

## EXPERIENCIA EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES POR OXIDACIÓN AVANZADA

---

### *Espitia Cabrera Alfonso*

Universidad Autónoma Metropolitana,  
Departamento de Energía. Av. San Pablo No.  
180, Azcapotzalco, Ciudad de México, C.P.  
02200. México.

### *Gonzalez Cardoso Griselda*

Universidad Autónoma Metropolitana,  
Departamento de Energía. Av. San Pablo No.  
180, Azcapotzalco, Ciudad de México, C.P.  
02200. México.

### *Quintana Diaz Berenice*

Universidad Autónoma Metropolitana,  
Departamento de Energía. Av. San Pablo No.  
180, Azcapotzalco, Ciudad de México, C.P.  
02200. México.

### *Barrón Santos Francisco*

Escuela Nacional de Medicina y Homeopatía,  
IPN. Av. Guillermo Massieu Helguera 239, La  
Escalera , Gustavo A. Madero 07320 Ciudad  
de México CDMX

All content in this magazine is licensed under a Creative Commons Attribution License. Attribution-Non-Commercial-Non-Derivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0).



**Resumen:** En este trabajo se presentan los resultados del tratamiento de aguas residuales provenientes de las descargas de agua de la colonia La Mastranza de la ciudad de Morelia, Michoacan, evaluada por el laboratorio del Organismo Operador de Agua Potable Y Saneamiento, OOAPAS y de las descargas del Instituto Tecnológico Superior del Oriente del Estado de Hidalgo localizado en la Ciudad de Apan, Hidalgo, evaluado por el Laboratorio de Agua Residual de la Comisión de Agua y Alcantarillado de Sistemas Intermunicipales de Pachuca Hidalgo, CASSIM . Se utilizó en ambos casos una planta piloto de doble oxidación avanzada de 7 litros/minuto, que consiste en un tren con pretratamiento para triturar sólidos flotantes, seguida de un módulo de tratamiento primario con coagulación en línea y filtración rápida en dos etapas, la primera con arena y grava y la segunda con antracita que alimenta al módulo de tratamiento secundario con un tanque de contacto de ozono en una primera etapa seguido de un reactor fotocatalítico con una película fina de óxido de Zinc como fotocatalizador sobre una mallas de acero inoxidable US 100 como segunda etapa y finalmente con un tanque de carbon activado como tratamiento terciario o pulimento. Los resultados muestran que con esta tecnología se cumple con la normatividad existente y es una opción viable.

## INTRODUCCIÓN

Se presentan los resultados de una planta piloto de tratamiento de aguas residuales, PTAR por oxidación avanzada en dos etapas para tratar 7 lpm de aguas residuales, planta integrada por un tren de:

- 1) Pretratamiento por TRITURACIÓN DE SST presente en el agua cruda con una bomba trituradora en el tanque de recepción para eliminar sólidos flotantes.
- 2) TRATAMIENTO PRIMARIO con

COAGULACIÓN EN LÍNEA con alumina y filtración rápida en tres etapas: multimedia (grava y arena), antracita y cartucho de poliéster de los sólidos disueltos coloidales coagulados y los otros sólidos disueltos agregados al material coagulado.

3) Tratamiento secundario por oxidación avanzada en dos etapas, con ozono y fotocatalisis con óxido de zinc, del efluente del tratamiento primario, para obtener dióxido de carbono por reacciones de óxido-reducción con el oxidante  $\text{OH}^\circ$  y Nitrógeno gaseoso en reacciones de nitrificación y desnitrificación.

4) Tratamiento terciario de material refractario a la oxidación avanzada por filtración con carbón activado.

La fotocatalisis heterógena con nanopelículas cerámicas de óxido de zinc, genera in situ, el radical hidróxilo  $\text{OH}^\circ$  para la oxidación basada en el radical hidróxilo  $\text{OH}^\circ$ , que tiene el segundo potencial de oxidoreducción en la naturaleza después del fluor, (Siegrest et al, 2001), por lo que no es un consumible.

