

# Impluvium

Publicación digital de la Red del Agua UNAM  
Edición Especial, Octubre 2020



## Diáspora Hídrica

Jóvenes Mexicanos  
Explorando las Fronteras del  
Conocimiento del Agua

## BIENVENIDA

Es posible afirmar que el mundo académico del 2050 será completamente diferente al de hoy; más aún, será virtualmente irreconocible respecto a aquel que existió hace treinta años. Las instituciones académicas exitosas requerirán la generación de una amplia base de capacidades y líderes altamente calificados que posean habilidades combinadas que resulten de un conocimiento científico multidisciplinario, con uso de la tecnología, la ingeniería y las matemáticas.

Dado que el agua es un elemento clave para el desarrollo social y económico de los países, esta evolución nos obliga a llevar a cabo una transformación de la manera en que enfrentamos y resolvemos los problemas hídricos. Por otro lado, las nuevas generaciones de científicos e ingenieros constituyen el

elemento central de la revolución que se observa en el conocimiento al incorporar tecnologías de la información que han modificado por completo la manera en la que vivimos. De esta manera, evolucionamos con el mundo, transformando nuestro quehacer hacia formas de pensamiento cada vez más interdisciplinarias.

Por esta razón, es necesario construir las vías que favorezcan la evolución de nuestros especialistas hacia un grupo aún más activo, moderno, abierto y vibrante. Necesitamos científicos e ingenieros dedicados al agua que no solo desarrollen el mejor conocimiento disponible en el mundo, sino que tengan la capacidad para llevarlo de forma inmediata al corazón de las decisiones del gobierno para favorecer el desarrollo del país. Requerimos de un ecosis-



tema de cooperación entre generaciones, campos de conocimiento e instituciones. Esto nos permitirá avanzar en la construcción de un México que permita el florecimiento del conocimiento y las ideas. Los jóvenes, el conocimiento y la innovación representan las rutas críticas para revivir el crecimiento sustentable de México y cerrar la brecha social y tecnológica que ya existe.

Este fue el razonamiento que llevó a la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales de México, a través del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y de la mano del Instituto de Ingeniería y la Red del Agua UNAM, a organizar el 1er seminario virtual “Diáspora Hídrica: Jóvenes mexicanos explorando las fronteras del conocimiento del agua”. El evento, celebrado del 3 al 7 de agosto de 2020 en un ambiente relajado y en acompañamiento de académicos de diversas instituciones nacionales dedicadas al agua, nos dio la oportunidad de identificar las capacidades de la nueva generación de profesionistas que trabajan en la academia y la industria para dar solución a los problemas hídricos de nuestro tiempo. El objetivo fue generar

un ecosistema de cooperación intergeneracional e interinstitucional.

Desde la perspectiva del IMTA, el futuro del agua en México, basado en los principios de la ética, la evidencia científica para sustentar la toma de decisiones y la transparencia en el manejo de la información hídrica, estará construido forzosamente sobre este diálogo intergeneracional. Las fortalezas de los académicos de mayor experiencia, en conjunto con jóvenes investigadores altamente calificados, harán de México un país vibrante para la generación de conocimiento de punta. Este evento nos permitió iniciar esta tarea.

Las crisis económica y sanitaria globales que atravesamos en este 2020 en el contexto de la pandemia de COVID19, aunadas a las condiciones de cambio y competencia que se han puesto de manifiesto, demandan más que nunca de la investigación e innovación para mejorar las condiciones ambientales, económicas, sociales y culturales del planeta. La escala y complejidad de los retos de este siglo requieren de un cambio de paradigma en la manera en la que promovemos el desarrollo y conducimos

la economía, para enfocarlos hacia la búsqueda del bienestar con equidad y sustentabilidad.

Hoy más que nunca se requiere de la agilidad e ímpetu de las nuevas generaciones, y es tarea de todos conducir la transformación de México a través del uso sostenible del agua, con énfasis en el cierre de brechas de desigualdad, el desarrollo económico de todos y la conservación y recuperación del medio ambiente. 💧

**DR. ADRIÁN PEDROZO ACUÑA**

DIRECTOR GENERAL DEL INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

## PRESENTACIÓN

México y el mundo experimentan retos complejos y de diversa índole para alcanzar la seguridad hídrica. A pesar de los importantes avances alcanzados por gobiernos, instituciones internacionales, empresas y organizaciones sociales, millones de personas continúan sin acceso a servicios básicos de agua potable y saneamiento o se encuentran en condiciones de riesgo provocado por la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos extremos. Además, los ecosistemas asociados al agua se degradan a escalas que ponen en peligro la sustentabilidad del planeta.

Para hacer frente a estos desafíos, se requiere del trabajo colaborativo entre todos los sectores y del diálogo permanente entre las disciplinas del conocimiento bajo un espíritu de innovación. Desde su nacimiento en 2010, la Red del Agua UNAM se

ha convertido en una plataforma para impulsar la docencia, la investigación y la difusión de la cultura sobre los recursos hídricos. Para alcanzar estos objetivos, hemos realizado alianzas estratégicas con los actores más relevantes a nivel nacional e internacional. Sin lugar a dudas, la colaboración con el Instituto de Ingeniería UNAM y el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua nos ha permitido avanzar hacia un entorno con mayor seguridad hídrica.

Los avances alcanzados por la Red del Agua UNAM son producto de sus miembros, principalmente de los jóvenes, pues son ellos quienes impulsan con mayor fuerza las innovaciones científicas, tecnológicas y sociales en la materia. Los jóvenes están en contacto con el conocimiento de vanguardia, se atreven a desafiar sus límites y experimentan



con la ciencia de frontera. Sin embargo, es necesario fomentar su crecimiento, no solo a través de capacitaciones, sino mediante el reconocimiento de su papel como agentes de cambio.

El Primer Seminario Virtual “Diáspora Hídrica: jóvenes mexicanos explorando las fronteras del conocimiento del agua” se inscribe entre los múltiples proyectos que ha creado la Red para apoyar el talento de los jóvenes mexicanos. Creamos, junto con Fundación UNAM, el Premio a la mejor tesis en recursos hídricos a nivel licenciatura y posgrado y estamos ahora en la segunda edición; nos hemos propuesto como política incorporar a jóvenes como ponentes en nuestros eventos académicos; y hemos ofrecido un gran número de actividades académicas para su capacitación.

En los más de 10 números de nuestra publicación digital de divulgación científica Impluvium, hemos difundido ampliamente las investigaciones de los jóvenes atendiendo en todo momento altos criterios de calidad. Por tanto, es con gran entusiasmo que decidimos dedicar un número especial

a los trabajos de los participantes de este Primer Seminario Virtual.

Estamos seguro que la información discutida por los jóvenes autores en los artículos contenidos en este número especial marcará la agenda de investigación hídrica en el mediano y largo plazos. 💧

**DR. FERNANDO J. GONZÁLEZ VILLARREAL,**  
COORDINADOR TÉCNICO, RED DEL AGUA UNAM.

**M. EN C. JORGE ALBERTO ARRIAGA MEDINA,**  
COORDINADOR EJECUTIVO, RED DEL AGUA UNAM.

Todas las opiniones vertidas en los trabajos aquí publicados son de responsabilidad exclusiva de los autores y no necesariamente reflejan ni comprometen las opiniones del Comité Editorial de Impluvium o, por extensión, de las instituciones participantes en la edición de este número especial.

Se autoriza la reproducción total o parcial de los textos aquí publicados, siempre y cuando se cite la fuente completa y la dirección electrónica de la publicación.



# Impluvium

**Impluvium** es una publicación de la Red del Agua UNAM; puede ser reproducida con fines no lucrativos, siempre y cuando no se mutile, se cite la fuente completa y su dirección electrónica. Los artículos compartidos son responsabilidad exclusiva de los autores y no reflejan necesariamente la opinión de la Red del Agua UNAM o de sus miembros.

.....

Comité editorial:

**Dr. Fernando J. González Villarreal**

Coordinador Técnico Red del Agua UNAM

**M. en C. Jorge Alberto Arriaga Medina**

Coordinador Ejecutivo de la Red del Agua UNAM

**Mtra. Ana Gabriela Piedra Miranda**

Encargada de comunicación organizacional  
Red del Agua UNAM

**Mtra. Malinali Domínguez Mares**

Coordinadora de Asesores de la  
Dirección General del IMTA

Editores invitados:

**Mtro. Marco Antonio Sánchez Izquierdo**

Encargado de la Coordinación de Comunicación,  
Participación e Información del IMTA

Diseño gráfico y formación:

**Lic. Joel Santamaría García**

**Lic. Marie Claire Mendoza Muciño**

Publicación digital de la Red del Agua UNAM.  
Edición Especial, Diáspora Hídrica.  
Octubre 2020.

[www.agua.unam.mx/impluvium.html](http://www.agua.unam.mx/impluvium.html)

.....

**Impluvium** es la publicación digital de divulgación de la Red del Agua UNAM, Año 6, Edición Especial, Octubre 2020. Es una publicación trimestral editada por la Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México, a través de la Red del Agua de la UNAM, Circuito Escolar, Ciudad Universitaria, Instituto de Ingeniería, edificio 5, Col. Copilco, Del. Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México, Tel. (55)56233600 ext.8745, <http://www.agua.unam.mx/impluvium.html>, [jarriagam@iingen.unam.mx](mailto:jarriagam@iingen.unam.mx). Editor responsable: Dr. Fernando J. González Villarreal. Reserva de Derechos al uso Exclusivo: en trámite., ISSN: en trámite, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Red del Agua UNAM, Dr. Fernando J. González Villarreal, Circuito Escolar, Ciudad Universitaria, Instituto de Ingeniería, edificio 5, Col. Copilco, Del. Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México fecha de la última modificación, octubre 2020.

## CONTENIDO

**Bienvenida . . . . . 2**

ADRIÁN PEDROZO ACUÑA

**Presentación . . . . . 5**

FERNANDO J. GONZÁLEZ VILLARREAL,  
JORGE ALBERTO ARRIAGA MEDINA.

## CIENCIAS FÍSICO-MATEMÁTICAS Y DE LAS INGENIERÍAS

**Evaluación de los factores que  
intervienen en la oxidación electroquímica  
del ácido mefenámico, fluoxetina  
y metoprolol . . . . . 12**

ITARI GABRIELA RODRÍGUEZ SANTOS,  
PETIA MIJAYLOVA NACHEVA.

**Tratamiento de lodos secundarios de  
una planta de tratamiento de aguas  
residuales usando celdas de combustible  
microbianas con biocátodos . . . . . 20**

DANILO GAMBOA SANTANA, PETIA MIJAYLOVA NACHEVA,  
EDSON B. ESTRADA ARRIAGA, JENNIFER A. BAÑUELOS DIAZ.

**Remoción de contaminantes emergentes  
en un reactor con biomasa inmovilizada  
y membrana integrada  
en su zona superior. . . . . 28**

GUTIERREZ-MACIAS TANIA, MIJAYLOVA NACHEVA PETIA.

**Variación altitudinal de la interceptación  
de lluvia y niebla en un bosque del  
centro de Veracruz, México . . . . . 34**

TERESA MARGARITA GONZÁLEZ-MARTÍNEZ, FRISO HOLWERDA.



**Boletines meteorológicos sintéticos para municipios de México . . . . . 40**

ROBERTO RAMÍREZ VILLA, JULIO SERGIO SANTANA SEPÚLVEDA,  
RENÉ LOBATO SÁNCHEZ, OSCAR PITA DÍAZ.

**Remoción de nitrógeno amoniacal mediante oxidación electroquímica . . . . . 48**

JOSE LUIS ESQUIVEL MATU, PETIA MIJAYLOVA NACHEVA,  
PÉREZ CASTREJÓN SARA.

**Peligro de inundación costera por eventos de tormenta. Caso de estudio: Bahía de Todos Santos, BC., México. . . . . 57**

VIOLETA ZETZANGARI FERNÁNDEZ DÍAZ.

**Calentamiento de agua para uso sanitario utilizando una planta de concentradores cilindro-parabólico . . . . . 65**

YURIDIANA ROCIO GALINDO LUNA, ROBERTO BEST Y BROWN,  
VÍCTOR HUGO GÓMEZ, JORGE DÍAZ SALGADO,  
ROSENBERG J. ROMERO.

**Destilación por membrana para concentrar soluciones salinas utilizadas en sistemas de enfriamiento por absorción . . . . . 73**

JONATHAN IBARRA BAHENA, ULISES DEHESA CARRASCO,  
EDUARDO VENEGAS REYES, WILFRIDO RIVERA GÓMEZ FRANCO.

**CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD**

**De las cuencas a los paisajes. Estimación del impacto potencial de la contaminación difusa por métodos simplificados en el área de protección de flora y fauna, Pico de Tancítaro, Michoacán, México. . . . . 81**

ALBERTO ORTIZ RIVERA.

**Exposición a fluoruro y arsénico en agua: Función cognitiva en estudiantes de primaria de comunidades marginadas de México. . . . . 88**

FRANCISCO ANTONIO RAMÍREZ ROJAS.

## CIENCIAS SOCIALES

Aproximaciones para caracterizar  
el ciclo hidrosocial del agua urbana  
desde la Economía Ecológica. . . . . 95

GRISELDA MARTÍNEZ ROMERO, SALVADOR PENICHE CAMPS.

La cervecera transnacional  
*Constellation Brands* y la política pública  
creada desde el poder estatal  
para instalarla en Mexicali . . . . . 102

MILTHON MINOR MONTES.

Enfoque transdisciplinar para entender  
la vulnerabilidad sociohídrica en la  
Ciudad de México . . . . . 112

MARÍA GUADALUPE DÍAZ SANTOS.

# EVALUACIÓN DE LOS FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA OXIDACIÓN ELECTROQUÍMICA DEL ÁCIDO MEFENÁMICO, FLUOXETINA Y METOPROLOL

**ITARI GABRIELA RODRÍGUEZ SANTOS**

UNAM, PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA CAMPUS IMTA.

**PETIA MIJAYLOVA NACHEVA**

INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA (IMTA),

COORDINACIÓN DE TRATAMIENTO Y CALIDAD DEL AGUA.



## Resumen

Se estudió la remoción de los compuestos farmacéuticos ácido mefenámico, fluoxetina y metoprolol presentes en agua mediante un proceso de oxidación electroquímica aplicando diferentes condiciones de operación. Se evaluaron los efectos de seis variables mediante un diseño factorial fraccionado y las mejores condiciones de operación se determinaron por un diseño central compuesto. Las concentraciones de los fármacos se determinaron mediante CG-MS/MS. Los resultados fueron analizados utilizando un software estadístico. Todos los parámetros resultaron estadísticamente significativos para

la oxidación del ácido mefenámico. Para la fluoxetina y el metoprolol, todos los factores principales resultaron significativos, excepto el pH. Las mejores condiciones de operación para la oxidación simultánea de los compuestos fueron: 122 minutos de reacción, 2 A, pH 4.5, inyección de oxígeno de 5 L/min, NaCl como electrolito y Nb/DDB como ánodo, condiciones en las cuales se obtuvieron remociones del 99.99% para el ácido mefenámico y metoprolol y del 100% para la fluoxetina.

## Introducción

Los compuestos emergentes (CE) son contaminantes de diverso origen y composición química utilizados en la vida diaria, cuya presencia en el ambiente ha sido poco estudiada (Barceló y López, 2007, p. 2). Dependiendo de sus características fisicoquímicas, pueden provocar alteraciones endocrinas, toxicidad en organismos acuáticos, actuar como precursores de cáncer, presentar bioacumulación, persistencia en el entorno y transportarse a grandes distancias. Algunas fuentes de CE en el ambiente son las aguas residuales domésticas e industriales, efluentes hospitalarios y actividades agroindustriales y ganaderas.

Los CE no se degradan completamente mediante tratamientos convencionales de aguas residuales. Por ello, en los últimos años se ha incursionado en la investigación y utilización de Procesos de Oxidación Avanzada (POA), los cuales tienen como finalidad oxidar los contaminantes y transformarlos en moléculas más simples, relativamente inofensivas y más susceptibles a su biodegradación. El radical hidroxilo es la especie

oxidante más efectiva en los POA debido a que es capaz de producir cambios profundos en la estructura química de los compuestos y, a diferencia del flúor, sus productos de oxidación son menos tóxicos (Ray *et al*, 2016, p. 464). Bajo este contexto, esta investigación tuvo como finalidad evaluar la remoción de tres compuestos farmacéuticos mediante el proceso de oxidación electroquímica aplicando diferentes condiciones de operación.

## Desarrollo

El sistema experimental estuvo conformado por un reactor de acrílico de 2 L, una fuente de poder Sorensen modelo DLM 40-15, una bomba peristáltica recirculando el agua para asegurar condiciones de mezcla completa y un generador de oxígeno con una pureza >90%. Como ánodos se utilizaron un electrodo no activo a base de diamante dopado con boro sobre niobio (Nb/DDB) y uno dimensionalmente estable de dióxido de estaño sobre titanio (Ti/SnO<sub>2</sub>). Como cátodo se usó una malla de acero inoxidable. Los ánodos tenían un área activa de 100 cm<sup>2</sup> y el cátodo de 93 cm<sup>2</sup>. Como electrolito

soporte se utilizaron cloruro de sodio (NaCl) y sulfato de sodio (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

Durante la primera etapa experimental se aplicó un diseño factorial fraccionado (DFF 2<sup>6-1</sup>) para evaluar seis factores que se variaron en dos niveles (*Véase Tabla 1*) y de sus interacciones. Esta etapa se realizó con una mezcla de los compuestos farmacéuticos ácido mefenámico (AM), fluoxetina (FLX) y metoprolol (MTP) disueltos en agua en concentraciones de 2 mg/L de cada uno. Posteriormente, se realizó la determinación de las mejores condiciones de operación mediante un diseño central compuesto (DCC 2<sup>5</sup>), utilizando Nb/DDB como ánodo y NaCl como electrolito y considerando como variables el tiempo de reacción, intensidad de corriente, pH e inyección de oxígeno. En esta etapa experimental se utilizaron concentraciones de 0.5 mg/L de los tres compuestos. Los parámetros de respuesta en todos los casos fueron las concentraciones de los compuestos farmacéuticos que se determinaron mediante CG-MS/MS y sus remociones. Los

resultados fueron analizados utilizando el software *Statgraphics Centurion*.

