.3
Morfina	3.5	3.2	8.6
Metadona	0.1	0.1	0

\*Obtenido a partir de los influentes y efluentes promedio.

*Tabla 2. Cuantificación y porcentaje de remoción, de algunos contaminantes seleccionados para ser detectados en el influente y efluente de la PTAR-Atapaneo (Robledo-Zacarías, 2017).*

De acuerdo con los datos de la Tabla 1, prácticamente en todos los análisis se detectaron los contaminantes en los efluentes de las PTAR, indicando que los procesos de tratamiento empleados son insuficientes para degradar o remover estos compuestos orgánicos. Asimismo, Robledo-Zacarías y colaboradores (Robledo-Zacarías, 2017), llevaron a cabo el análisis del influente y efluente de una PTAR ubicada en Morelia, Michoacán, México (PTAR-Atapaneo). Esta planta recibe aguas residuales domésticas e industriales, así como pluviales, realizando el tratamiento básicamente en 6 etapas: 1) Tratamiento primario (cribado), 2) Sedimentación primaria, 3) Filtros biológicos, 4) Reactor biológico (lodos activados), 5) Sedimentador secundario, 6) Unidad de desinfección (cloración). Para el estudio de contaminantes en influente y efluente, realizaron el muestreo del 24 al 30 junio del 2013 (temporada de estiaje), para evitar la dilución de los contaminantes con las aguas pluviales. Algunos de los contaminantes detectados a la entrada y salida de esta PTAR, así como el porcentaje de remoción, son mostrados en la Tabla 2.

En ambos estudios, los contaminantes identificados en el influente también se detectaron en el efluente, la mayoría con un porcentaje de remoción menor al 11%, evidenciando que los procesos basados en tratamientos biológicos tienen una muy baja eficiencia en la degradación de ciertos compuestos orgánicos, como los mostrados en las Tablas 1 y 2. De tal forma, la presencia de estos contaminantes en las aguas tratadas podría representar un riesgo para la vida acuática y la salud humana, ya que este tipo de aguas se utilizan para recargar acuíferos mediante infiltración superficial o por inyección directa, así como para la recarga de cuerpos de agua superficiales, como en el caso de la CDMX, donde los lagos de Xochimilco y Tláhuac se recargan con aguas tratadas, las cuales lamentablemente también reciben descargas de aguas negras. Los antibióticos forman parte de los contaminantes detectados en aguas tratadas y cuerpos de agua, esto preocupa a la comunidad científica, ya que pueden acelerar la proliferación de patógenos resistentes a productos antibacterianos (resistencia antibiótica), alteraciones en la vida acuática y en la microbiota humana (So-

sa-Hernández, 2021). En la Tabla 2 se observan 4 antibióticos, la tetraciclina, cefaclor, cefadroxilo y ampicilina, de los cuales después del tratamiento sólo se removió el 10.7, 28.1, 6 y 9.3 %, respectivamente, es decir, más del 70% de la cantidad detectada de estos contaminantes a la entrada se encontró en el efluente, que es utilizado para actividades como riego y recarga de cuerpos de agua en la ciudad. Por tal motivo, se tiene el reto de degradar o remover este tipo de contaminantes recalcitrantes de las aguas tratadas. Afortunadamente, tratamientos avanzados como la fotocatalisis y fotoelectrocatalisis, han mostrado muy buenas eficiencias de degradación o remoción de contaminantes recalcitrantes a nivel laboratorio, degradando prácticamente el compuesto orgánico en su totalidad. Sin embargo, existen pocos estudios bajo condiciones reales y escalamientos, debido a que algunos materiales catalíticos pueden presentar ciertos inconvenientes en ambientes reales, como baja estabilidad química, fotodegradación, desprendimiento del sustrato o inactivación, entre otros. En el área académica de Catálisis, del Departamento de Química de la UAM-Iztapalapa, estamos desarrollando la línea de investigación en materiales fotoelectrocatalíticos y electrocatalíticos, con el fin de diseñar materiales con una alta estabilidad y eficiencia en la remoción de contaminantes en medios acuosos, que puedan ser empleados en condiciones y parámetros reales, para aplicarlos en procesos avanzados junto con los tratamientos biológicos u otros procesos, teniendo la capacidad de eliminar los contaminantes recalcitrantes presentes en las aguas residuales, de tal forma que las aguas tratadas sean utilizadas en diversas actividades sin representar un riesgo para la salud de los seres vivos.