El siguiente diagrama muestra el concepto de la planta:

La planta piloto está montada en una plataforma de 2 m<sup>2</sup> y requiere una baja cantidad de energía para accionar la bomba trituradora que conduce el agua residual por todo el tren, resaltando que las mallas de acero inoxidable recubiertas por el fotocatalizador tienen una baja caída de presión.

El objetivo de la planta es una vez removidos los sólidos inorgánicos, oxidar los sólidos volátiles que representan la materia orgánica que comprende microorganismos patógenos y adicionalmente puede oxidar en reacciones instantáneas, contaminantes emergentes tales como, trazas de: medicamentos, cosméticos, hormonas, pesticidas y cualquier compuesto que pueda ser oxidable. (Shingai et al, 2016,

## DESARROLLO

### 1. Preparación del fotocatalizador

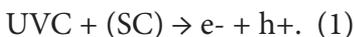
Para la construcción de la PTAR, se fabricó un material fotocatalítico en una celda electroquímica por electrodeposición de acetato de Zinc, como una película fina de hidróxido de zinc ( $ZnOH_2$ ) sobre una malla de acero inoxidable con un diámetro de poro de 149 micras y calcinando a  $550\text{ }^\circ\text{C}$  para obtener un material cerámico de óxido de zinc ( $ZnO$ ) con propiedades catalíticas.

La nanopelícula se puede cuantificar para obtener las moles depositadas a través de Isotermas de adsorción

La película se caracteriza por difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido, MEB.

### 2. Proceso de fotocatalisis

El semiconductor óxido de zinc, es IRRADIADO con energía ultravioleta con una longitud de onda de 254 nm que supera el ancho de banda prohibida de 3.5 eV. Esta energía al entrar en contacto con un electrón sobre la banda de valencia, lo excita y migra como electrón libre  $e^-$ , hacia la banda de conducción, dejando un hueco con carga positiva  $h^+$ , como se muestra en la reacción (1). (Domenech et al, 2012, Litter et al, 2005)

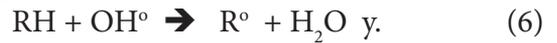


El electrón libre  $e^-$  y el hueco  $h^+$ , reaccionan en el medio acuoso, generando los oxidantes  $OH^\circ$ ,  $H_2O_2$  y el anión superóxido  $O_2^-$ , como se muestra en las siguientes reacciones. (Herrman et al, 2005)



El radical libre hidroxilo,  $OH^\circ$ , puede

oxidar a compuestos orgánicos RH de la siguiente manera:



La siguiente figura muestra el concepto de la fotocatalisis heterogénea

Los procesos de oxidación avanzada generan concentraciones de  $OH^\circ$  [ $OH^\circ$ ] entre  $10^{-11}$  a  $10^{-9}$  mol/l (Howes et al. 2012 ) y reaccionan con contaminantes orgánicos de acuerdo con las siguientes expresiones:



$$rR = -kR COH^\circ CR.$$

$rR$  = velocidad de eliminación de R con  $OH^\circ$  mol/l.s

$kR$  = Constante cinética de 2º orden de la destrucción de  $R^\circ$  con radicales  $OH^\circ$  mol/l (varia entre  $10^6$  a  $10^{10}$ )

$C[OH^\circ]$  = concentración de  $OH^\circ$  mol/l

$CR$  = concentración del compuesto orgánico a remover

La película se caracteriza por difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido, MEB.

### 3. Atributos de la oxidación avanzada

El radical libre hidroxilo no requiere consumibles ya que se GENERA IN SITU

- La reacción es instantánea
- Se obtiene una mineralización total del material carbonoso a  $CO_2$
- El material nitrogenado se libera como  $N_2$
- No produce RESIDUOS
- Diseño compacto con un área mínima de  $30\text{ m}^2/\text{LPS}$
- No existe generación de olores, ni de ruido (equipos cerrados herméticamente).
- Baja caída de presión por ser una malla
- Elimina contaminantes refractarios