Tabla 1. Variables estudiadas en el DFF.

Variable	Valores	
	-1	+1
Tiempo, min	60	120
Intensidad de corriente, A	2	5
pH	4	8
Inyección de oxígeno, L/min	0	3
Tipo de electrodo	Ti/SnO <sub>2</sub>	Nb/DDB
Tipo de electrolito	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	NaCl

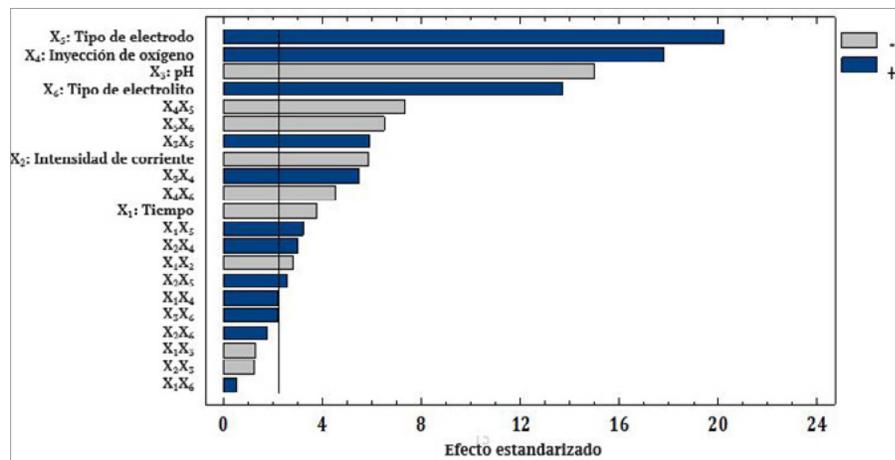
## Resultados

En la degradación del AM todas las variables resultaron estadísticamente significativas. El tipo de electrodo fue la variable más significativa y los mejores resultados se obtuvieron con el electrodo Nb/DDB, lográndose con éste remociones arriba del 99.97%. Por su efecto, siguió la variable inyección de oxígeno, lo cual se atribuye a los OH<sup>-</sup> electrogenerados que, a su vez, forman una variedad de otros oxidantes en la superficie del ánodo (O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). La tercera variable más significativa fue el pH, lo cual

está relacionado con una alta capacidad de disociación de la molécula, ya que el pKa del AM es de 4.12-5.12. Las interacciones se presentan en la *Figura 1*. Las que presentaron mayor significancia fueron: la inyección de oxígeno – electrodo, electrodo – electrolito y pH – electrodo. Esto puede ser explicado por el efecto sinérgico entre los radicales hidroxilos adsorbidos en el electrodo de DDB y el cloro activo electrogenerado a partir del NaCl. La concentración máxima alcanzada del AM fue de 1.60 µg/L (remoción del 99.92%) y la mínima de 0.01 µg/L (remoción del 100.00%).

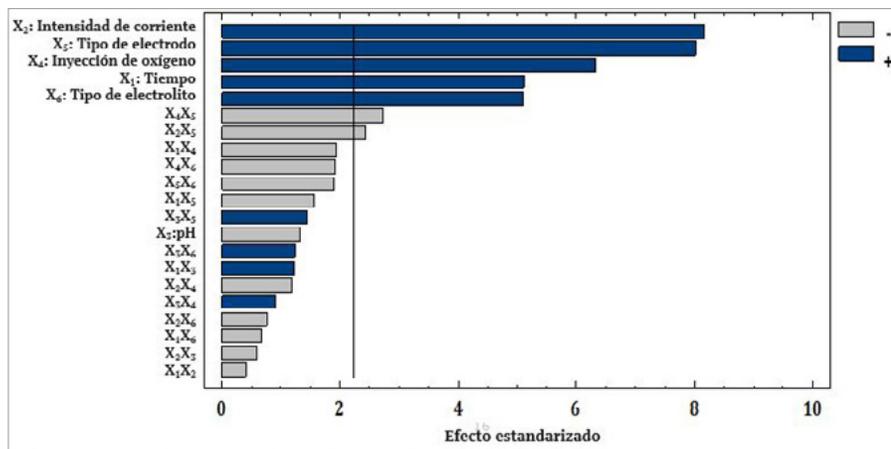
La variable más significativa en el proceso de electrooxidación de la FLX fue la intensidad de corriente en su nivel alto (5

Figura 1. Diagrama de Pareto estandarizado para el ácido mefenámico.



A). Al comparar los resultados obtenidos con los resultados de otras investigaciones similares (Wang *et al*, 2018, p. 668; Klančar *et al*, 2016, p.193; Salazar *et al*, 2017, p.31), se aprecia que con el uso de NaCl como electrolito soporte disminuye la densidad de corriente requerida y el tiempo de electrólisis, lo cual se debe al cloro activo electrogenerado. Lo anterior es importante, ya que la eficiencia de mineralización no es proporcional a la corriente aplicada debido a la ocurrencia de reacciones parásitas de evolución de oxígeno que minimizan la capacidad de oxidación y conducen al desperdicio de energía. El material del

Figura 2. Diagrama de Pareto estandarizado para la fluoxetina.



electrodo fue otro de los factores estadísticamente significativos, siendo el Nb/DDB el mejor ánodo. El pH fue la única variable que no resultó significativa, lo cual se explica con el alto pKa de la FLX (10.06±0.10). Sin embargo, a un pH alto se favoreció su remoción, lo cual puede deberse a la alta concentración de •OH producida en la superficie del ánodo en presencia de abundantes OH<sup>-</sup>. Wang *et al* (2018, p. 668) han señalado que más del 50% de las moléculas de FLX se encuentran en forma neutra a un pH alcalino, lo que lleva a conjeturar que la menor carga en las moléculas en estas condiciones reduce la repulsión eléctrica

intramolecular y aumenta el coeficiente de transferencia de masa.

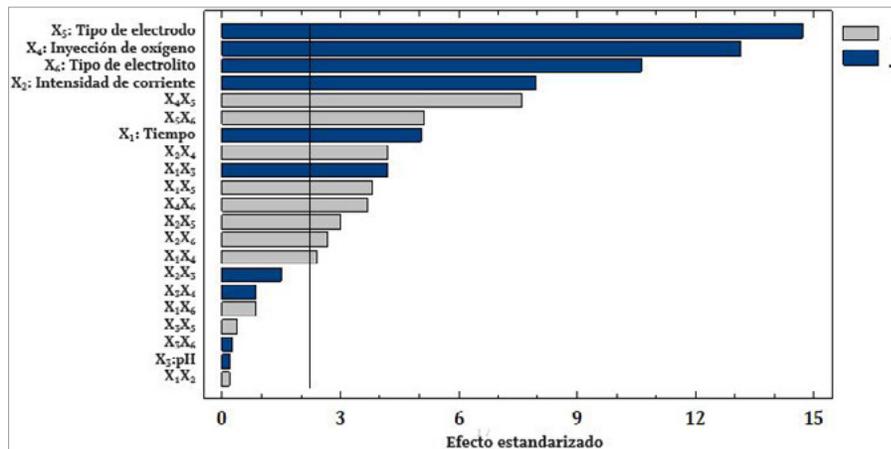
El efecto de las interacciones entre las variables se presenta en la *Figura 2*. Las principales interacciones fueron entre la inyección de oxígeno – electrodo e intensidad de corriente – electrodo. Lo anterior se atribuye a la producción de especies reactivas de oxígeno que dependen de la concentración de oxígeno presente y de la cantidad de electrones que interactúan con él. La concentración máxima alcanzada de FLX fue de 1.43 µg/L (remoción del 99.93%) y la mínima de 0.01 µg/L (remoción del 100.00%).

Para la oxidación del MTP, la variable más significativa fue el material del ánodo, siendo

el Nb/DDB el mejor, seguido de la adición de oxígeno, la intensidad de corriente y el tiempo de electrólisis, todas en sus niveles altos. El pH inicial de la solución no presentó un efecto significativo, lo cual está relacionado al alto pKa del MTP (9.7). Las principales interacciones fueron entre la inyección de oxígeno – electrodo y electrodo – electrolito (Véase Figura 3). La concentración máxima alcanzada de MTP fue de 1.72 µg/L (remoción del 99.91%) y la mínima de 0.00 µg/L (remoción del 100.00%).

La realización de los 32 experimentos del diseño experimental DCC 2<sup>5</sup>, integrados por 16 corridas factoriales, 8 axiales y 8 centrales, indicó que las cuatro

Figura 3. Diagrama de Pareto estandarizado para el metoprolol.



variables son estadísticamente significativas para los tres compuestos en estudio. Las mejores condiciones de operación obtenidas para la oxidación simultánea de los compuestos fueron: 122 minutos de reacción, 2 A, pH de 4.5, inyección de oxígeno de 5 L/min, NaCl como electrolito soporte y Nb/DDB como ánodo, condiciones en las cuales se obtuvieron remociones del 99.99% para el AM y MTP y del 100% para la FLX.

## Conclusiones

La oxidación electroquímica con electrodos de alto potencial de oxidación permite lograr remociones del 99.99% para el AM y MTP y del 100% para la FLX, aplicando las mejores condiciones de operación, que fueron: 122 minutos de reacción, 2 A, pH de 4.5, 5 L/min de oxígeno, Nb/DDB como ánodo y NaCl como electrolito. Para la oxidación del AM, el tipo de electrodo, la adición de oxígeno, y el pH fueron las variables principales significativas y las interacciones entre la inyección de oxígeno – electrodo y electrodo – electrolito. En la oxidación de la FLX, el pH fue la única variable principal que no resultó significativa. Las interacciones significativas fueron entre la inyección de oxígeno – electrodo e intensidad de corriente – electrodo. Para la oxidación del MTP, la variable más significativa fue el material del electrodo, seguido de la adición de oxígeno y las interacciones entre la inyección de oxígeno – electrodo y electrodo – electrolito.

## Bibliografía

- Barceló Damiá, L., y López de Alda, J. (2007). *Contaminación y calidad química del agua: el problema de los contaminantes emergentes*. Barcelona: Instituto de Investigaciones Químicas y Ambientales CSIC.
- Klančar, A., Trontelj, J., Kristl, A., Meglic, A., Rozina, T., Zupancic Justin, M., y Roskar, R. (2016). An advanced oxidation process for wastewater treatment to reduce the ecological burden from pharmacotherapy and the agricultural use of pesticides. *Ecological Engineering*, p. 186-195.
- Ray, M. B., Chen, J. P., Wang, K. L., y Olavi Pehkonen, S. (2006). Advanced Oxidation Processes. En L. K. Wang, Y.-T. Hung, & N. K. Shammam, *Advanced Physicochemical Treatment Processes* (p. 463-479). Estados Unidos de América: Humana Press.
- Salazar, C., Ridruejo, C., Brillas, E., Yáñez, J., Mansilla, H. D., y Sirés, I. (2016). Abatement of the fluorinated antidepressant fluoxetine (Prozac) and its reaction by-products by electrochemical advanced methods. *Applied Catalysis B: Environmental*, 1-39.

Wang, C., Niu, J., Yin, L., Huang, J., y Hou, L.-A. (2018). Electrochemical degradation of fluoxetine on nanotube array intercalated anode with enhanced electronic transport and hydroxyl radical production. *Chemical Engineering Journal*, 662-671.

# TRATAMIENTO DE LODOS SECUNDARIOS DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES USANDO CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS CON BIOCÁTODOS



DANILO GAMBOA SANTANA, PETIA MIJAYLOVA NACHEVA,  
EDSON B. ESTRADA ARRIAGA, JENNIFER A. BAÑUELOS DIAZ.  
INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA (IMTA),  
COORDINACIÓN DE TRATAMIENTO Y CALIDAD DEL AGUA.

## RESÚMEN

La necesidad de encontrar una alternativa sostenible para el tratamiento de los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales, que permita estabilizarlos biológicamente y simultáneamente generar energía de manera directa, sin pasar por la producción de biogás, ha traído a la luz la opción de aplicar celdas de combustible microbiana con biocátodos (CCMb). En el presente estudio se evaluó el desempeño de las CCMb para el tratamiento de lodos secundarios como sustrato anódico, analizando la remoción de materia orgánica, destrucción de sólidos volátiles y la generación de

energía eléctrica en diferentes condiciones de operación y aplicando dos tipos de cámaras catódicas. Los resultados indicaron que se pueden lograr remociones de materia orgánica medida como  $DQO_t$  hasta 87% y densidades de potencia de hasta  $0.92 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$ , demostrando que las CCMb son una alternativa fiable para generar energía eléctrica durante el proceso de estabilización de los lodos secundarios.

## INTRODUCCIÓN

El tratamiento de las aguas residuales incluye al menos dos fases: la remoción de material grueso,

arena y sólidos suspendidos; y la remoción de materia orgánica mediante procesos biológicos seguido por una desinfección. El proceso biológico más ampliamente utilizado en México es el de lodos activados (CONAGUA, 2017), que en su modalidad convencional tiene la desventaja de generar grandes cantidades de lodos secundarios con alto contenido de materia orgánica, tornando su tratamiento difícil y costoso. Lo anterior representa hasta 60 % de los costos totales de operación de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) (Yu *et al.*, 2018, p. 495).

Por otro lado, para que los distintos equipos de una PTAR puedan funcionar se requiere de energía eléctrica. Se sabe que el consumo de esta energía en los sistemas de lodos activados convencional está en el rango de 0.10-1.18 kWh·m<sup>-3</sup> (Metcalf & Eddy, 2014, p.1812). Parte de esta energía se puede obtener de la materia orgánica que contienen los lodos residuales y el método más ampliamente usado es la degradación anaerobia de los lodos para la obtención de biogás y su conversión en energía eléctrica.

Desarrollar tecnologías alternativas que simultáneamente degradan los contaminantes orgánicos y generen energía de manera directa, como las celdas de combustible microbianas, ha sido uno de los principales ejes de investigación en los últimos años (Slate *et al.*, 2019, p. 60). Dicha tecnología pertenece al campo de estudio de los sistemas bio-electroquímicos y se enfoca a la conversión de la energía almacenada en los enlaces químicos de los compuestos orgánicos en energía eléctrica mediante reacciones catalizadas por microorganismos electrogénicos desarrollados sobre los ánodos en condiciones anaerobias (Du *et al.*, 2007, p. 464). Una modalidad específica de esta tecnología son las celdas de combustible microbiana con biocátodos (CCMb). En esta se utilizan microorganismos como biocatalizadores de las reacciones de reducción en las zonas catódicas, evitando el uso de catalizadores químicos costosos y muchas veces tóxicos. Sin embargo, los trabajos relacionados con el uso de lodos secundarios como sustratos de CCMb son aún muy escasos, por lo cual el objetivo de este estudio fue evaluar el

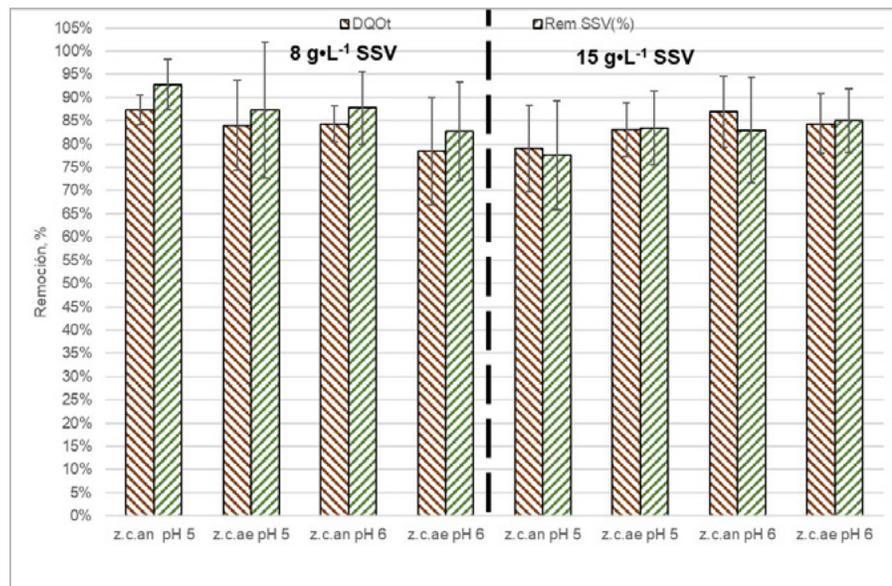
desempeño de CCMb para el tratamiento de lodos secundarios como sustrato anódico, analizando la remoción de materia orgánica, la destrucción de sólidos volátiles y la generación de energía eléctrica a diferentes condiciones de operación y aplicando dos tipos de cámara catódica, aerobia y anaerobia.