## Fotocatálisis y fotoelectrocatalisis

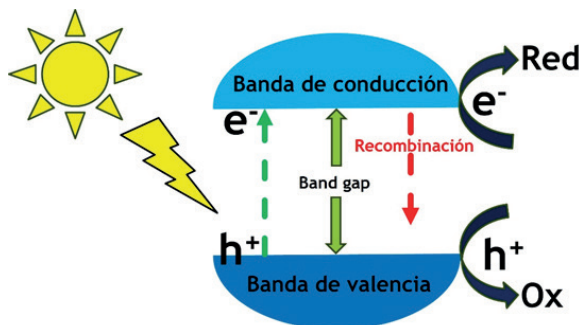


Figura 2. Representación esquemática del proceso de fotocatalisis.

Varios compuestos orgánicos clasificados como contaminantes recalcitrantes han sido degradados o removidos en medios acuosos, mediante tratamientos avanzados como la fotocatalisis y fotoelectrocatalisis. Ambos procesos consisten principalmente en activar un material catalítico mediante iluminación. Estos materiales catalíticos generalmente son semiconductores, con una separación entre sus bandas de valencia (banda llena de electrones) y de conducción (banda vacía), necesitando una energía igual o mayor a esta separación, conocida como band gap, para pasar electrones de la banda de valencia a la banda de conducción (Figura 2). Si el material fotocatalítico puede fotoactivarse con luz visible, esta energía puede provenir de una fuente luminosa como el sol, pero si el fotocatalizador tiene un band gap mayor a la energía de la luz visible, necesitaría ser irradiado con mayor energía, como la radiación ultravioleta. Alrededor del 5% del espectro solar es radiación ultravioleta, por lo que se buscan materiales fotocatalíticos o fotoelectrocatalíticos que se activen con luz visible, químicamente estables y no se degraden con la ilumi-

nación. Además, deben presentar baja recombinación para tener mayor cantidad de huecos disponibles para oxidar directa o indirectamente los compuestos orgánicos, es decir, cuando el electrón es excitado o movido hacia la banda de conducción hay una ausencia del electrón en la banda de valencia conocida como hueco, generándose el par electrón/hueco ( $e^-/h^+$ ), pero si los electrones regresan a donde están los huecos, es decir, se recombinan, ya no se tendrían estos huecos disponibles, por lo que ya no habría oxidación directa o indirecta del compuesto orgánico (Figura 2), teniendo un material fotocatalítico o fotoelectrocatalítico ineficiente para la degradación de contaminantes orgánicos.

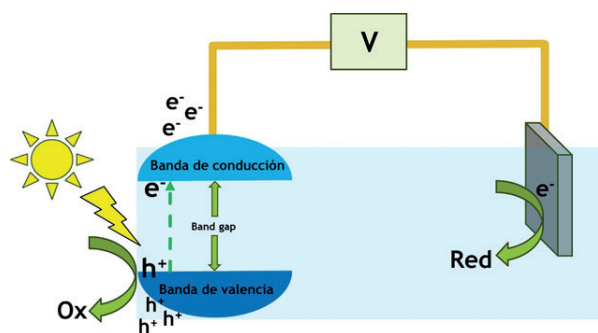


Figura 3. Representación esquemática del proceso de fotoelectrocatalisis.

En el caso de los materiales fotocatalíticos, una estrategia para disminuir la recombinación es unir dos o más semiconductores, que tengan una alineación de bandas de valencia y conducción convenientes para incrementar la separación de los pares electrón/hueco fotogenerados. Para los materiales fotoelectrocatalíticos es más sencillo disminuir la recombinación, ya que una estrategia puede ser aplicar un gradiente de potencial para separar los electrones y huecos fotogenerados (Figura 3), pero se tiene el

inconveniente de requerir energía adicional para llevar a cabo este proceso.