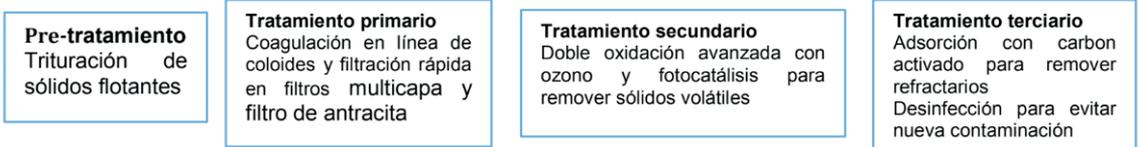


Fig. 1 Modelo conceptual del tratamiento (Espitia et al, 2021)

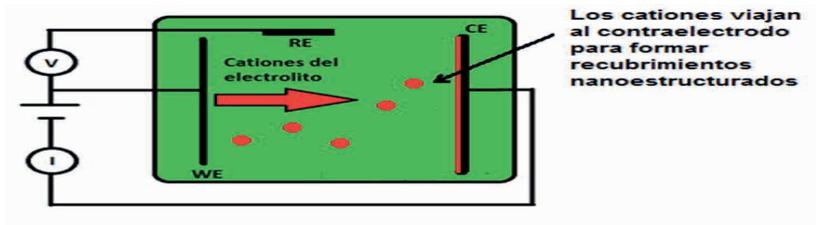


Fig 2. Potenciostato y electrodeposición

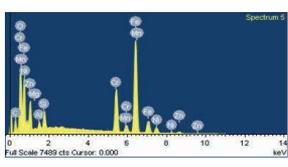


Fig 3 Espectro de energía dispersiva .

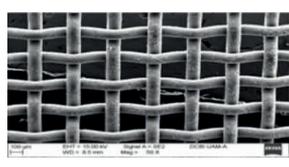


Fig 4. MEB 50X de la malla con ZnO.

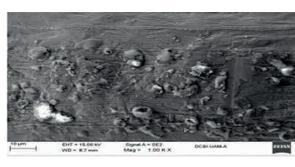


Fig 5. MEB 1.0 KX de la malla con ZnO

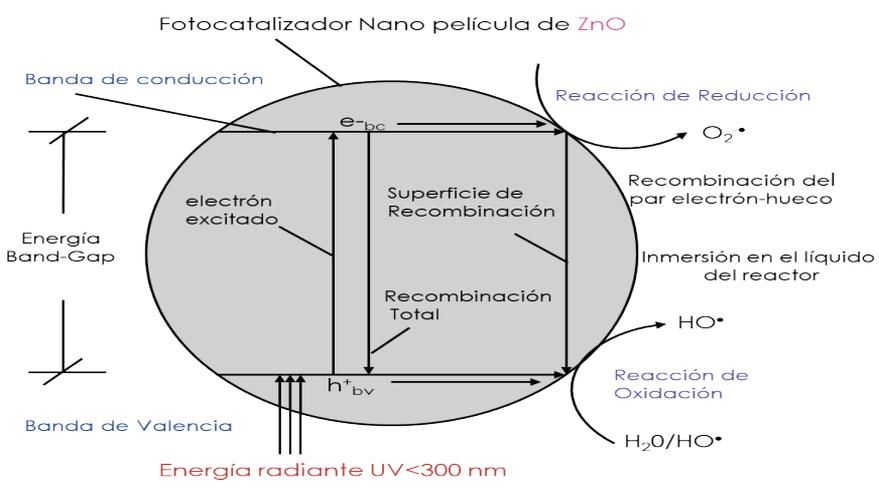


Fig 6. Proceso de fotocátalisis (Espitia et al, 2021)

como son los contaminantes emergentes que resisten otros métodos de tratamiento

- Trata contaminantes a muy baja concentración

## RESULTADOS

Los resultados de la descarga de aguas residuales de la colonia lomas de la Maestrans evaluados por el **laboratorio de ensayo** del departamento de calidad del agua del **Organismo Operador de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento (OOAPAS)** de la ciudad de Morelia, con registro ante la **ema ag-0781-084/16** de una muestra tomada por su personal el 8 de noviembre de 2019, se describen en la siguiente tabla:

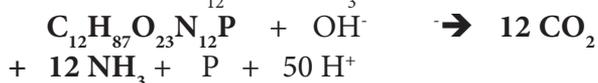
Los resultados de la descarga final del Instituto Tecnológico Superior del Estado de Hidalgo del día 21 de mayo de 2021, fueron evaluados por el Laboratorio de Agua Residual de la Comisión de Agua y Alcantarillado de Sistemas Intermunicipales ubicado en la Ciudad de Pachuca, Estado de Hidalgo,

Resaltando que el proceso completo ocurre en 10 minutos y que no requiere la planta ningún acondicionamiento previo y que puede trabajar en forma continua o en lotes.