## DESARROLLO

Se elaboraron 8 CCMb de acrílico con forma cilíndrica, 12 cm de diámetro y 13 cm de altura, cada una dividida en dos compartimentos mediante una membrana de intercambio protónico Nafion® con un área transversal de 156 cm<sup>2</sup>. Como electrodos se utilizaron cepillos de fibra de carbono Millrose® con alambre de titanio enroscado, con 5.1 cm de diámetro y 7.6 cm de largo, teniendo un área superficial proyectada de 1.46 m<sup>2</sup>. El pretratamiento de los electrodos y de la MIP están disponibles en Feng *et al.* (2010, p.1841) y en Huarachi *et al.* (2018, p. 34). Las condiciones de operación fueron determinadas por el pH y la concentración inicial de SSV de los lodos secundarios usados como sustrato dentro del compartimento anódico. Estos parámetros

se variaron en dos niveles, 5 y 6 para el pH, 8 y 15 g·L<sup>-1</sup> para los sólidos suspendidos volátiles (SSV). Adicionalmente se estudió el efecto de dos tipos de zona catódica, anaerobia (Z.C.An) y aerobia (Z.C.Ae). Todos los experimentos se realizaron por duplicado. La operación de los CCM fue intermitente, con varios ciclos de operación y cada ciclo de operación terminó cuando el voltaje que produjo la CCM alcanzó valores por debajo de 0.050 V. El seguimiento del proceso se realizó determinando la remoción de materia orgánica, mediante el parámetro demanda química de oxígeno total (DQO<sub>t</sub>) y la destrucción de SSV. También se midió el voltaje de las CCMb, para lo cual estas se conectaron a una resistencia de 100 Ohms y mediante una computadora conectada a un sistema de adquisición de datos, con una tarjeta Arduino® se registraron los voltajes de cada CCMb. La corriente se calculó mediante la ley de Ohm y con ella se calculó la potencia eléctrica con la fórmula  $P=VI$ . La densidad de corriente máxima ( $DC_{vol,max}$ ) y la densidad de potencia máxima ( $DP_{vol,max}$ ) se normalizaron tomando en cuenta el volumen de trabajo del anolito. Para la

Figura 1. Remoción de materia orgánica y destrucción de sólidos suspendidos volátiles

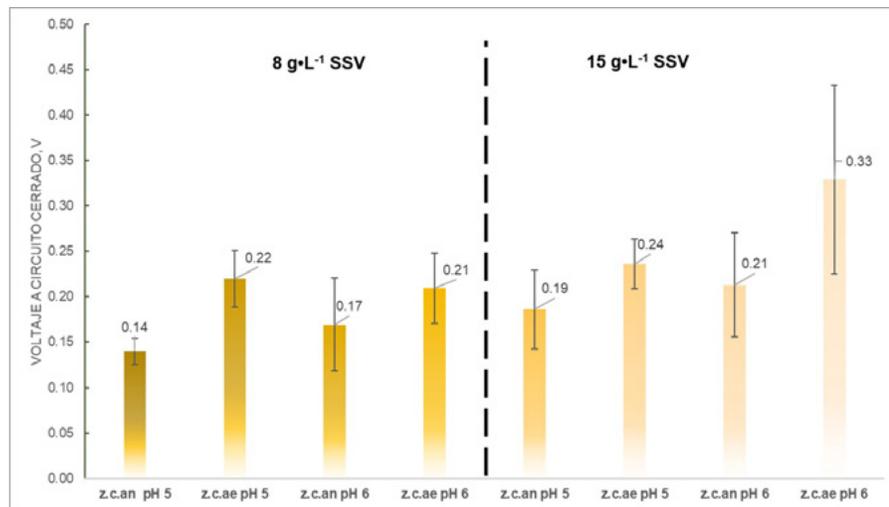


determinación de la DQO<sub>t</sub> y del contenido de SSV se utilizaron técnicas analíticas acorde a los métodos estándar (Baird *et al.*, 2017).

Los lodos utilizados como sustrato de las cámaras anódicas provinieron de los sedimentadores secundarios de una PTAR ubicada en la delegación de Iztapalapa de la Ciudad de México, que tiene un sistema

de tratamiento biológico convencional de lodos activados. Los lodos se almacenaron a 4°C hasta su uso y durante el mismo se mantuvieron en agitación mediante recirculación con un flujo de 500 ml·min<sup>-1</sup>. El medio catódico consistió en una combinación de extracto de levadura como sustrato, macronutrientes y micronutrientes (Zhang *et al.*, 2012, p. 43). Para las CCMb con Z.C.Ae, se burbujeó aire a las cámaras catódicas con la ayuda de un compresor y difusores de piedra porosa. A las CCMb con Z.C.An se les añadió una concentración de 733 mg·L<sup>-1</sup> de nitrito de sodio (Zhao *et al.*, 2016, p. 1). El volumen del catolito y anolito fueron de 680 mL cada uno.

Figura 2. Generación de voltaje



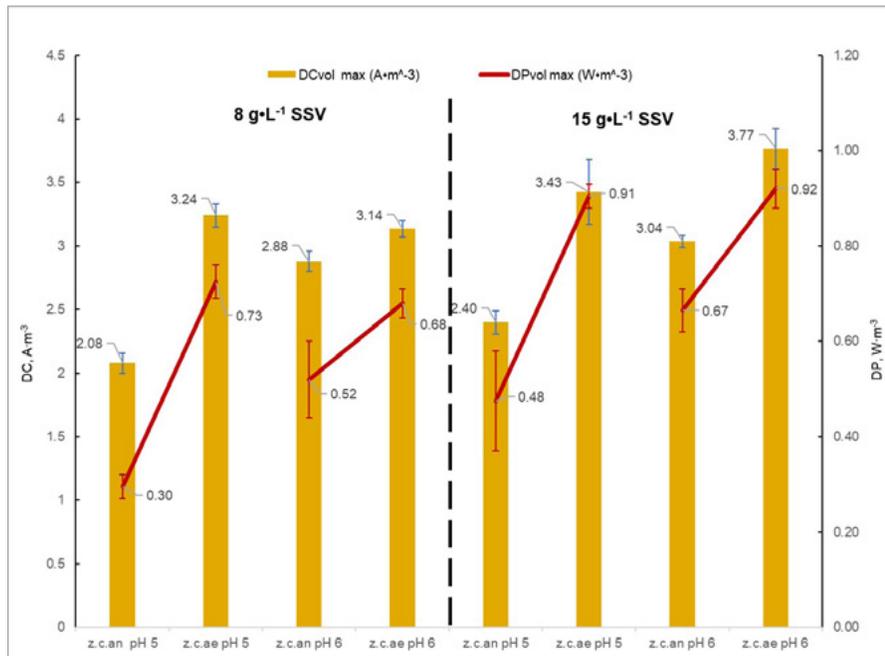
## RESULTADOS

En cuanto a la remoción de materia orgánica, para todas las variables del proceso y los tipos de zona catódica se lograron remociones de  $DQO_t$  y de SSV superiores a 77%, alcanzando remociones de  $DQO_t$  hasta 87.4% y destrucciones de los SSV hasta 92.8% (Véase Figura 1). Los análisis estadísticos de los resultados indicaron que no hay una diferencia estadísticamente significativa entre las remociones de  $DQO_t$  obtenidas en las

diferentes condiciones de operación y con los diferentes tipos de zona catódica (aerobia o anaerobia). Se aplicó el criterio de determinación de p con varianzas iguales y un  $\alpha=5\%$  para los tratamientos al ser comparadas con respecto a cada factor. En cuanto a la remoción de SSV el análisis indicó que sí existe una diferencia estadísticamente significativa entre los resultados obtenidos con concentraciones iniciales de SSV en la zona anódica de 8 y 15 g SSV · L<sup>-1</sup>. No se observó un efecto estadísticamente significativo del pH, ni del tipo de la zona catódica.

En cuanto a la generación eléctrica en las CCMB, voltajes máximos de  $0.33 \pm 0.10$  V se alcanzan cuando se utiliza una concentración de

Figura 3. Generación de energía eléctrica



15 g SSV·L<sup>-1</sup> y un pH de 6 con una Z.C.Ae, alcanzando DC<sub>vol</sub> max y DP<sub>vol</sub> max de 3.77±0.2 A·m<sup>-3</sup> y 0.92±0.04 W·m<sup>-3</sup> respectivamente. Para todos los demás casos el voltaje máximo alcanzado estuvo entre

0.14±0.01 y 0.24±0.03 V donde se alcanzaron DC<sub>vol</sub> max entre 2.08±0.08 y 3.43±0.26 A·m<sup>-3</sup>; y DP<sub>vol</sub> max entre 0.3±0.03 y 0.91±0.03 W·m<sup>-3</sup> respectivamente (Véase Figura 2 y Figura 3). Estadísticamente existe una diferencia significativa entre las densidades de corriente y de potencia obtenidas en los tratamientos, obteniéndose valores más altos cuando se utilizan Z.C.Ae a cualquier valor de pH y contenido inicial de SSV en la cámara anódica.

### CONCLUSIONES

Las celdas de combustible microbianas con biocátodos permiten lograr la estabilización biológica de los lodos secundarios, obteniendo remociones de materia orgánica mayores de

77%. Se determinó que, a mayor concentración inicial del sustrato orgánico, mayor es la generación eléctrica. Las CCMB con Z.C.Ae mostraron mejores resultados de generación de energía eléctrica comparadas con las CCMB con Z.C.An.

## REFERENCIAS

- Baird, R., Eaton, A., Rice, E., y Bridgewater, L. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. American Public Health Association.
- CONAGUA. (2017). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Aplicación de Fuentes de Energía Renovable en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales*. México: SEMARNAT.
- Du, Z., Li, H. y Gu, T. (2007). A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. *Biotechnology advances*, 25, 464-482.
- Feng, Y., Yang, Q., Wang, X. y Logan, B. E. (2010). Treatment of carbon fiber brush anodes for improving power generation in air-cathode microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, 195(7), 1841-1844.
- Huarachi, R., Dueñas, A., Yapó, U., Vega, P., Romero, M., Tapia, J. y Esparza, M. (2018). Bioelectrogenesis with microbial fuel cells (MFCs) using the microalga *Chlorella vulgaris* and bacterial communities. *Electronic Journal of Biotechnology*, 31, 34-43.

Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater engineering. Treatment and resource recovery* (5a ed.). United States of America: McGraw Hill.

Slate, A. J., Whitehead, K. A., Browson, D. A. y Banks, C. E. (2019). Microbial fuel cells: An overview of current technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 60-81.

Yu, H., Zhao, Q., Dong, Q., Jiang, J., Wang, K. y Zhang, Y. (2018). Electronic and metagenomic insights into the performance of bioelectrochemical reactor simultaneously treating sewage sludge and Cr (VI)-laden wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 341, 495-504.

Zhang, G., Zhao, Q., Jiao, Y., Wang, K., Lee, D.J. y Ren, N. (2012). Efficient electricity generation from sewage sludge using biocathode microbial fuel cell. *Water Research*, 46, 43-52.

Zhao, H., Zhao, J., Li, F. y Li, Z. (2016). Performance of Denitrifying Microbial Fuel Cell with Biocathode over Nitrite. *Frontiers in Microbiology*, 7(344), 1-7.

# REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EMERGENTES EN UN REACTOR CON BIOMASA INMOVILIZADA Y MEMBRANA INTEGRADA EN SU ZONA SUPERIOR.

GUTIERREZ-MACIAS TANIA

CATEDRÁTICO CONACYT- IMTA

MIJAYLOVA NACHEVA PETIA

INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA (IMTA)



## RESUMEN

Actualmente está demostrada la presencia de contaminantes emergentes en las aguas residuales, se ha reportado que pueden causar efectos tóxicos en especies presentes en los cuerpos receptores. Aunado a esto, se ha observado que las plantas de tratamiento convencionales no están diseñadas para remover y/o eliminar estos compuestos. Es por ello que en las últimas décadas ha surgido el uso de nuevas tecnologías para eliminar o reducir la presencia de estos contaminantes. El objetivo del presente trabajo es evaluar la remoción de tres contaminantes presentes en aguas residuales (fluoxetina, metoprolol y

ácido mefenámico) utilizando un reactor de biomasa inmovilizada y una membrana sumergida en la zona superior. El reactor operó durante tres fases experimentales, cada una con diferentes cargas orgánicas (0.7-2 kgDQO/m<sup>3</sup>d). Se observó como resultado que en la zona empacada se llevó a cabo la mayor remoción, superiores al 95% para los tres fármacos contaminantes utilizando la menor carga orgánica.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha observado la presencia de nuevos contaminantes en las aguas residuales denomi-

nados emergentes (CE), cuya principal característica es la baja concentración a las cuales son detectados, ya sea en ng/L o µg/L, además de causar daños a las especies de flora y fauna presentes en los cuerpos de agua (D'Alessio *et al.*, 2018; Gu *et al.*, 2018; Peng *et al.*, 2019). Los CE se clasifican en grupos como productos de higiene personal, plaguicidas, hormonas, fármacos, retardantes de llama entre otros. Actualmente las plantas de tratamiento de aguas residuales convencionales no están diseñadas para degradar y/o eliminar estos CE (Joss *et al.*, 2004; Miao *et al.*, 2004; Paxeus, 2004; Clara *et al.*, 2005; Poseidon, 2005; Stevens-Garmon *et al.*, 2011; Falas *et al.*, 2012; Grenni *et al.*, 2013; Gutierrez-Macias y Mijaylova., 2015), es por ello que en las últimas décadas se han estudiado sistemas alternos conocidos como nuevas tecnologías. Dentro de este rubro se encuentran los biorreactores de membrana (BRM) y los reactores empacados con materiales de soporte para el desarrollo de biomasa, estos sistemas han reportado altas remociones de CE en comparación a los sistemas de tratamiento convencionales, brindando beneficios como una baja generación de lodos y un efluente de calidad. El objetivo de

esta investigación es evaluar la remoción de tres contaminantes emergentes fluoxetina (FLX), metoprolol (MTP) y ácido mefenámico (AC.MFN) en un reactor con biomasa inmovilizada y membrana integrada en su zona superior utilizando agua residual municipal.

## DESARROLLO

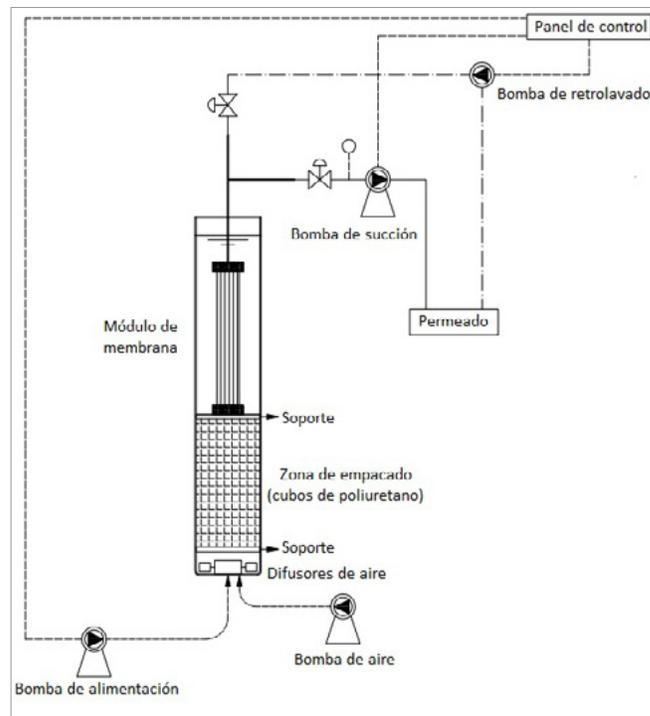
El sistema experimental fue constituido por un reactor de acrílico transparente de flujo ascendente a escala piloto con un volumen total de 10 L, distribuyéndose en dos partes: Zona empacada (Z.E) y Zona Central o de membrana (Z.C). En la Z.E del reactor se colocaron 4 difusores de aire de piedra porosa, con el objetivo de mantener un oxígeno disuelto mayor a 2 mg/L. El reactor fue empacado con 1,152 cubos de poliuretano con un área específica del lecho de 700 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>. Posterior a los cubos (Z.C) se colocó una membrana de ultrafiltración de polisulfona y fibra hueca con un tamaño de poro de 300 kDa (*Véase Figura 1*), la cual operó con ciclos de succión y retrolavado de manera automatizada, una concentración de sólidos suspendidos totales en el licor mezclado (SSTLM) de 1,000-2,000 mg/L

y un pH neutro. Durante toda la experimentación se utilizó agua residual real de una planta de tratamiento, la cual fue fortificada con los fármacos en estudio en una concentración de 5 µg/L.

El reactor operó por un periodo de 140 días, dividido en tres fases experimentales cada una con diferentes cargas orgánicas (0.7- 2 kgDQO/m<sup>3</sup>d), tiempo de retención hidráulico (TRH) y tiempo de retención de sólidos. Durante el monitoreo del reactor se analizaron parámetros de campo (pH, temperatura, conductividad, sólidos disueltos totales) y fisicoquímicos como demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno amoniacal (N-NH<sub>3</sub>), sólidos suspendidos totales (SST), sólidos suspendidos volátiles (SSV) y los fármacos en estudio mediante cromatografía de gases. Las muestras analizadas fueron tomadas en el influente, licor mezclado y permeado.

Como resultado se observó que la mayor remoción de los CE fue utilizando la carga orgánica de 0.7 kgDQO/m<sup>3</sup>d, de manera global las remociones para los tres fármacos fueron mayor al 95% (Véase Figura 2). Sin embargo, se observó que la mayor remoción se llevó a cabo en la zona empa-

Figura 1. Esquema del sistema experimental



cada en el siguiente orden MTP (99.7±0.3%), FLX (99.3±1.2) y AC.MFN (95.6 ±1.2), lo anterior se

puede atribuir al diferente consorcio de microorganismos presentes en el área de empaque, el cual favorece a su degradación. La remoción en la Z.C fue menor al 2 % para todos los casos. En la Figura 3 se presenta la tabla de los resultados promedio obtenidos por zona, fase y carga orgánica durante toda la experimentación del sistema.

Con respecto a las concentraciones DQO se observó que durante toda la operación del sistema oscilaron en un rango de 350 a 530 mg/L en el influente, de 50 a 200 mg/L en el licor mezclado y menores a 50 mg/L en el permeado, así como remociones del 93, 92 y 96% para la fase 1, 2 y 3 respectivamente.

Algunos autores como Sui et al., (2010) mencionan que los

Figura 2. Remoción de FLX, MTP y AC.MFN en las diferentes zonas del reactor.

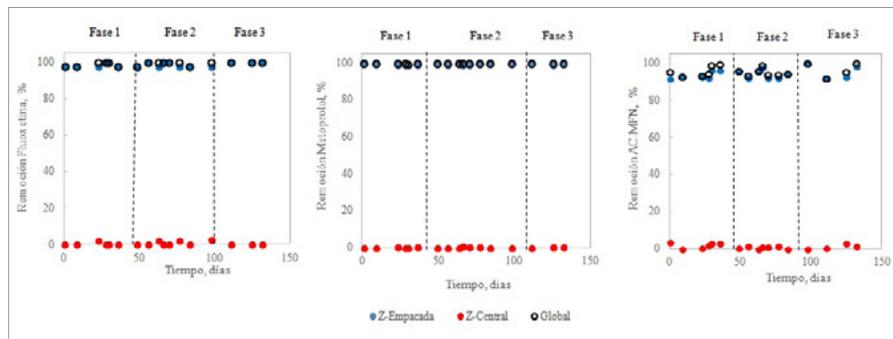


Figura 3. Tabla de resultados promedio de la remoción de los fármacos en estudio

FASE	COV, kgDQO <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup>	TRH, h	TRS, d	REMOCIÓN, %								
				FLX			MTP			AC.MFN		
				Z.E	Z.C	Global	Z.E	Z.C	Global	Z.E	Z.C	Global
1	2	2.2	22	98.2±1.2	0.44±0.05	98.7±1.3	99.4±0.2	0.016±0.01	99.6±0.3	93.7±2	0.24±0.1	95.6±3
2	1	3.2	32	98.4±1.3	0.75±0.04	99.2±1.2	99.5±0.2	0.026±0.01	99.7±0.2	94.4±2.2	0.26±0.08	95.1±2
3	0.7	4.2	42	99.3±1.2	0.063±0.02	99.9±0	99.7±0.3	0.015±0.01	99.9±0.1	95.7±3.1	0.29±0.1	96.8±3

altos TRS (mayor a 30 d) contribuyen a incrementar la remoción de los fármacos, por lo que para este estudio en la fase 3 se ve reflejado al obtener las mayores remociones con el mayor TRS aplicado (42 d). Las remociones que se obtuvieron en el presente estudio fueron mayores

a los reportados por autores como Kovalova et al., (2012) donde sus remociones fueron del 55 % utilizando un BRM con membranas de ultrafiltración sumergidas y zona anóxica y aerobia en el reactor.