Otro aspecto importante que considerar en estos materiales es que haya alta disponibilidad de sus precursores, que sean de bajo costo y con la posibilidad de que puedan obtenerse en grandes cantidades, para que puedan ser aplicados en procesos a gran escala. Dentro del grupo Web-CRG (Water, energy and biomass, Catalysis Research Group), perteneciente al área de Catálisis, estamos desarrollando materiales con la capacidad de fotoactivarse en la región visible o cercana al visible, con alta estabilidad química y desempeño fotoelectrocatalítico. Además, estos catalizadores son obtenidos a partir de precursores altamente disponibles, como titanio, hierro y zinc, con un costo medio a bajo, empleando técnicas de síntesis que podrían ser escalables. Asimismo, evaluamos la eficiencia de los materiales y procesos fotoelectrocatalíticos en la degradación o remoción de contaminantes bajo distintas condiciones y parámetros de experimentación, con el fin de encontrar las más convenientes para incrementar la degradación o eliminación del contaminante y los subproductos generados en el proceso. Se han realizado estudios con el financiamiento otorgado mediante el proyecto SECTEI/152/2023, donde se está evaluando la degradación de oxitetraciclina, un antibiótico que ha sido detectado en efluentes de PTAR.

En la Figura 4 se muestran los espectros de absorción UV-Vis, obtenidos durante la evaluación de la degradación de oxitetraciclina mediante un proceso fotoelectrocatalítico, donde se utilizó un fotoelectrocatalizador basado en nanoestructuras de  $TiO_2$ , variando las condiciones de experimentación, por lo que la cantidad degradada del



contaminante y sus subproductos es diferente. Este comportamiento lo observamos por los espectros de absorbancia obtenidos para cada condición, donde los picos de absorbancia característicos de la oxitetraciclina a aproximadamente 275 y 360 nm, prácticamente no se detectan después de los tratamientos, en particular para la condición final 4 (línea naranja), donde no se observan picos de absorbancia entre 250 y 450 nm, confirmando un mayor porcentaje de degradación del contaminante. Asimismo, estas mediciones mostraron que hay distintos factores que pueden alterar la eficiencia del proceso fotoelectrocatalítico, como las especies presentes en el medio acuoso, un punto muy importante a considerar si los fotoelectrocatalizadores se van a aplicar en la degradación de contaminantes orgánicos, presentes en aguas residuales o tratadas reales.

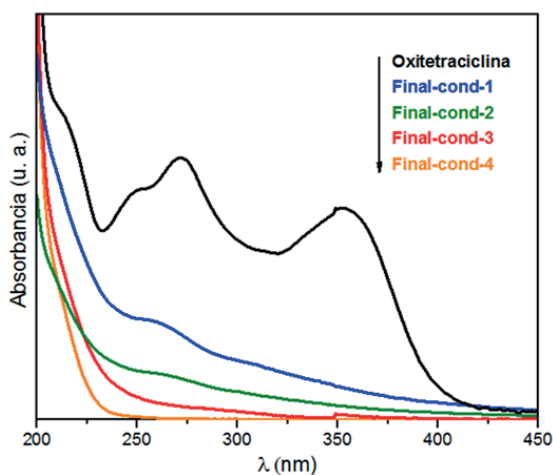


Figura 4. Espectros de absorción UV-Vis obtenidos para: la solución inicial conteniendo 20 ppm de oxitetraciclina (Oxitetraciclina), las soluciones finales después de un tratamiento fotoelectrocatalítico por 120 minutos, donde se modificaron las condiciones de la experimentación, como composición del electrolito (Final-cond-1 y Final-cond-2) y configuración de la iluminación (Final-cond-3 y Final-cond-4).