Con relación a la DBO<sub>5</sub>, el LMP es 200 mg/l y toda vez que la DQO es mayor que la DBO<sub>5</sub> y que se registró un valor menor de 100, también se cumple con el parámetro de DBO<sub>5</sub>.

Adicionalmente, al considerar que la contaminación proviene de descargas domésticas y usando la formula que propone Metcalf & Eddy para la biomasa celular de  $C_{12}H_{87}O_{23}N_{12}P$  (Metcalf, & Eddy, 2003), la eficiencia que se reporta para la remoción del material carbonoso y nitrogenado, se explica con las siguientes reacciones:

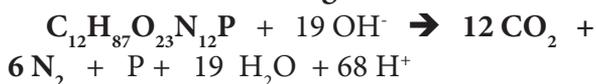
1. Reacción de oxidación de 12C a 12CO<sub>2</sub> y reducción de N<sub>12</sub> a 12 NH<sub>3</sub>



2. Oxidación de 12 NH<sub>3</sub> A 6 N<sub>2</sub>



3. O bien la **reacción global:**



Oxidando el material carbonoso y reduciendo el material nitrogenado simultáneamente.

Cabe mencionar que esta es una relación estequiométrica, pero que en el proceso se genera "in situ" el oxidante OH<sup>o</sup> en exceso, oxidante que tiene un potencial de oxido reducción de 2.8 mVolt, el segundo oxidante mayor en la naturaleza, solo menor al Flúor que tiene 3.01 mVolt. (Siegest et al, 2001)

Posteriormente, el hidrógeno libre con una cantidad equivalente de OH<sup>o</sup>, se consume y se produce agua, sin generar iones hidronio (H<sup>+</sup>) que puedan modificar el pH, tal como ocurre y se observa en la tabla de resultados, o bien:



Agua que se integra al medio acuoso.

## CONCLUSIONES

Esta tecnología puede cumplir con la nueva normatividad en México, NOM-001-Semarnat-2021, que reemplazo la DBO5 por la DQO para el control de las descargas de aguas residuales contaminadas.

Adicionalmente, el costo es significativamente menor que las plantas biológicas convencionales al no requerir consumibles en el tratamiento secundario, no consumir grandes cantidades de energía ya que no requiere aireación, no generar residuos biológicos y requerir poco espacio.

Adicionalmente, estos resultados confirman otros similares obtenidos en el tratamiento de las descargas de aguas residuales de una colonia en la Ciudad de Morelia, evaluados por el Laboratorio acreditado por ema, del Organismo Operador de Agua Potable. Alcantarillado y Saneamiento de Morelia OOAPAS (Espitia el al, 2021)

Parámetro	Unidad	Resultados		Eficiencia, %	*LMP'S DE LA NOM-001-SEMARNAT 1996
		Influyente	Efluente		
pH	Unidades pH	7.2	6.6	N/A	N/A
Conductividad Eléctrica	µS/cm	1064	1,361	-27.91	NO APLICA
Material Flotante	-	NA	N/A	N/A	NA
Temperatura	°C	24	25	N/A	NA
Coliformes fecales	NMP/100mL	64'228,351	2,400	99.996	2000
Grasas y aceites	mg/L	33.96	2.24	93.4	25
Sólidos Sedimentables	ml/L	0.3	<0.1	66.67	2
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	156	<9.64	93.82	200
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	561.08	<92.42	83.53	Na
Nitrógeno Kjeldhal Total	mg/L	53.9	0.16	99.7	60
Nitrógeno Orgánico	mg/L	1.94	N.D.	100	NA
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	51.96	0.16	99.69	NA
Fósforo Total	mg/L	11.2	0.87	92.23	30
Nitratos	mg/L	0.44	0.18	59.09	NA