## CONCLUSIONES

Con el uso de nuevas tecnologías para la remoción de CE, como el uso de sistemas empacados y de membrana sumergida en conjunto, se pueden presentar altas eficiencias de remoción mayores al 95% para fármacos como el metoprolol, fluoxetina y ácido mefenámico. Además, que las concentraciones de DQO en el efluente pueden llegar a ser menores de 50 mg/L. Con el empleo de zonas empacadas previo al uso de membranas se favorece a la zona debido a que se promueve una baja concentración de sólidos en el licor mezclado, permitiendo un menor ensuciamiento de la membrana, lo cual mejora su ciclo de vida, además de fomentar los altos TRS.

## REFERENCIAS

- Clara, M., Strenn, B., Gans, O., Martinez, E., Kreuzinger, N. and Kroiss, H. (2005) Removal of selected pharmaceuticals, fragrances and endocrine disrupting compounds in a membrane bioreactor and conventional wastewater treatment plants. *Water Research*, 39 (19), 4797-4807.
- D'Alessio, M., Onanong, S., Snow, D., Ray, C. (2018) Occurrence and removal of pharmaceutical compounds and steroids at four wastewater treatment plants in Hawaii and their environmental fate. *Science of the Total Environment*, 631-632,1360-1370.
- Falas, P., Bailon-Dhumez, A., Andersen, H.R., Ledin, A. and la Cour Jansen, J. (2012) Suspended biofilm carriers and activated sludge removal of acid pharmaceuticals. *Water Research*, 46 (4), 1167-1175.
- Grenni, P., Patrolecco L., Ademollo, N., Tolomei, A. and Caracciolo, A.B. (2013) Degradation of Gemfibrozil and Naproxen in river water ecosystem. *Microchemical Journal*, 107, 158-164.
- Gu, Y., Huang, J., Zeng, G., Shi, L., Shi, Y., Yi, K. (2018) Fate of pharmaceuticals during membrane bioreactor treatment: Status and perspectives. *Bioresource Technology*, 268,733-748.

- Gutierrez-Macias, T. and Mijaylova, N.P. (2015) Clofibric acid and Gemfibrozil removal in membrane bioreactors. *Water Science and Technology*, 71 (8), 1143-1150.
- Joss, A., Zabczynski, S., Göbel, A., Hoffmann, B., Löffler, D., McAr-  
dell, C., Ternes, T. Thomsen, A. and Siegrist, H. (2006) Bio-  
logical degradation of pharmaceuticals in municipal  
wastewater treatment: Proposing a classification scheme. *Water Research*, 40 (8), 1686-1696.
- Kovalova L., Siegrist H., Singer H., Wittmer A., McAr-  
dell C.S. (2012). Hospital Wastewater Treatment by Membrane Bio-  
reactor: Performance and Efficiency for Organic Micropol-  
lutant Elimination. *Environmental Science and Technology*,  
46, 1536-1545.
- Miao, X., Bishay, F., Chen, M. and Metcalfe, C. (2004) Occurrence  
of antimicrobials in the final effluents of wastewater treat-  
ment plants in Canada. *Environmental Science and Technol-  
ogy*, 38, 3533-3541.
- Paxeus, N. (2004) Removal of selected non-steroidal anti-in-  
flammatory drugs (NSAIDs), gemfibrozil, carbamazepine,  
beta-blockers, trimethoprim and triclosan in conventional  
wastewater treatment plants in five EU countries and their  
discharge to aquatic environment. *Water Science and Tech-  
nology*, 50 (5), 253-260.
- Peng, J., Wang, X., Yin, F., Xu, G. (2019) Characterizing the removal  
routes of seven pharmaceuticals in the activated sludge  
process. *Science of the Total Environment*, 650, 2437-2445.
- Poseidon. 2005. Final Report, Disponible en: <http://www.eu-poseidon.com>.
- Stevens-Garmon, J., Drewea, J.E., Khan, S.J. and McDonald, J.A.  
(2011) Sorption of emerging trace organic compounds onto  
wastewater sludge solids. *Water Research*, 45, 3417-3426.
- Sui, Q., Huang, J., Deng, S., Yu, G., Fan, Q. (2010). Occurrence and  
removal of pharmaceuticals, caffeine and DEET in waste-  
water treatment plants of Beijing, China. *Water Research*, 4,  
417-426.

# VARIACIÓN ALTITUDINAL DE LA INTERCEPTACIÓN DE LLUVIA Y NIEBLA EN UN BOSQUE DEL CENTRO DE VERACRUZ, MÉXICO

TERESA MARGARITA GONZÁLEZ-MARTÍNEZ

POSGRADO EN CIENCIAS FORESTALES-COLPOS

FRISO HOLWERDA

CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA-UNAM



## RESUMEN

Dos procesos ecohidrológicos de gran importancia para los bosques de niebla son la interceptación de lluvia ( $I_p$ ) y la interceptación de niebla ( $I_n$ ), ya que determinan las entradas de agua en el balance hidrológico. En el presente trabajo se analizó la variación y los factores que determinan dichos procesos, en el límite inferior y superior de distribución del bosque de niebla del centro de Veracruz, México.

## Introducción

Los bosques tienen un papel muy relevante en la regulación del ciclo hidrológico de las cuencas de

montaña, lo cual les permite generar distintos servicios ecosistémicos como la provisión de agua dulce, el mantenimiento del flujo de los ríos y el control de inundaciones aguas abajo. Uno de los ecosistemas con mayor relevancia en términos hidrológicos es el bosque mesófilo de montaña o bosque de niebla, ya que además de recibir grandes cantidades de lluvia, suele presentar frecuentes eventos de niebla que adiciona agua a su ciclo hidrológico y reducen la evapotranspiración (Bruijnzeel *et al.*, 2011).

Para estimar las entradas de agua al bosque es necesario estudiar dos procesos ecohidrológi-

cos que implican, respectivamente, una pérdida y una ganancia en el balance hídrico: la interceptación de niebla ( $I_f$ ) y la interceptación de lluvia ( $I_p$ ) (Holwerda *et al.*, 2010).

La  $I_f$  es el proceso por el cual la niebla es captada por la vegetación, e incorporada al ciclo hidrológico por goteo (precipitación de niebla). Esta entrada de agua puede ser considerable, e incluso superar a la lluvia durante ciertos periodos del año (Bruijnzeel *et al.*, 2011). La  $I_p$  es el proceso de almacenamiento temporal del agua de lluvia sobre las superficies y su posterior retorno hacia la atmósfera por evaporación. Este proceso reduce la cantidad de agua que alcanza el suelo (lluvia neta) y que estará disponible para los otros procesos de la fase terrestre del ciclo hidrológico (Carlyle-Moses y Gash, 2011).

Uno de los bosques de niebla donde se han estudiado a detalle la  $I_p$  y la  $I_f$  se ubica en el centro de Veracruz, México (Holwerda *et al.*, 2010; González-Martínez y Holwerda, 2018). Su zona de distribución abarca una franja que va de 1200 a 2550 m snm, la cual presenta condiciones ambientales que cambian con respecto a la altitud.

En los siguientes capítulos se describe la variación y los factores que influyen los procesos de  $I_f$  e  $I_p$  en dos sitios de estudio, ubicados en los límites inferior y superior de distribución del bosque de niebla del centro de Veracruz: la reserva natural Santuario del Bosque de Niebla (1300 m snm, en lo sucesivo denominada como “Santuario”) y la reserva “la Cortadura” (2170 m snm). Dado que la información presentada corresponde a estudios realizados en diferentes momentos y con una serie temporal de distinto tamaño, la comparación se realizó en términos relativos (% de  $P$ ), tomando como referencia la lluvia acumulada en el periodo de monitoreo.

### Variación altitudinal de la interceptación de niebla ( $I_f$ )

La aportación de agua procedente de  $I_f$  depende, en gran medida, de las características de los eventos de niebla (frecuencia, duración y densidad), aunque otros factores como la velocidad del viento también son importantes (Bruijnzeel *et al.*, 2011).

En la zona centro de Veracruz, los eventos de niebla son más frecuentes durante la temporada seca del año (noviembre-abril) y comúnmente están asociados a los frentes fríos (Holwerda *et al.*, 2010). Sin embargo, las características de la niebla cambian con la altitud.

En el Santuario los eventos de niebla tendieron a ser cortos (3.4 hrs en promedio) y poco densos (visibilidad media de 328 m), además, estuvieron asociados a velocidades de viento bajas. En la Cortadura la niebla fue más frecuente y densa (36% del tiempo con niebla en comparación con 2% del tiempo en el Santuario), y 16% de los eventos duraron 24 hrs o más (Alvarado-Barrientos *et al.*, 2015). En consecuencia, en el Santuario no se detectaron evidencias de  $I_f$  durante la temporada seca, lo cual se interpreta como una nula aportación de agua al balance hídrico. En tanto que en Cortadura la  $I_f$  fue estimada en 8% de  $P$  durante la temporada seca.

No se cuenta con una serie histórica de mediciones de eventos de niebla, lo cual dificulta saber si la tendencia observada entre ambos sitios se debe únicamente a la variación altitudinal. No obstante,

estudios realizados en otros lugares del mundo sugieren que el cambio climático está conduciendo a un aumento de la altura a la cual se presenta la niebla y a una reducción de eventos de niebla (Hu y Riveros-Iregui, 2016).

### Variación altitudinal en la interceptación de lluvia ( $I_p$ )

La  $I_p$  puede variar ampliamente en los gradientes altitudinales de las montañas debido a distintos factores, entre los que se encuentran el tamaño e intensidad de los eventos de lluvia y la demanda evaporativa de la atmósfera (Carlyle-Moses y Gash, 2011). Otro factor muy importante es la capacidad de almacenamiento de agua en el dosel ( $C_m$ ), la cual se define como la máxima cantidad de agua que es almacenada en las superficies de vegetación cuando la precipitación neta ha parado (Klaassen *et al.*, 1998).

En el Santuario la  $I_p$  fue de 15% de  $P$  en promedio, mientras que en la Cortadura fue de 19% de  $P$  en promedio (únicamente para los días sin niebla). Debido a la baja evaporación relativa observada

en ambos sitios (e.i. evaporación media del dosel húmedo/ intensidad media de la lluvia; ambos en  $\text{mm h}^{-1}$ ), fue posible determinar que las pérdidas de agua por  $I_p$  estuvieron dominadas por la evaporación posterior a los eventos de lluvia. Bajo este contexto, los factores que explicaron las diferencias altitudinales y estacionales en  $I_p$  fueron el tamaño de los eventos de lluvia y  $C_m$ .

Durante la temporada de lluvias la  $I_p$  en el Santuario (9% de  $P$ ) fue la mitad que en la Cortadura (18% de  $P$ ). Sin embargo, el tamaño medio de los eventos de lluvia fue similar en ambos sitios (13 y 14 mm, respectivamente). Por lo tanto, la variación altitudinal de  $I_p$  durante la temporada de lluvias estuvo determinada principalmente por las diferencias en  $C_m$ , cuyo valor para esta temporada fue mucho menor en el Santuario (1.0 mm) que en la Cortadura (3.9 mm). En contraste, durante la temporada seca la  $I_p$  relativa fue similar en ambos sitios (22 y 20% de  $P$  en el Santuario y la Cortadura, respectivamente), a pesar de que  $C_m$  continuó siendo menor en el Santuario (1.0 mm contra 2.8 mm en la Cortadura). La explicación a esto residió en el

tamaño medio de los eventos de lluvia, cuyo valor en el Santuario fue de la mitad que en la Cortadura (4.3 mm y 8.3 mm, respectivamente); cuando existen eventos pequeños de lluvia, una mayor proporción de agua se queda interceptada, ya que el dosel no se satura, aunque el valor de  $C_m$  sea pequeño.

Las características de la vegetación determinan  $C_m$ . En los bosques dominados por especies caducifolias, como en este caso, el índice de área foliar es el único factor asociado a la vegetación que cambia considerablemente a lo largo del año. En la Cortadura el índice de área foliar fue de 6.3 en promedio, mientras que en el Santuario varió entre 4.1 y 5.9 para las temporadas de secas y lluvias, respectivamente. Sin embargo, la diferencia observada en este parámetro no fue suficiente para explicar por sí sola la variación altitudinal en  $C_m$ .

La presencia de epífitas, muy comunes en los bosques de niebla, suele aumentar el valor de  $C_m$  gracias a su elevada capacidad para absorber agua. La carga de epífitas es más alta en sitios con presencia frecuente de niebla, debido a que dependen fuertemente de la humedad que obtienen por

esta vía (Van Stan II y Pypker, 2015). De acuerdo a observaciones realizadas por los miembros del equipo de investigación, existe una mayor presencia de epífitas en la Cortadura que en el Santuario (observación personal Friso Holwerda).

Otro factor que afecta a  $C_m$  es la estructura y composición de la vegetación. Los bosques dominados por especies de cortezas rugosas y árboles de gran tamaño tienen mayor capacidad de almacenamiento (Levia y Germer, 2015). El DAP promedio de los árboles indica una mayor frecuencia de individuos de grandes dimensiones en la Cortadura ( $29 \text{ cm} \pm 22 \text{ cm}$ , en comparación con  $18 \text{ cm} \pm 16 \text{ cm}$  en el en el Santuario).

## Conclusión

El funcionamiento ecohidrológico de los bosques de niebla está siendo comprometido por la alteración de los patrones climáticos naturales. De acuerdo a nuestros resultados, esta situación comienza a evidenciarse en las tasas de  $I_f$  a 1300 m snm, reflejando una menor ocurrencia y densidad de niebla a esta altitud.

En los sitios de estudio la  $I_p$  regula las entradas de agua liberando a la atmósfera entre 15 y 19% del agua que llueve. Los principales controles de la variación altitudinal y estacional del proceso de  $I_p$  fueron las diferencias en  $C_m$  y el tamaño promedio de los eventos de lluvia. Las diferencias en  $C_m$  probablemente reflejan variaciones altitudinales en el índice de área foliar, la carga de epífitas, y la estructura arbórea.

## Bibliografía

- Alvarado-Barrientos, M.S., Holwerda, F., Geissert, D.R., Muñoz-Villers, L.E., Gotsch, S.G., Asbjornsen, H., Dawson, T.E. (2015). Nighttime transpiration in a seasonally dry tropical montane cloud forest environment. *Trees*, 29, 259-274.
- Bruijnzeel, L.A., Mulligan, M., Frederick, N. (2011). Hydrometeorology of tropical montane cloud forests: emerging patterns. *Hydrological Processes*, 25, 465-498.
- Carlyle-Moses, D.E. y Gash, J.H.C. (2011). Rainfall interception loss by forest canopies. En D.F. Levia, D. Carlyle-Moses, T. Tanaka (Eds.), *Forest Hydrology and Biogeochemistry: Synthesis of Past Research and Future Directions*. Springer Netherlands, Berlin, Germany.

- González-Martínez, T.M. y Holwerda, F. (2018). Rainfall and fog interception at the lower and upper altitudinal limits of cloud forest in Veracruz, Mexico. *Hydrological Processes*, 32, 3717- 3728.
- Holwerda, F., Bruijnzeel, L.A., Muñoz-Villers, L.E., Equihua, M., Asbjornsen, H. (2010). Rainfall and cloud water interception in mature and secondary lower montane cloud forests of central Veracruz, Mexico. *Journal of Hydrology*, 384, 84-96.
- Hu, J. y Riveros-Iregui, D.A. (2016). Life in the clouds: are tropical montane cloud forests responding to changes in climate? *Oecologia*, 180(4), 1061-1073.
- Klaassen, W., Bosveld, F., de Water, E. (1998). Water storage and evaporation as constituents of rainfall interception. *Journal of Hydrology*, 212-213, 36-50.
- Levia, D. F. y Germer, S. (2015). A review of stemflow generation dynamics and stemflow-environment interactions in forests and shrublands. *Reviews of Geophysics*, 53, 673-714.
- Van Stan, J.T., Pypker, T.G. (2015). A review and evaluation of forest canopy epiphyte roles in the partitioning and chemical alteration of precipitation. *Science of the Total Environment*, 536, 813-824.

# BOLETINES METEOROLÓGICOS SINTÉTICOS PARA MUNICIPIOS DE MÉXICO

ROBERTO RAMÍREZ VILLA, JULIO SERGIO SANTANA SEPÚLVEDA,  
RENÉ LOBATO SÁNCHEZ, OSCAR PITA DÍAZ  
INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA, MORELOS MÉXICO



## Resumen

El proyecto de boletines meteorológicos sintéticos a nivel local es una iniciativa del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) para contribuir a solventar la necesidad de reportes especializados del estado del tiempo para municipios del país, que puedan apoyar en procesos de planeación, prevención y atención de emergencias ante eventos severos.

Los boletines son generados diariamente de forma automática por un conjunto de programas de cómputo que emplean *software* e información de carácter libre y que, a través de un sitio web, publican sus resultados. Una vez finalizado este proyecto en

2020, se espera que se realice también una evaluación de los pronósticos contra observaciones con fines de corrección de sesgo y mejora de los pronósticos.