## Conclusiones

El gran volumen de aguas residuales que se genera diariamente en México, dificulta tratarla totalmente en las PTAR, quedando más de la mitad del agua residual sin tratamiento, la cual llega a cuerpos de agua con una alta carga de contaminantes, alterando los ecosistemas. Asimismo, aunque el agua sea tratada en una PTAR, existen compuestos orgánicos que no son removidos mediante los procesos convencionales que se emplean en estas plantas de tratamiento, permaneciendo en los efluentes que en ocasiones son utilizados para recargar cuerpos de agua, generando un riesgo para las especies vivas. Por lo tanto, es necesario tomar medidas para disminuir la cantidad de aguas residuales generadas, así como implementar que los efluentes con una carga alta de contaminantes, como los de industrias y hospitales, reciban un tratamiento previo antes de ser enviados al sistema de alcantarillado o descargados en cuerpos de agua. Además, es importante desarrollar tratamientos avanzados que sean capaces de degradar o eliminar los compuestos orgánicos que no pueden ser removidos mediante tratamientos secundarios como lodos activados. En el área académica de Catálisis del Departamento de Química de la UAM-Iztapalapa, trabajamos en el desarrollo de tratamientos avanzados, que permitan incrementar el porcentaje de degradación o eliminación de contaminantes recalcitrantes, que es el reto actual en el tratamiento de aguas residuales.

## Agradecimientos

Agradecemos a la SECTEI por el financiamiento otorgado al proyecto SECTEI/152/2023 “Desarrollo de sistemas de captación-tratamiento de aguas grises y pluviales en la UAM-I, como estrategia

para aminorar el estrés hídrico al oriente de la CDMX”.

La imagen de las etapas del tratamiento de aguas residuales, donde se utiliza el proceso de lodos activados, fue tomada de la página de X (antes twitter), de SACMEX-CDMX.

<https://x.com/SacmexCDMX/status/1443991603719331843>

La fotografía de la planta de tratamiento de Cerro de la Estrella fue tomada de la página de X (antes twitter), del Gobierno de la Ciudad de México.

<https://twitter.com/GobCDMX/status/1691553027042238781>

La fotografía del lago de Xochimilco fue captada por Vanessa Mateos Cortés, alumna de la licenciatura en Química de la UAM-Iztapalapa.

## Referencias

CONAGUA (2022). Estadísticas del agua en México 2021. CONAGUA: México.

Fouad, K., Bassyouni, M., Alalm, M.G., Saleh M.Y., Recent developments in recalcitrant organic pollutants degradation using immobilized photocatalysts, *Appl. Phys. A*, 127, pp. 612, 2021.

IMTA (2012). Filtración de aguas residuales con contaminantes recalcitrantes para remoción de macronutrientes. <https://www.gob.mx/imta/articulos/filtracion-de-aguas-residuales-con-contaminantes-recalcitrantes-para-remocion-de-macronutrientes>.

Kumar, J.A., Krithiga, T., Sathish, S., Renita, A.A., Prabu, D., Lokesh, S., Geetha, R., Namasivayam, S.K.R., Sillanpaa, M., Persistent organic pollutants in water resources: Fate, occurrence, characterization and risk analysis, *Sci. Total Environ.*, 831, pp. 154808, 2022.

Peña-Álvarez, A., Castillo-Alanís A., Identificación y cuantificación de contaminantes emergentes en aguas residuales por microextracción en fase sólida-cromatografía de gases-espectrometría de masas (MEFS-CG-EM), *TIP Rev. Esp. Cienc. Quím. Biol.*, 18[1], pp. 29-42, 2015.

Richmond, E.K., Grace, M.R., Kelly, J.J., Reisinger, A.J., Rosi, E.J., Walters, D.M., Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) are ecological disrupting compounds (EcoDC), *Elem. Sci. Anth.*, 5, pp. 66, 2017.

Robledo-Zacarías, V.H., Velázquez-Machuca, M.A., Montañez-Soto, J.L., Pimentel-Equihua, J.L., Vallejo-Cardona, A.A., López-Calvillo, M.D., Venegas-González, J., Hidroquímica y contaminantes emergentes en aguas residuales urbano industriales de Morelia, Michoacán, México, *Rev. Int. Contam. Ambie.*, 33[2], pp. 221-235, 2017.

Sosa-Hernández, J.E., Rodas-Zuluaga, L.I., López-Pacheco, I.Y., Melchor-Martínez, E.M., Aghalari, Z., Salas-Limón, D., Iqbal, H.M.N., Parra-Saldívar, R., Sources of antibiotics pollutants in the aquatic environment under SARS-CoV-2 pandemic situation, *Case Stud. Chem. Environ. Eng.*, 4, pp. 100127, 2021.