\*los LMP se refieren a valores promedio diario de la NOM- 001, SEMARNAT, 1996

Tabla1. Resultados del análisis de las aguas residuales de la colonia Lomas de la Maestransá de la Ciudad de Morelia, Michoacan

Fuente: Laboratorio de Ensayo de OOAPAS, Morelia

Parámetro	Unidad	Resultados		Eficiencia, %	*LMP'S DE LA NOM-001-SEMARNAT 1996
		Influyente	Efluente		
pH	Unidades pH	7.18	7.	N/A	N/A
Conductividad Eléctrica	µS/cm	713.3	484.5	32.0	NA
Temperatura	°C	22.8	21.6	N/A	NA
Grasas y aceites	mg/L	61.16	21.08	64.35	<b>25</b>
Sólidos Sedimentables	mL/L	1.0	0.1	90.00	<b>2.0</b>
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	70	40.0	42.85	<b>200</b>
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	400.1	96.7	75.83	<b>NA</b>
Nitrógeno Kjeldhal Total	mg/L	55.8	4.3	92.29	<b>60</b>
Nitrógeno Orgánico	mg/L	1.98	0.00	100	NA
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	53.9	4.3	92.29	<b>NA</b>
Fosfatos totales	mg/L	2.437	1.992	21.13	<b>30</b>
Coliformes fecales	UFC/100 ml	512	128	75.00	<b>240</b>
Coliformes totales	UFC/100 ml	768	256	66.66	<b>NA</b>

Tabla2. Resultados del análisis de la dsecarga ds aguas residuales del Instituto Tecnológico

Fuente: laboratorio de agua residual CAASIM (Comisión de Agua y Alcantarillado de Sistemas Municipales de Hidalgo)

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Organismo Operador de Agua Potable, Alcanarillado y Saneamiento Instituto de Morelia, OOAPAS y al Tecnológico Superior de Oriente del Estado de Hidalgo por su apoyo para llevar a cabo estas pruebas en sus instalaciones y por su interés en apoyar nuevas tecnologías

## REFERENCIAS

Domenech, X, Jardim, W. F., and Litter, M. 2012. "Advanced Oxidation Processes for the Removal of Pollutants. <https://www.researchgate.net/publication/290852253/january> 2004.

Espitia A.C., Barrón J.S., Quintana B.D., Soto R.E., Herrera H.B., González G. C. (2021) Performance of a Demonstrative Double Advanced Oxidation Wastewater Treatment Plant to treat discharges from a small Community in Morelia, Michoacán, Mexico, *Journal of Environmental Science and Engineering B* 7, 2021

Herrman, J. M. 2005. "Heterogeneous Photocatalysis: State of the Art and Present Applications." *Topics in Catalysis*, 34. 91.

Howe k.J., Hand, D.W., Crittenden J.C., Rhodes R.T., Tchobanoglous G, (2012) MWH'S "Water Treatment: Principles and Design" 3a ed, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ

Litter, M. I. (2005). "Introduction to Photochemical Advanced Oxidation Processes for Water Treatment Advanced Oxidation Processes for Water Treatment. *The Handbook of Environmental Chemistry*, Vol 2, Part M, pp. 325-366, Springer-Verlag, Berlin.

Metcalf, & Eddy "Wastewater Engineering Treatment and Reuse" Mc Graw-Hill, USA 2003, página 565),

Siegrest, R. K. L., et al. (2001). *In situ Chemical Oxidation Using Permanganate*. Batelle Press, USA pp7

Shingai, N., and Perez-Garcia. (2016). *Degrading Organic Micropollutants: The Next challenges in the Evolution of Biological Wastewater Treatment*

*Processes Front. Environ .Sci* <http://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00036>

Wols, B. A., and Hoffman, C. H. M. (2012). *Review of Photochemical Reaction Constants of Organic Micropollutants Required for UV Advanced Oxidation Processes in Water*. *Water Research* Volume 16: 2815-2827