## Introducción

La extensión del territorio mexicano implica un reto para el análisis operativo de eventos hidrometeorológicos que, de acuerdo con el Centro Nacional de Prevención de Desastres, son los fenómeno que se encuentran principalmente asociados a pérdidas y desastres en el país en los últimos 15 años (Cenapred, 2018, p.14). Los sistemas atmosféricos de los que se desprenden presentan: una amplia variedad;

alta complejidad de los procesos físicos implicados en su generación y evolución; y presencia de distintas escalas espaciales y temporales. Con el propósito de atender la necesidad de información estratégica útil sobre el clima y el estado del tiempo, instituciones de gobierno, académicas, centros de investigación y el sector privado han implementado, de manera conjunta o independiente, observatorios, redes de monitoreo y equipos tecnológicos de análisis, además de impulsar la formación de recursos humanos especializados.

Los pronósticos meteorológicos son informes operativos que describen el posible estado del tiempo a corto plazo, generalmente a nivel nacional o regional, sin embargo, actualmente existe una limitada disponibilidad de reportes especializados a nivel local para municipios de México. Una alternativa para abordar esta problemática la ofrece el uso de sistemas y recursos libres, como *software* de código abierto, datos satelitales, sistemas de información geográfica, observaciones, reanálisis climáticos, modelos numéricos de la atmósfera y del océano, entre otros. Éstos suelen ser generados por

instituciones de investigación y de gobierno y compartidos con la comunidad científica para su aprovechamiento.

En 2019, la Subcoordinación de Hidrometeorología del IMTA implementó un sistema operacional para la generación de boletines meteorológicos a escala local, generados de forma automática (sintética) a partir de recursos libres y que pueden ser consultados en línea (<http://galileo.imta.mx/>). La segunda fase de este proyecto inició a principios de 2020 con la integración de un pronóstico por ensambles, el cual permite la incorporación de datos de probabilidad ante la ocurrencia de eventos, además de llevar a cabo una evaluación con fines de correcciones de sesgo y posible mejora del pronóstico.

### **Datos empleados**

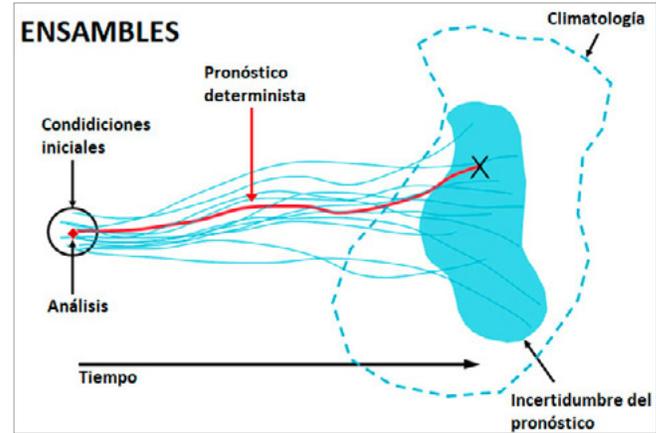
El modelo *Global Forecast System* (GFS) del Centro Nacional de Predicción Ambiental de Estados Unidos (NCEP), es un modelo acoplado, compuesto por cuatro modelos separados -1) atmósfera, 2) océano, 3) tierra / suelo; y 4) hielo marino-, que trabajan juntos para proporcionar las condi-

ciones atmosféricas en un instante dado (<https://www.ncdc.noaa.gov/>). No obstante, al considerar la atmósfera como un sistema caótico no lineal, los pequeños errores en las condiciones iniciales pueden ocasionar diferencias significativas en los resultados de los modelos numéricos (Slingo y Palmer, 2011, p. 4751).

Una manera de abordar esta situación puede ser a través del uso de modelos por ensambles donde, en lugar de ejecutar simulaciones únicas, se utilizan múltiples corridas (miembros del ensamble) empleando perturbaciones físicas para su procesamiento. Esto permite obtener una estimación de la incertidumbre actual (Stensrud *et al.*, 2000, pg. 2077-2078), así como la evolución más probable mediante el análisis de la dispersión en sus resultados (Véase Figura 1).

El Short-Range Ensemble Forecast (SREF) es un sistema de ensamble del modelo *Weather Research Forecast* (WRF) que opera NCEP. Éste integra 24 miembros de ensamble y 2 de control, configurado para un dominio que cubre Norteamérica, con 4 ejecuciones diarias, resolución espacial

Figura 1.



de 16 km y temporal de 3 horas, para un periodo total de simulación de 84 horas (<https://www.ncdc.noaa.gov/pmb/products/sref/>).

Por su parte, para el proceso de evaluación se utilizan datos provenientes de la red de estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional, correspondiente a valores de temperatura máxima-mínima, precipitación y magnitud del viento en 24 horas, para el periodo de tiempo de

realización contemplado en este proyecto (marzo-octubre 2020).

## Desarrollo

El desarrollo e implementación del sistema de generación de boletines sintéticos se realizó mediante la utilización de un sistema operativo de código abierto (CentOS Linux 7), en el cual se pueden instalar paquetes informáticos, configurar procesos, y elaborar códigos de programación a través de ficheros de sistema que realizan instrucciones específicas complejas. Ello reduce la demanda de recursos del sistema y resulta favorable para equipos que no se consideran de alto rendimiento.

Otro recurso empleado fue el conjunto de paquetes informáticos libres (<https://www.python.org/>, <http://cola.gmu.edu/grads/>, <https://www.r-project.org/>) para procesamiento y lectura de datos meteorológicos globales y regionales, que provienen de fuentes gubernamentales, académicas y científicas. Éstos permiten elaborar los reportes a través de un sistema de composición de texto automatizado (<https://www.latex-project.org/get/>).

Los reportes se presentan en un esquema simple, práctico y legible que contiene el pronóstico de hasta 96 horas. Los reportes contienen la siguiente información:

- Temperaturas máximas y mínimas, así como condiciones descriptivas del ambiente (frío, templado, cálido, etc.) en función de la climatología del lugar.
- Precipitación (intensidad, probabilidad de ocurrencia y periodo del día) utilizando como base la escala de clasificación de lluvias del Servicio Meteorológico Nacional.
- Condiciones de cielo.
- Ocurrencia de tormentas.
- Velocidad de vientos y rachas (intensidad y dirección).

Además, se incluyen los siguientes elementos:

- Imagen satelital actualizada en canal visible (banda 2, 0.64  $\mu\text{m}$ ) con luz de día, e infrarrojo (banda 13, 10.35  $\mu\text{m}$ ) durante la madrugada y noche.

- Perspectiva a 7 días a través de series de tiempo de variables meteorológicas (temperaturas máximas y mínimas, viento y precipitación).
- Íconos del estado del tiempo.

El proceso de generación de boletines se ejecuta de forma diaria en un equipo que requiere de un tiempo aproximado de 4 horas, que consideran desde la descarga de insumos, el procesamiento de la información y la construcción de las series de tiempo, hasta la elaboración de los párrafos de descripción meteorológica en documentos con formato “.pdf” (Véase Figura 2). Los reportes se encuentran disponibles a partir de las 07:00 am para más de 1,500 municipios del país.

Por otra parte, en la fase actual del proyecto se lleva a cabo una evaluación de los resultados del pronóstico a 24, 48 y 72 horas, con respecto a observaciones, empleando métodos de verificación como medidas de la relación entre lo pronosticado y lo ocurrido (Wilks, 2006, pg. 58). Una mayor inversión en esquemas de verificación complejos resultará en una mejor apreciación sobre las deficiencias del pronóstico y proveerá la posibilidad de

Figura 2.

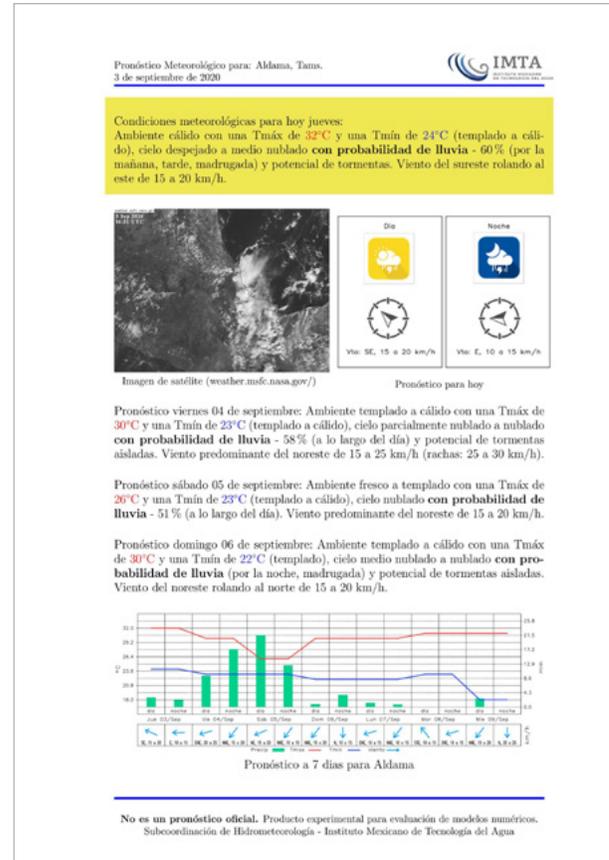
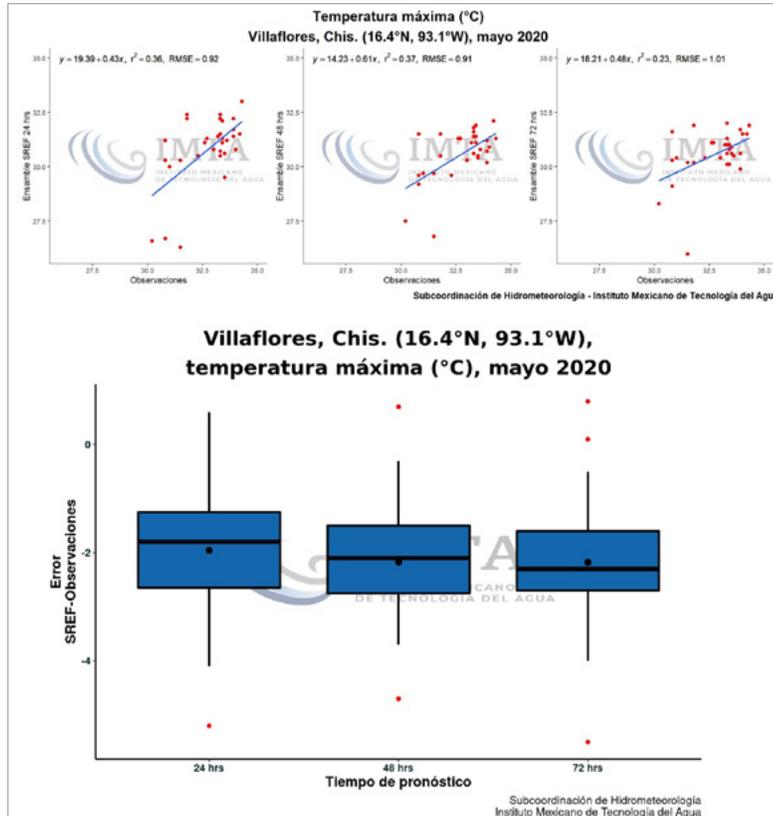


Figura 3.



mejorar el entendimiento de los procesos físicos que están siendo pronosticados (Jolliffe, 2012, pg. 4-5).

Las observaciones son sometidas a un proceso de control de calidad y homogeneización utilizando el paquete del lenguaje R Climatol (<http://www.climatol.eu/>). Mediante pruebas estadísticas de homogeneidad, se ajustan los datos con el fin de descartar valores sospechosos en las series y completar datos ausentes. Esta herramienta funciona mediante series de referencia de estaciones cercanas, asimismo, se puede controlar la calidad de las series y eliminar anomalías que superen un umbral prefijado (Guijarro, 2018, pg 1-4).

Una vez finalizado el control de calidad y homogeneización de los datos observados, se generan gráficos exploratorios y valores de puntajes como métodos de verificación (Dia-

gramas de dispersión, Boxplots, Error y Raíz del error cuadrático medio) para la validación del pronóstico (Véase Figura 3). Esto tiene como propósito aplicar posteriormente esquemas de ajustes de sesgo para reducir la incertidumbre y mejorar los pronósticos meteorológicos (Cui *et. al*, 2012 pg. 408; Jolliffe, 2012, pg. 5).

## Conclusiones

La propuesta de un sistema de generación de boletines meteorológicos sintéticos no solo brinda la oportunidad de contribuir a la disponibilidad de información especializada a escala local, sino que constituye un elemento de utilidad para la identificación de la incertidumbre asociada al pronóstico y para la evaluación objetiva de simulaciones numéricas mediante la obtención de los errores asociados. El propósito es aplicar esquemas de ajustes de sesgo por regiones y contribuir a mejorar la calidad de la información empleada para la toma de decisiones, planeación de actividades, prevención de desastres y atención a emergencias.

## Bibliografía

- García N, Méndez K. y Vázquez F. (2018). *Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la república mexicana en 2016*. Segob-Cenapred, Versión electrónica 2018, México. Tomado de: <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/384-IMPACTO2016OEFINAL12FEBRERO2018.PDF>
- Cui B., Toth Z., Zhu Y. y Hou D. (2012). Bias Correction for Global Ensemble. Forecast. Weather and Forecasting. *American Meteorological Society*, Volume 27, Pg. 396-410
- Guijarro J. A. (2018). *Homogeneización de series climáticas con Climatol*. Agencia Estatal de Meteorología, Guía versión 1.3.1, Islas Baleares, España.
- Jolliffe, I. T., y Stephenson D. B. (2012). *Forecast Verification. A Practitioner's Guide in Atmospheric Science*. 2nd Edition, Wiley and Sons Ltd, 292 pp.
- Stensrud, D.J., Bao J-W y Warner T. T. (2000). Using Initial Condition and Model Physics Perturbations in Short-Range Ensemble Simulations of Mesoscale Convective Systems. *Monthly Weather Review*, No. 128, pp. 2077-2107.

Slingo, J y Palmer D. (2011). *Uncertainty in weather and climate prediction*. Phil. Trans. R. Soc. A. No. 369, Pp. 4751-4767.

Wilks, D. S. (2006). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. 2nd Ed. *International Geophysics Series, Academic Press, Elsevier*, 627 pp.

# REMOCIÓN DE NITRÓGENO AMONIAICAL MEDIANTE OXIDACIÓN ELECTROQUÍMICA

**JOSE LUIS ESQUIVEL MATU**

UNAM, PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA (ING. AMBIENTAL),  
CAMPUS IMTA.

**PETIA MIJAYLOVA NACHEVA, PÉREZ CASTREJÓN SARA**

INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA (IMTA),  
COORDINACIÓN DE TRATAMIENTO Y CALIDAD DEL AGUA.



## Resumen

Para evitar un posible escenario de contaminación ambiental causado por la presencia de nitrógeno amoniacal ( $\text{N-NH}_4^+$ ) en aguas residuales, se han empleado tratamientos convencionales como los tratamientos biológicos y químicos los cuales no son del todo efectivos. La tecnología de electrooxidación recientemente ha ganado mucha atención debido a que es una alternativa eficiente para la remoción de  $\text{N-NH}_4^+$  presente en el agua. Variando el tiempo de operación, la densidad de corriente, la concentración de cloruro de sodio ( $\text{NaCl}$ ) y dos tipos de ánodos,  $\text{Ti/IrO}_2$  y  $\text{Ti/SnO}_2$  y acero inoxi-

dable como cátodo, se evaluó la remoción por electrooxidación del  $\text{N-NH}_4^+$ . Los resultados indicaron que, en un tiempo de reacción de 100 minutos, una densidad de corriente de  $51.65 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ ,  $665 \text{ mg L}^{-1}$  de  $\text{NaCl}$  ( $404 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  de  $\text{Cl}^-$ ) y usando el electrodo de  $\text{Ti/SnO}_2$  es posible remover eficientemente el  $\text{N-NH}_4^+$  presente en el agua.

## Introducción

Con el crecimiento de la población mundial se ha incrementado la contaminación de los cuerpos de agua por descargas municipales e industriales, lo

cual ha disminuido la disponibilidad de agua con calidad adecuada para el abastecimiento. Por eso, el reúso del agua residual proveniente de plantas de tratamiento es ahora una necesidad (Angelakis et al., 2018). Una descarga de agua con alto contenido de nutrientes, tales como nitrógeno y fósforo, puede ocasionar efectos perjudiciales para el medio acuático, como la eutrofización.

En las últimas décadas, se han desarrollado nuevos procesos de oxidación avanzada (POA), con eficiencias de destrucción de los contaminantes mucho mayores que los procesos convencionales (Anglada et al., 2009, p.1447). Los POA implican la formación de agentes oxidantes con alto potencial de oxidación, que transforman los contaminantes recalcitrantes y tóxicos en otros de menor riesgo ambiental o en productos finales (Barrera, 2014). La electrooxidación ha demostrado tener una alta eficiencia para la remoción de diversos contaminantes, baja producción de lodos, y su operación sólo requiere de una pequeña área y poca inversión (Wang et al., 2018, p.5665). El producto principal del proceso de electrooxidación del nitrógeno amoniacal ( $\text{N-NH}_4^+$ ) es el  $\text{N}_2$  y esto es debido a que en

el agua se forma el cloro activo, en forma de HOCl o  $\text{ClO}^-$ , el cual reacciona con el  $\text{N-NH}_4^+$  presente en el agua (Kapalka et al., 2010, p.1205).

## Desarrollo

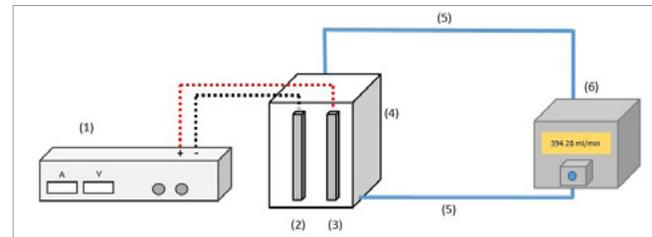
### Sistema experimental

La oxidación electroquímica del  $\text{N-NH}_4^+$  se llevó a cabo en un reactor de acrílico con una capacidad de 1.362 L (Véase Figura 1). En la Figura 2 se presenta esquemáticamente el sistema experimental, constituido por un reactor en el cual están sumergidos los electrodos, una fuente de poder y una bomba peristáltica. Se emplearon dos tipos de ánodos, uno de  $\text{Ti/IrO}_2$  y otro de  $\text{Ti/SnO}_2$  de tipo malla y como cátodos maya de acero inoxidable. Las dimensiones de todos los electrodos fueron de 100 mm x 110 mm x 1.9 mm. La separación entre los electrodos fue de 10 mm. La corriente eléctrica se aplicó por medio de una fuente de poder (Sorensen DLM 40-15 DC) con capacidad para suministrar 15A y 40V. Con la finalidad de mantener una mezcla homogénea en el reactor, se utilizó una bomba

Figura 1.



Figura 2.



peristáltica con un caudal de recirculación de  $394 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ .

### Solución sintética

Para la preparación del agua residual sintética se requirieron de varios reactivos químicos. El cloruro de amonio ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ , 99.0% ALYT) fue empleado como proveedor de  $\text{N-NH}_4^+$ , el cloruro de sodio ( $\text{NaCl}$ , 99.0% ICR internacional) como proveedor de cloruros ( $\text{Cl}^-$ ) y el sulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , 99.8% J.T Baker) como electrolito para mejorar la conductividad del medio. Para obtener una concentración de  $\text{N-NH}_4^+$  de  $40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , se agregaron  $191 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  de  $\text{NH}_4\text{Cl}$ . Para obtener los tres niveles seleccionados de concentración de  $\text{Cl}^-$ , de 251.85, 327.71

Tabla 1.

Ensayo	Tiempo	NaCl	Densidad de corriente	Tipo de ánodo
1	-1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	-1
3	-1	1	-1	-1
4	1	1	-1	-1
5	-1	-1	1	-1
6	1	-1	1	-1
7	-1	1	1	-1
8	1	1	1	-1
9	-1	-1	-1	1
10	1	-1	-1	1
11	-1	1	-1	1
12	1	1	-1	1
13	-1	-1	1	1
14	1	-1	1	1
15	-1	1	1	1
16	1	1	1	1
17	0	0	0	-1
18	0	0	0	-1
19	0	0	0	-1
20	0	0	0	1
21	0	0	0	1
22	0	0	0	1

y 403.57 mg·L<sup>-1</sup> de Cl<sup>-</sup>, se requirieron 415.05, 540.06 y 665.07 mg·L<sup>-1</sup> de NaCl, respectivamente. Para mejorar la conductividad de la solución se adi-

cionaron 244.01 mg·L<sup>-1</sup> de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> obteniendo así una concentración de 165 mg·L<sup>-1</sup> de sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>). La concentración de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> se mantuvo constante en todos los ensayos experimentales.

### Procedimiento experimental

Se realizaron 6 pruebas preliminares las cuales tuvieron como objetivo establecer los niveles de las variables de operación. Se prepararon soluciones sintéticas fijando las concentraciones de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> en 40 y 165 mg·L<sup>-1</sup> respectivamente. Estas pruebas se realizaron con el ánodo de Ti/IrO<sub>2</sub> variando el tiempo, densidad de corriente y cantidad de NaCl. Los tiempos de reacción empleados fueron de 300 y 180 minutos, las cantidades de NaCl fueron de 46.84, 291.45, 541.47 mg·L<sup>-1</sup> y las densidades de corriente fueron de 25.86 y 51.65 mA·cm<sup>-2</sup>. Con base en los resultados obtenidos de las pruebas preliminares se implementó un diseño factorial 2<sup>4</sup> con seis puntos centrales con el fin de evaluar el efecto del tiempo, densidad de corriente y la cantidad de NaCl añadida sobre la remoción del N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (*Véase Tabla 1*), determinar las mejores

Tabla 2.

	Nivel -1	Nivel central 0	Nivel 1
<b>NaCl (mg L<sup>-1</sup>)</b>	415.05	540.00	665.07
<b>Densidad de corriente (mA/cm<sup>2</sup>)</b>	25.86	38.73	51.65
<b>Tiempo (min)</b>	60	90	120
<b>Ánodo</b>	Ti/IrO <sub>2</sub>		Ti/SnO <sub>2</sub>
<b>Cátodo</b>	Acero Inoxidable		

condiciones de operación y su cinética de reacción. Los resultados del diseño fueron posteriormente analizados utilizando un software estadístico.

## Resultados

Las pruebas preliminares fueron realizadas durante 300 minutos con una densidad de corriente de 25.82 mA·cm<sup>-2</sup> y durante 180 minutos con una densidad de corriente de 51.65 mA·cm<sup>-2</sup>. Las concentraciones de los cloruros en los ensayos preliminares fueron de 155.0, 303.4 y 455.1 mg·L<sup>-1</sup>.

Los resultados indicaron que, aplicando una densidad de corriente de 25.82 mA·cm<sup>-2</sup> y con una concentración de 455.15 mg·L<sup>-1</sup> de Cl<sup>-</sup> fue posible remover la totalidad del N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> en 270 minutos de reacción. Para los ensayos en los cuales se aplicó una densidad de corriente de 51.65 mA·cm<sup>-2</sup>, fue posible alcanzar la completa remoción de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> en un tiempo de 180 minutos cuando la concentración de los cloruros fue de 303.4 mg·L<sup>-1</sup> y en 150 minutos cuando la concentración de los cloruros fue de 455.14 mg·L<sup>-1</sup>. Por tanto, aplicando una mayor densidad de corriente con mayores concentraciones de cloruros se obtienen remociones completas del N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> en un menor tiempo. Estas pruebas, permitieron establecer los niveles de operación de las variables del diseño experimental los cuales se presentan en la Tabla 2 .

Los ensayos del diseño experimental 2<sup>4</sup> fueron realizados de acuerdo con el orden indicado en la Tabla 1. De los 22 ensayos realizados, el ensayo 8 y 16 presentaron los mejores valores de remoción de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (Véase Tabla 3). Ambos ensayos se realizaron bajo las mismas condiciones de operación (tiempo de 120 minutos, 665.07 mg·L<sup>-1</sup> de NaCl y una densidad

Tabla 3.

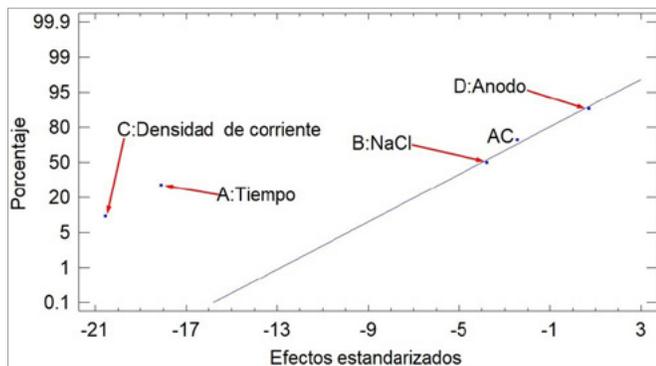
Ensayo	Tiempo (min)	NaCl (mg/L)	Densidad de corriente (mA/cm <sup>2</sup> )	Tipo de ánodo	mg/L de N-Amoniacal
1	60	415.05	25.82	Ti/IrO <sub>2</sub>	27.5
2	120	415.05	25.82	Ti/IrO <sub>2</sub>	18.0
3	60	665.07	25.82	Ti/IrO <sub>2</sub>	25.5
4	120	665.07	25.82	Ti/IrO <sub>2</sub>	15.0
5	60	415.05	51.65	Ti/IrO <sub>2</sub>	16.0
6	120	415.05	51.65	Ti/IrO <sub>2</sub>	0.5
7	60	665.07	51.65	Ti/IrO <sub>2</sub>	12.7
8	120	665.07	51.65	Ti/IrO <sub>2</sub>	0.2
9	60	415.05	25.82	Ti/SnO <sub>2</sub>	27.5
10	120	415.05	25.82	Ti/SnO <sub>2</sub>	17.5
11	80	865.07	25.82	Ti/SnO <sub>2</sub>	25.2
12	120	665.07	25.82	Ti/SnO <sub>2</sub>	13.7
13	60	415.05	51.65	Ti/SnO <sub>2</sub>	16.0
14	120	415.05	51.65	Ti/SnO <sub>2</sub>	2.5
15	60	665.07	51.65	Ti/SnO <sub>2</sub>	13.0
16	120	865.07	51.65	Ti/SnO <sub>2</sub>	0.0
17	90	540.06	38.73	Ti/SnO <sub>2</sub>	11.2
18	90	540.06	38.73	Ti/SnO <sub>2</sub>	11.5
19	90	540.06	38.73	Ti/SnO <sub>2</sub>	12.2
20	90	540.06	38.73	Ti/IrO <sub>2</sub>	12.7
21	90	540.06	38.73	Ti/IrO <sub>2</sub>	12.5
22	90	540.06	38.73	Ti/IrO <sub>2</sub>	14.0

de corriente de 51.65 mA·cm<sup>-2</sup>) variando únicamente el tipo de ánodo utilizado.

Para el análisis estadístico de los resultados experimentales se aplicó un análisis de varianza (ANOVA). El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el coeficiente de determinación ajustado ( $R^2_{aj}$ ) indicaron un buen ajuste (97.90 y 97.41 % respectivamente) del modelo utilizado.

Se revisaron los efectos principales, interacciones dobles, triples y cuádruples. Como resultado, los efectos principales y una doble interacción fueron los que tuvieron una mayor significancia. El ANOVA indicó que los cambios en los valores de la densidad de corriente, el tiempo y la cantidad de NaCl son los que generan un impacto significativo en la remoción de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. Sin embargo, el tipo de ánodo no tiene el mismo impacto, por lo que se puede decir que la aplicación de un electrodo u otro no muestra gran diferencia en el resultado final. No obstante, se recomienda el ánodo de Ti/SnO<sub>2</sub> por su alto valor de sobre potencial de oxígeno. Esto puede observarse en el gráfico de probabilidad normal de los efectos estandarizados (Véase Figura 3). Estos resultados obtenidos concuerdan con lo mencionado por Li et al. 2011, quienes argumentan que la densidad de

Figura 3.



corriente, el tiempo de electrólisis y la concentración de iones cloruro son los factores más importantes en un proceso de electrooxidación.

Las gráficas de superficie de respuesta (Véase Figura 4) indicaron que la mayor remoción de  $N-NH_4^+$  se encuentra cuando se aplican valores altos de operación. Esto coincide con el ensayo 16 (Véase Tabla 3) en el cual se utilizó el ánodo de  $Ti/SnO_2$ , una dosis de  $665.07 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  de  $NaCl$ , un tiempo de 120 minutos y una densidad de corriente de  $51.65 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ .

Así mismo, se realizó la cinética de remoción de  $N-NH_4^+$  empleando las mismas condiciones del ensayo 16. Evaluando los órdenes cinéticos 0, 1 y 2 se encontró que con una constante de velocidad ( $k$ ) de  $0.3871 \text{ mg } N-NH_4^+ \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$  en un tiempo de 100 minutos, la cinética de orden cero se ajusta mejor indicando que la velocidad de reacción es constante e independiente de la concentración (Véase Figura 5).

### Conclusión

Con base en los resultados, el método de electrooxidación se presenta como una gran alternativa para la eliminación del  $N-NH_4^+$ . Con un tiempo de 100 minutos, una densidad de corriente de  $51.65 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ , una concentración de cloruros de

Figura 4.

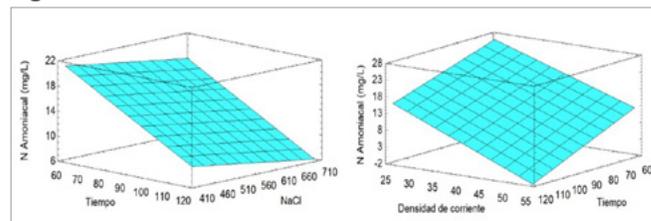
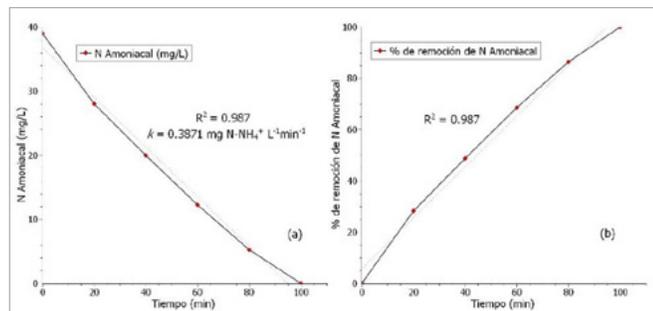


Figura 5.



404.0 mg·L<sup>-1</sup> y utilizando Ti/SnO<sub>2</sub> como ánodo, se obtuvo la completa remoción de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. El análisis estadístico indicó que la densidad de corriente, el tiempo y la concentración de Cl<sup>-</sup> tienen un efecto significativo en la remoción de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, sin embargo, el tipo de ánodo no lo tuvo. La cinética del proceso se ajustó a un modelo matemático de orden cero con una R<sup>2</sup> = 98.74 % y se obtuvo una constante de velocidad (k) de 0.3871 mgN-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>·L<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>.

## Bibliografía

- Angelakis, A., Asano, T., Bahri, A., Jimenez, B., Tchobanoglous, G. (2018) Water Reuse: From Ancient to Modern Times and the Future. *Frontiers in Environmental Science*, 6, 26.
- Anglada A., Urriaga A. & Ortiz I. (2009). Contributions of electrochemical oxidation to wastewater treatment: fundamentals and review applications. *Journal Of Chemical Technology & Biotechnology*, 84(12), 1747-1755.
- Barrera D. (2014). *Aplicaciones electroquímicas al tratamiento de agua residuales*. Reverté Ediciones. México.
- Kapalka, A., Katsaounis, A., Michels, N.L., Leonidova, A., Souentie, S., Comninellis, C., Udert, K. M. (2010) Ammonia oxidation to nitrogen mediated by electrogenerated active chlorine on Ti/PtOx-IrO<sub>2</sub>. *Electrochemistry Communications*, 12(9), 1203-1205.
- Li Miao, Feng Chuanping, Zhang Zhenya, Liu Xiang, Ma Weifang, Xue Qiang. & Sugiura Norio. (2011) Optimization of electrochemical ammonia removal using Box-Behnken desing. *Electrochimica Acta*, 56(1), 265-270.

Wang, Y., Song, W., Ji, L., Guo, J., Cai, L., Zhang, Y. (2018). Efficient Electrochemical Ammonia Removal System. *Applied Ecology & Environmental Research*, 16(5), 5665–5680.

# PELIGRO DE INUNDACIÓN COSTERA POR EVENTOS DE TORMENTA. CASO DE ESTUDIO: BAHÍA DE TODOS SANTOS, BC., MÉXICO.

VIOLETA ZETZANGARI FERNÁNDEZ DÍAZ

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA, FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS



## Resumen

Las inundaciones costeras son uno de los riesgos naturales más comunes a nivel mundial, por lo que suponen un peligro potencial, sobre todo para las costas bajas. Este fenómeno provoca una gama de efectos sobre los ecosistemas costeros y la sociedad, por ejemplo el desplazamiento de playas y humedales, aumento de la erosión y la intrusión salina de cuerpos de agua, daños en la infraestructura situada en primera línea de playa, pérdida de vidas humanas, así como pérdidas económicas relacionadas a la disminución de actividades portuarias y turísticas. Incluir la evaluación de inundaciones

y la adaptación costera como parte de una gestión costera efectiva es una prioridad para la acción inmediata y la gestión sostenible del litoral.

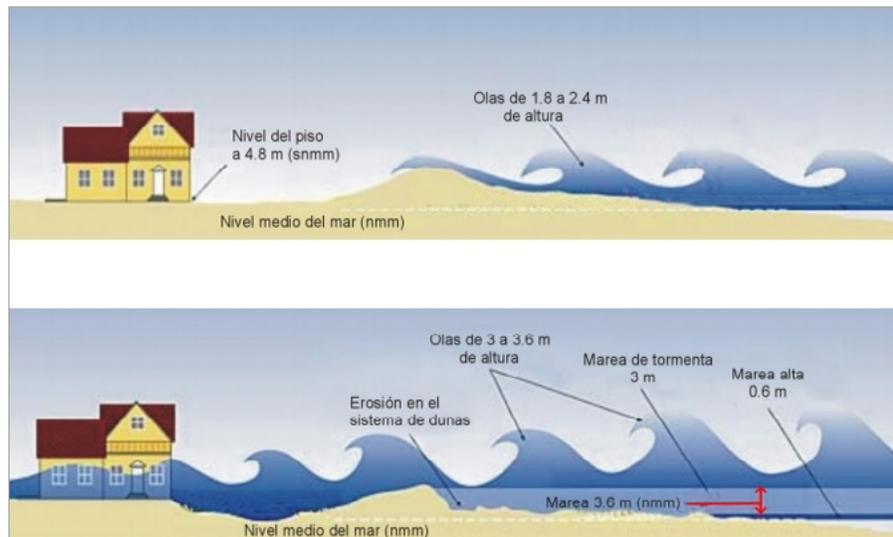
## Introducción

El agua es uno de los recursos naturales más valiosos que puede tener cualquier país debido a los beneficios sociales y económicos que se derivan de su aprovechamiento. Sin embargo, la presencia excesiva de este recurso puede derivar en situaciones extremas, como las inundaciones, que suponen

un peligro muy importante para la sociedad y los ecosistemas (CENA-PRED, 2019) sobre todo en zonas costeras bajas.

En términos de frecuencia estadística, las inundaciones costeras es uno de los riesgos naturales más comunes a nivel mundial (Balica, 2012), particularmente porque las zonas costeras están expuestas al embate de diferentes fenómenos naturales, la mayoría de origen hidrometeorológico, tales como el oleaje, la marea y la marea de tormenta causada por

Figura 1. Costa bajo condiciones normales (arriba) y condiciones de tormenta (abajo).



tormentas severas (Véase *Figura 1*). Las inundaciones están asociadas a fuertes marejadas, derivadas de las alteraciones de los promedios climáticos regionales producto del calentamiento global, y acompañadas de cambios en la frecuencia e intensidad de estos eventos extremos. Durante estos eventos extremos, es más probable que las costas se inundan por el incremento del nivel medio del mar, y que se erosionen como resultado del incremento de la velocidad de la corriente y la energía del oleaje (PNUD, 2010).

### Efectos de las inundaciones sobre la zona costera

Las inundaciones costeras provocan una amplia gama de efectos sobre los ecosistemas

costeros y la sociedad. Dentro de los principales impactos a los ecosistemas costeros se destacan el desplazamiento de las playas y humedales, aumento de la erosión y salinización de aguas superficiales y subterráneas (intrusión salina), con mayor impacto en zonas que presentan subsidencia.

En el aspecto socioeconómico destaca la pérdida de infraestructura situada en primera línea de playa, pérdida de vidas, pérdida de turismo, pérdidas económicas relacionadas a actividades portuarias y turísticas, por mencionar algunas. No obstante, se debe considerar que los impactos socioeconómicos están relacionados en gran medida a los impactos sobre los ecosistemas costeros, como la pérdida de terreno y los medios de subsistencia (CMNUCC, sf).

### **Importancia de evaluar el peligro de inundación en las costas**

En las últimas décadas ha aumentado el interés por evaluar el riesgo de inundación derivado de eventos extremos, ya que el conocimiento y entendimiento de este fenómeno sirve como base para el diseño de obras de protección costera, el desarrollo de la

infraestructura situada en primera línea de playa, el manejo costero, así como del desarrollo de planes de actuación y manejo de emergencias. La evaluación de las amenazas climáticas es fundamental para el desarrollo sostenible y eficaz en las intervenciones de gestión del riesgo, para ello se requiere una planeación basada en el conocimiento compartido adoptando una perspectiva transversal y a largo plazo (PNUD, 2010).

Sin embargo, la evaluación de inundaciones en zona costera es un asunto complejo, debido a la gran variabilidad espacial de la dinámica marina, la elevada cantidad de variables que intervienen y el efecto cambiante de éstas (Balica *et al.*, 2013; McInnes *et al.*, 2003; Nicholls & Lowe, 2004; Villatoro *et al.*, 2014). Además, en las zonas costeras persisten problemas asociados con el crecimiento poblacional, la explotación, degradación de los recursos y un cambio generalizado del hábitat (CMNUCC, sf).

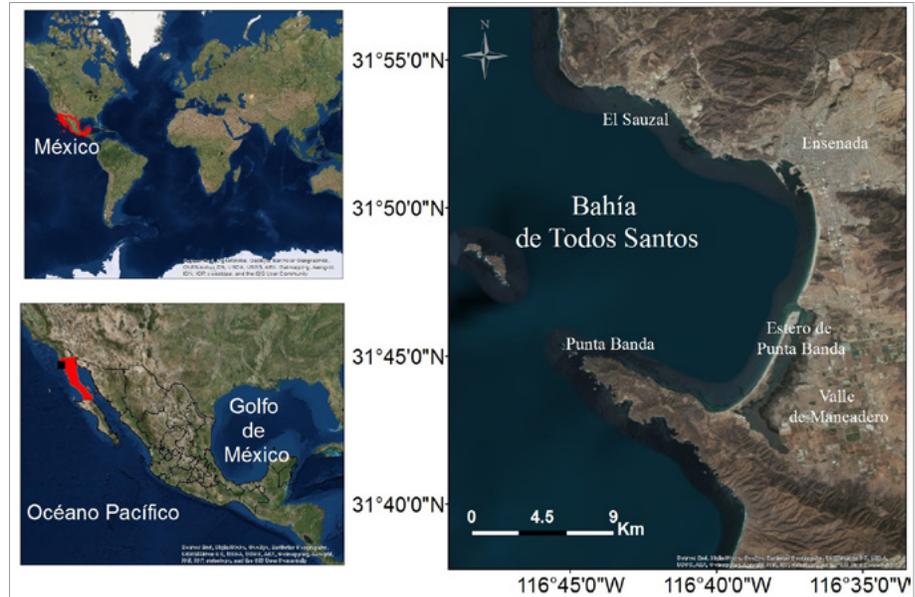
Se espera que estas condiciones se exacerbén debido al cambio climático y el incremento del nivel medio del mar. Lo anterior es un imperativo para incluir la evaluación de inundaciones y la adaptación

costera como parte de una gestión costera efectiva y una prioridad para la acción inmediata en estas zonas (USAID, 2009 en CMNUCC, sf).

### Caso de estudio

La Bahía de Todos Santos (BTS) se localiza sobre la localiza sobre la costa noroeste de la Península de Baja California, a 111 km al sur de la frontera México-Estados Unidos (Véase Figura 2). De manera general, la zona norte de la bahía (puntos 1 al 3) se caracteriza por la presencia de cantiles marinos activos de alturas entre los 3 y 6 m que aportan material al resto de la bahía y en dirección sur a través de la corriente litoral. En la zona centro (puntos 4 al 10) se ubica el puerto de altura de Ensenada y playas

Figura 2. Mapa de localización.



arenosas de uso recreativo, así como áreas ecológicamente importantes (cuerpo de agua conocido como “La Lagunita”). Al sur de la bahía (puntos 11-13) se ubica un cuerpo de agua separado del mar por una barra arenosa de 7 km, conocido como el Estero de Punta Banda, y sobre esta barra de arena se localiza un sitio RAMSAR por su impor-

tancia para aves migratorias. A su vez, este cuerpo de agua mantiene separado al Valle agrícola de Maneadero del mar (Véase Figura 3), un valle de relevancia regional e internacional.

Utilizando una metodología basada en escenarios de oleaje y viento que representan eventos de tormenta proyectados a periodos de retorno (Tr) de 2 y 50 años, un modelo topobatimétrico de la BTS y modelación numérica que simula el comportamiento de las condiciones hidro-

Figura 3. Puntos de observación en la bahía.



dinámicas en la zona, se abordan a continuación las zonas potenciales de inundación considerando los escenarios de tormenta proyectados.

Por las características morfoodinámicas de la bahía, la zona norte tiene potencial de inundación bajo, ya que como se mencionó anteriormente, predomina la presencia de cantiles, por lo que se omiten los resultados. No sucede lo mismo en las playas del centro y sur de la bahía, en donde el potencial de inundación se incrementa debido a la presencia de playas arenosas y cotas del terreno más bajas. Sin embargo, el peligro representa un problema directo mayor para el ecosistema que para la sociedad, ya que la mancha de inundación no causa problemas

severos a la infraestructura a pie de playa, pero invade zonas secas que brindan servicios ecosistémicos importantes, así como la pérdida de hábitats para las aves y otros organismos (Véase Figura 4). Esto ocasiona otros efectos adversos asociados con la pérdida de terreno por erosión en el Estero de Punta Banda y el incremento potencial de la intrusión salina en el Valle de Maneadero (Véase Figura 5).

### Conclusiones

Determinar y establecer las zonas costeras potenciales a inundarse bajo eventos de tormenta es fundamental para el desarrollo sostenible y eficaz de las intervenciones de gestión del riesgo.

En este caso de estudio, si bien la zona norte de la BTS no es un área sujeta a inundación, la erosión que actualmente se presenta en la base de los cantiles aunado a las condiciones hidrodinámicas de tormenta potencia el riesgo de sufrir deslizamiento de los cantiles que afectarían la infraestructura asentada sobre ellos. La zona sur definitivamente es un área que, bajo condiciones de tormenta, el efecto de la erosión sobre la barra de arena es sumamente relevante, ya que implica la pérdida del sitio RAMSAR hábitat de aves y otras especies.

Figura 4. Mancha de inundación en Punta Estero - sitio RAMSAR.

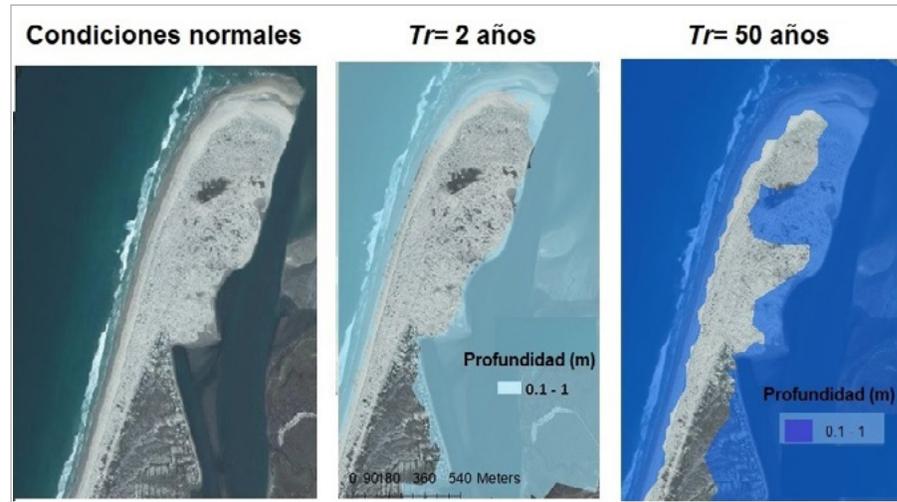
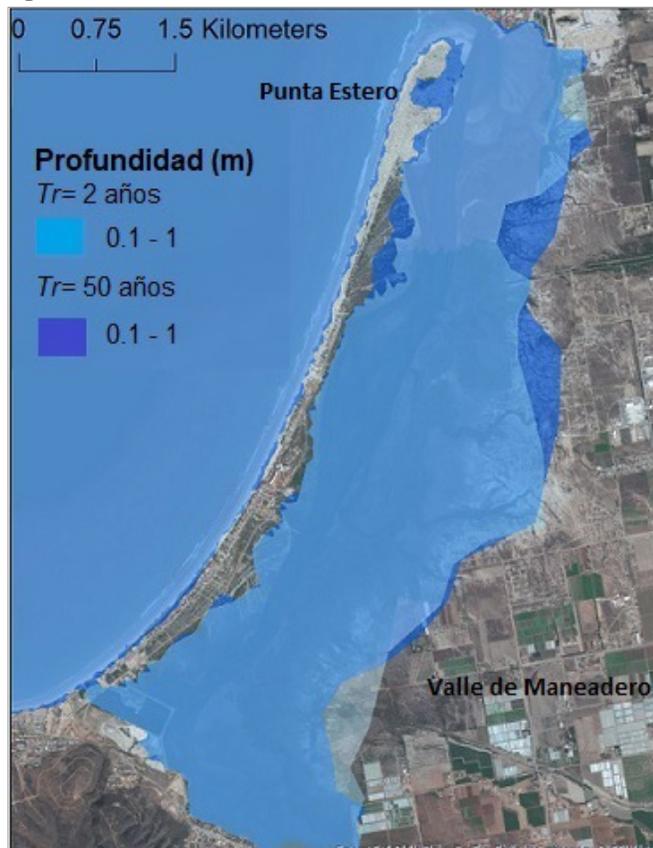


Figura 5. Extensión de inundación en el Estero de Punta Banda.



Considerar el desarrollo e implementación de medidas de adaptación ante cambio climático y los eventos hidrometeorológicos extremos es una opción necesaria para la BTS ya que, aún bajo condiciones que no consideran el inminente incremento del nivel del mar, se detectan ya zonas potenciales de inundación.

## Bibliografía

- Balica, S.F., Popescu, I., Beevers, L., & Wright, N. G. (2013). Applying the flood vulnerability index as a knowledge base for flood risk assessment. *Environmental Modelling & Software*, 41, 84–92
- Balica, Stefania Florina. (2012). Applying the flood vulnerability index as a knowledge base for flood risk assessment. Delft University of Technology.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (2019). *Inundaciones Serie Fascículos versión electrónica*. Disponible en: <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/3-FASCCULOINUNDACIONES.PDF>
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) (sf). *Materiales de capacitación del GCE sobre las evaluaciones de vulnerabilidad y adaptación*. Capítulo 5: Recursos costeros. Disponible en: <http://www.oceanografossinfronteras.org>
- McInnes, K. L., Walsh, K. J. E., Hubbert, G. D., & Beer, T. (2003). Impact of Sea-level Rise and Storm Surges on a Coastal Community. *Natural Hazards*, 30(2), 187–207.
- Nicholls, R. J., & Lowe, J. A. (2004). Benefits of mitigation of climate change for coastal areas. *Global Environmental Change*, 14(3), 229–244.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) (2010). Gestión del riesgo climático. Disponible en: <http://www.cornare.gov.co/planificacion-ambiental/gestio-del-riesgo>
- Villatoro, M., Silva, R., Méndez, F. J., Zanuttigh, B., Pan, S., Trifonova, E., Losada, I. J., Izaguirre, C., Simmonds, D., Reeve, D. E., Mendoza, E., Martinelli, L., Formentin, S. M., Galiatsatou, P., & Eftimova, P. (2014). An approach to assess flooding and erosion risk for open beaches in a changing climate. *Coastal Engineering*, 87, 50–76.

# CALENTAMIENTO DE AGUA PARA USO SANITARIO UTILIZANDO UNA PLANTA DE CONCENTRADORES CILINDRO-PARABÓLICO

**YURIDIANA ROCIO GALINDO LUNA, ROBERTO BEST Y BROWN, VICTOR HUGO GÓMEZ**

INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES, UNAM.

**JORGE DÍAZ SALGADO**

DIVISIÓN DE INGENIERÍA MECATRÓNICA E INDUSTRIAL,  
TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE ECATEPEC.

**ROSENBERG J. ROMERO**

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS, UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS.



## Resumen

El gasto de agua por sector en México muestra que las actividades agrícolas consumen un 76% de este recurso, seguido del abastecimiento público con un 14.4%, el cual contempla 38 hm<sup>3</sup> concesionados para el uso doméstico. El presente trabajo propone el calentamiento de agua para uso sanitario en regaderas, mediante una planta de colectores solares cilindro-parabólicos. La planta solar fue evaluada experimentalmente y es capaz de elevar la temperatura del agua de 22.7°C a 81.13°C, con una irradiancia directa máxima de 765 W/m<sup>2</sup>. El agua es almacenada en un termotanque de 300 litros, esta

cantidad es capaz de proveer agua para la ducha de 6 personas, logrando el aprovechamiento de este recurso aunado al ahorro de energía.

## Introducción

Derivado del ritmo acelerado de la urbanización, la demanda de agua en el mundo supera la disponibilidad de agua dulce, lo que provoca escasez de este recurso primordial. México recibe alrededor de 1,449,471 millones de m<sup>3</sup> de agua en forma de precipitación al año, de la cual; el 72.1% regresa a la atmósfera, 21.4% escurre por ríos o arroyos y el

6.4% se filtra al subsuelo. El gasto de agua por sector en 2018, muestra que las actividades agrícolas consumen un 76%, seguido del abastecimiento público con un 14.4%. Este último contempla 38 hm<sup>3</sup> concesionados para el uso doméstico. El aprovechamiento de este recurso aunado al ahorro de energía debe ser asuntos prioritarios (CONAGUA, 2018).

México posee un gran potencial para el uso y aprovechamiento de la energía solar. han desarrollado diversos prototipos de colectores solares los cuales pueden cubrir diferentes rangos de temperatura (Hernández-Magallanes *et al.*, 2014, p. 687). Los concentradores cilindro parabólicos (CCP) son capaces de alcanzar mediana temperatura entre 60–400°C. Esta tecnología solar ofrece alta eficiencia, la posibilidad de acoplamiento con otros sistemas, versatilidad y la facilidad de que algunos de sus componentes puedan ser fabricados localmente (Hafez *et al.*, 2018, p. 1217).

El presente trabajo propone el calentamiento de agua para uso sanitario en regaderas, mediante una planta de colectores solares cilindro-parabólicos ubicada en el Centro de Investigaciones en Ingenie-

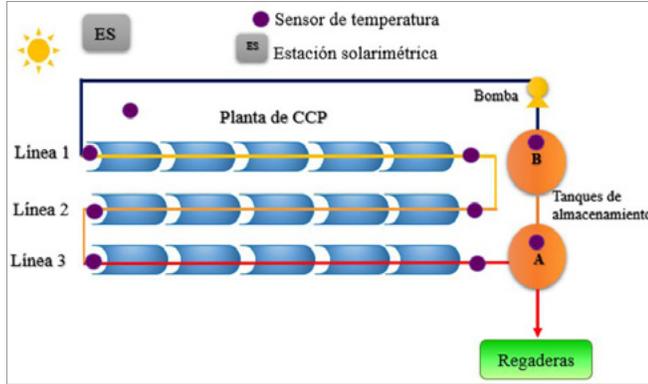
ría y Ciencias Aplicadas (CIICAp-UAEM). Con el objetivo de brindar el servicio durante la temporada de invierno, reduciendo efectos negativos al medio ambiente.

## Desarrollo

### Planta de Concentradores Cilindro Parabólico (CCP)

La planta de CCP consta de 15 dispositivos con las siguientes características: 2.44m de largo, 1.05m de ancho, 2.56m<sup>2</sup> área de apertura y 90° ángulo de borde. Estos dispositivos se encuentran distribuidos en 3 filas y conectados en serie. Cuenta con 2 termotanques almacenamiento con capacidad de 300 litros cada uno y el fluido de trabajo utilizado es agua (*Véase Figura 1*). Cada línea de concentración posee sensores (termopares tipo T) de temperatura a la entrada y salida, para censar el flujo se utilizó un flujómetro de turbina. Los rayos del sol se reflejan en el punto focal donde se encuentra el absorbente. Una fracción de la radiación solar se transfiere a un fluido, que fluye dentro del tubo absorbente, el fluido de trabajo recolecta la energía térmica incre-

Figura 1.



mentando su temperatura y es almacenada en un termotanque. La eficiencia térmica de esta planta se determina mediante la ecuación 1.

$$\eta_{t\acute{e}rmica} = \frac{\dot{m}C_p(T_{sal} - T_{ent})}{A_a G_b} \quad (1)$$

La anterior relaciona la cantidad de energía solar que el colector puede captar en función del área ( $A_a$ ) y la radiación directa ( $G_b$ ), con respecto a la energía transferida al fluido de trabajo; que contempla el flujo másico ( $\dot{m}$ ), su capacidad térmica ( $C_p$ )

y la diferencia de temperatura de salida y entrada. ( $T_{sal}$ ,  $T_{ent}$ ).

### Descripción del sistema

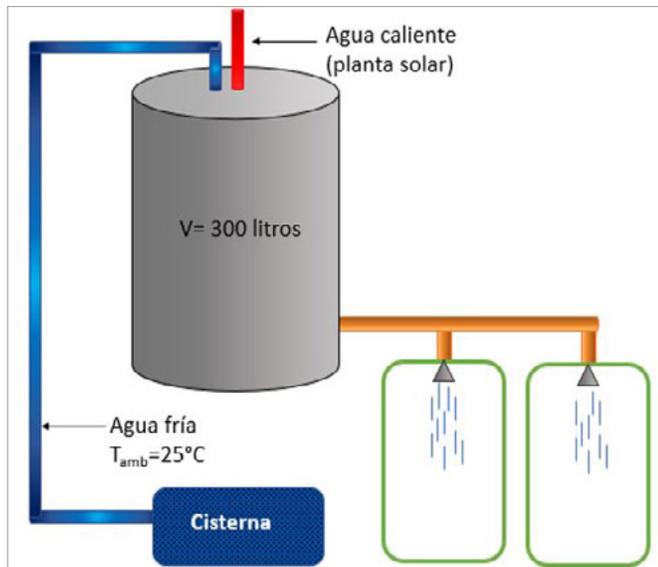
Se consideró un tanque con capacidad de 300 litros, el cual es llenado con agua de la cisterna del edificio, con una temperatura de alrededor de 22.7°C. Durante el día, esta agua es utilizada como fluido de trabajo en la planta de CCP, para después ser almacenada hasta que sea suministrada al servicio de regaderas, este análisis contempló 2 regaderas (Véase Figura 2).

La Norma Oficial Mexicana NOM-008-CNA-1998 especifica que, de acuerdo al tipo de regadera, el gasto mínimo será de 4 litros/minuto (CONAGUA,1998b, p.7). Este estudio consideró un tiempo de 10 minutos durante la ducha y pérdidas térmicas del 10% en toda la tubería.

### Resultados

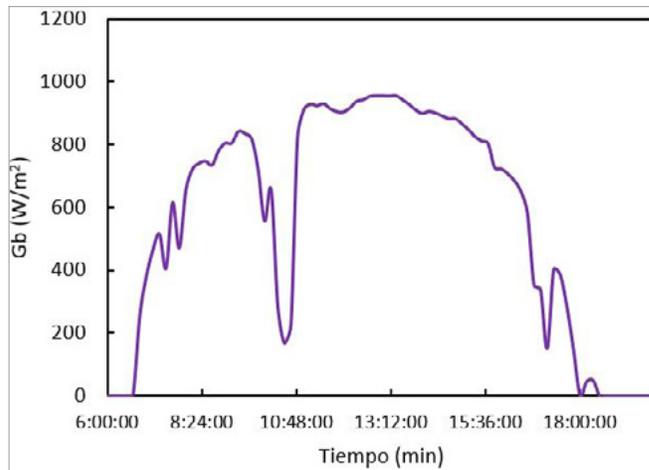
Las pruebas fueron realizadas en el siguiente horario de 9:30am a 3:00pm, lo anterior se debió a la disminución de la irradiancia directa ( $G_b$ ) después

Figura 2.



del mediodía solar. Para determinar la eficiencia térmica de la planta solar, se consideraron las temperaturas de entrada, ubicada en la línea 1, y la temperatura de salida, censada al final de la línea 3. Se realizaron varias pruebas, sin embargo, aquí se presentan las dos con mejores resultados .

Figura 3.



La primera fue realizada el 11 de septiembre de 2019, durante esta prueba el valor máximo de  $G_b$  fue de  $956 \text{ W/m}^2$  (Véase Figura 3). Las temperaturas alcanzadas durante el día se encuentran graficadas en la Figura 4, se observa en color azul el comportamiento de la temperatura al interior del termotanque, en verde y naranja, las correspondientes a la entrada y salida de la planta de CCP. La temperatura más alta que se alcanzó en el termotanque

fue de  $67.07^{\circ}\text{C}$  (Véase Figura 4). La eficiencia térmica de la planta solar fue calculada durante la operación, alcanzando un valor máximo de  $50.68\%$  (Véase Figura 5).

La segunda prueba fue realizada el día 18 de septiembre de 2019. La medición de la irradiancia directa fue registrada, alcanzando una máxima de  $765\text{ W/m}^2$  (Véase Figura 6). Durante la prueba se

registraron periodos de nubosidad que corresponden a los valores más bajos de  $G_b$ . La temperatura al interior del termotanque, la entrada y salida de la planta de colectores fueron registradas (Véase Figura 7). La temperatura del termotanque alcanzó los  $81.13^{\circ}\text{C}$  en su máximo nivel, mientras la eficiencia térmica fue determinada durante el periodo de prueba logrando un valor máximo de  $56.59\%$  (Véase Figura 8).

Figura 4.

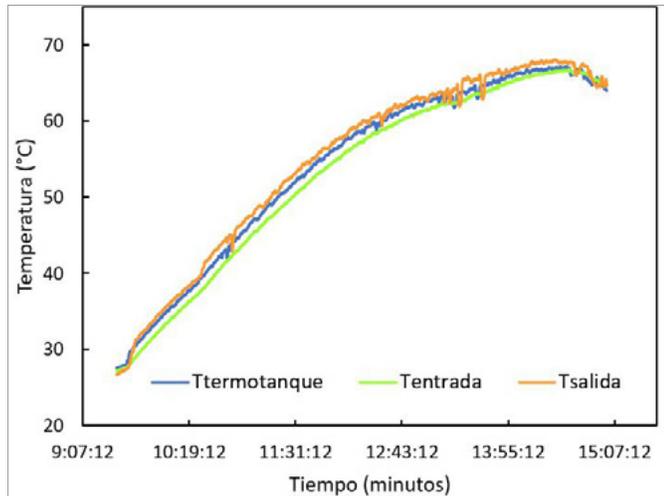


Figura 5.

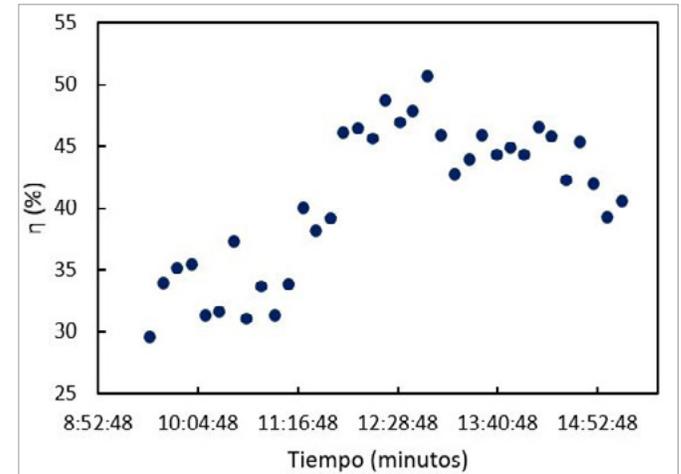


Figura 6.

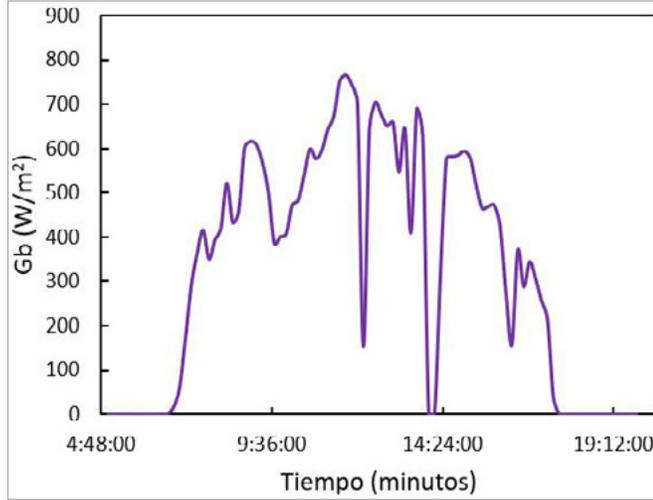
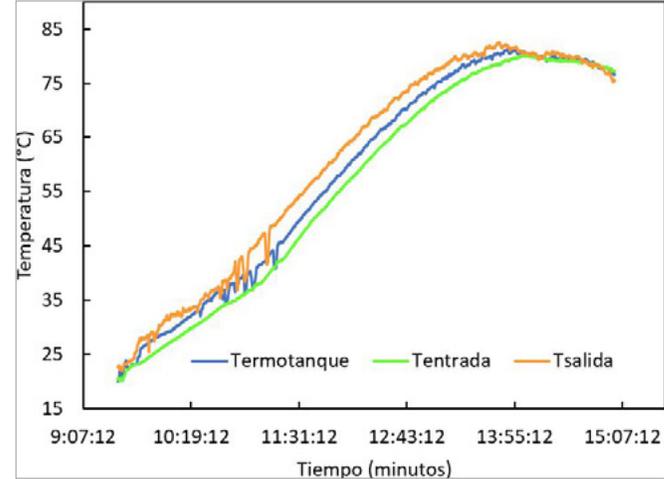


Figura 7.



## Conclusiones

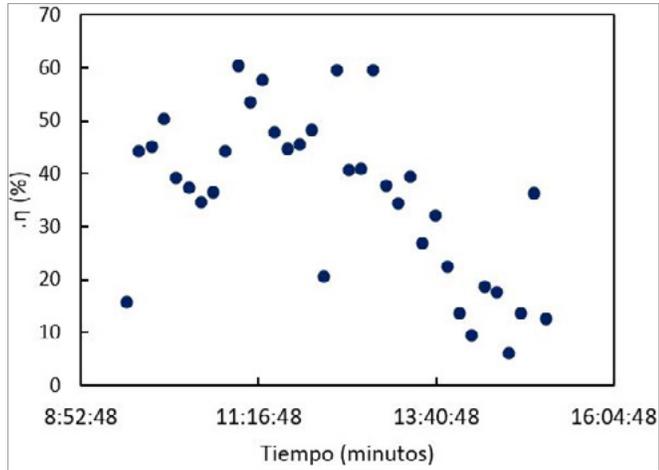
Las pruebas experimentales fueron realizadas durante los días 11 y 18 de septiembre de 2019, en las instalaciones de CIICAp-UAEM. Los resultados obtenidos nos permiten concluir lo siguiente:

- Se realizaron pruebas experimentales con la planta de CCP para el calentamiento de agua, la cual será suministrada a las regaderas. Se

consideraron valores de Gb en un rango de 700-1000 W/m<sup>2</sup>, típicos para los meses de diciembre, enero y febrero.

- La planta solar fue capaz de elevar la temperatura del agua desde una temperatura ambiente de aproximadamente 22.7°C hasta una temperatura máxima registrada al interior del termotanque de 81.13°C.

Figura 8.



- La eficiencia térmica máxima de la planta fue calculada en 56.59%.
- De acuerdo a la norma mexicana NOM-008-CNA-1998, la capacidad del tanque nos permite dar servicio de agua sanitaria para la ducha de 6 personas.
- El uso de la tecnología solar para el calentamiento de agua sanitaria disminuye el impacto

negativo al medio ambiente al evitar la quema de combustibles fósiles.

#### Bibliografía

CONAGUA, (2018), *Estadísticas del agua en México 2018*. Disponible en: [http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM\\_2018.pdf](http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf)

CONAGUA, (1998b), Norma Oficial Mexicana NOM-008-CNA-1998, Regaderas Empleadas en el Aseo Corporal. Especificaciones y métodos de prueba. Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/N8.pdf>

Hernández-Magallanes J.A., Domínguez-Inzunza L.A., Gutiérrez-Ureta G., Soto P., Jiménez C., Rivera W., (2014), Experimental assessment of an absorption cooling system operating with the ammonia/lithium nitrate mixture. *Energy*, 78, 685-692.

Hafez A.Z., Attia A.M., Eltwab H.S., Elkousy A.O., Afifi A.A., AbdElhamid A.G., AbdElqader A.N., Fateen S-E. K., El-Metwally K.A., Soliman A., Ismail I.M., (2018), Design analysis of solar parabolic trough thermal collector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1215-1260.

# DESTILACIÓN POR MEMBRANA PARA CONCENTRAR SOLUCIONES SALINAS UTILIZADAS EN SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO POR ABSORCIÓN

**JONATHAN IBARRA BAHENA, ULISES DEHESA CARRASCO,  
EDUARDO VENEGAS REYES**

INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA.

**WILFRIDO RIVERA GÓMEZ FRANCO**

INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.



## Resumen

Los sistemas de enfriamiento por absorción son dispositivos que pueden aprovechar fuentes de calor de bajo nivel térmico provenientes de energías renovables o calor de desecho industrial para su funcionamiento. Además, los fluidos de trabajo que utilizan tienen bajo impacto ambiental, por ejemplo, soluciones acuosas salinas. Una de las etapas de operación es la separación del fluido refrigerante de la solución salina, este proceso es conocido como desorción y, generalmente, se lleva a cabo por ebullición a presiones reducidas en intercambiadores de calor pesados y voluminosos. Una alternativa a la desorción con-

ventional es la destilación por membrana con espacio de aire (AGMD), la cual tiene la capacidad de desalinizar soluciones salinas altamente concentradas que otras tecnologías de membrana no pueden tratar. El objetivo del presente trabajo fue evaluar un nuevo tipo de desorberdor con la configuración AGMD para reemplazar a un desorberdor convencional en un sistema de enfriamiento por absorción.

## Introducción

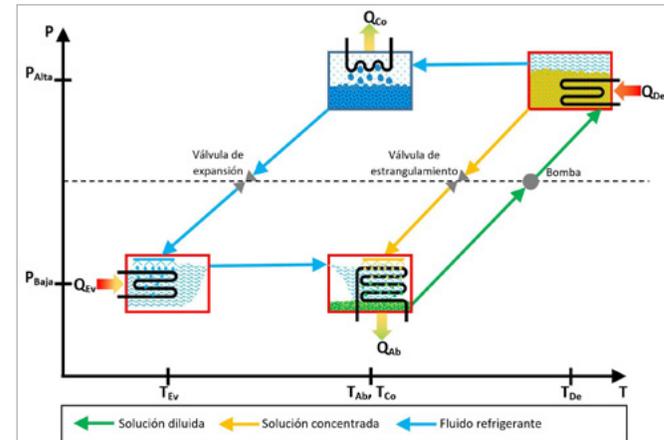
Los sistemas de enfriamiento por absorción (SEAs) son dispositivos que, a través de un ciclo termodi-

námico, producen un efecto de enfriamiento al evaporar un fluido refrigerante a bajas presiones. Un SEA consta de, al menos, los siguientes componentes: un desorbedor, un condensador, un evaporador, un absorbedor, una bomba, una válvula de expansión y una de estrangulamiento. Utiliza además una mezcla de trabajo que está integrada por un fluido refrigerante y un absorbente.

El funcionamiento de los SEAs es el siguiente: se suministra una cantidad de calor constante al desorbedor hasta alcanzar la temperatura de ebullición de la mezcla, así, una parte del fluido refrigerante es vaporizado; este proceso es conocido como desorción y ocurre a la temperatura y presión más altas del ciclo. El vapor del fluido refrigerante es conducido al condensador donde cede su calor latente de vaporización al ambiente y pasa a estado líquido. El fluido refrigerante líquido atraviesa una válvula de expansión, la cual divide el ciclo en dos zonas de presión. Posteriormente, se evapora en el evaporador a la presión más baja del ciclo. Para esto, el fluido refrigerante toma energía en forma de calor del ambiente y se genera el efecto de enfriamiento.

El vapor del fluido refrigerante es conducido hacia el absorbedor, donde se pone en contacto con la solución concentrada en absorbente que proviene del desorbedor. Este proceso se conoce como absorción y es exotérmico, por lo que libera una cantidad de calor al ambiente. La solución resultante, ahora diluida en absorbente, es bombeada al desorbedor para iniciar el ciclo nuevamente (véase Figura 1).

Figura 1. Diagrama Presión-Temperatura de un ciclo de enfriamiento por absorción.



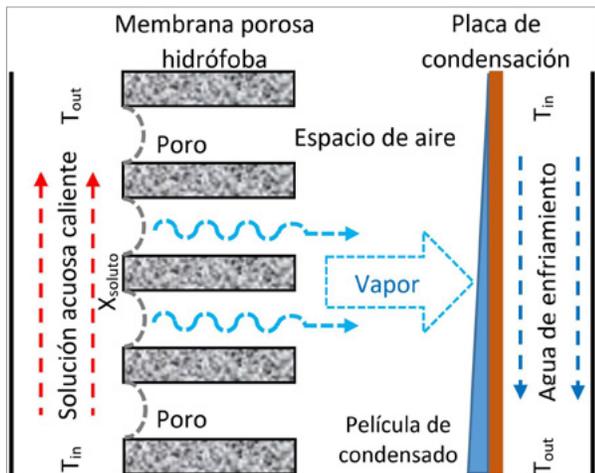
Las ventajas de los SEAs respecto a los sistemas de compresión mecánica de vapor son: pueden utilizar fuentes de calor de fuentes renovables o calor de desecho industrial, los fluidos utilizados son más amigables con el medio ambiente y requieren una mínima cantidad de energía eléctrica para funcionar (Boopathi Raja y Shanmugam, 2012). Uno de los usos a pequeña escala de los SEAs es la de utilizar el efecto de enfriamiento para condensar vapor de agua presente en el aire atmosférico y así producir agua potable (Anand y Murugavelh, 2020). Sin embargo, el inconveniente principal para esta aplicación es el tamaño de los componentes, especialmente del desorbedor, el cual suele ser pesado y/o voluminoso. Además, cuando se utilizan mezclas donde el agua es el fluido refrigerante y alguna sal es el fluido absorbente (por ejemplo  $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ ,  $\text{H}_2\text{O}/\text{CaCl}$ , etc.), los desorbedores deben ser herméticos, ya que operan a presiones menores a la atmosférica para disminuir el punto de ebullición de la mezcla (Ibarra-Bahena *et al.*, 2017).

Una alternativa a la desorción convencional por ebullición es la destilación por membrana. Este es

un proceso que se utiliza para separar una especie química volátil de una mezcla líquida homogénea. La fuerza impulsora es la diferencia de presión parcial causada por la diferencia de temperatura entre ambos lados de una membrana porosa e hidrófoba. La especie química volátil se evapora en el lado de la membrana que está en contacto con la solución acuosa, pasa a través de los poros y luego se condensa en una superficie fría en el otro lado de la membrana. La naturaleza hidrofóbica de la membrana evita que la solución acuosa penetre en los poros (Lawson y Lloyd, 1997).

La configuración utilizada fue la de destilación por membrana con espacio de aire (AGMD, por sus siglas en inglés), en la cual se inserta un espacio de aire entre la membrana y la superficie de enfriamiento (Figura 2). Las principales ventajas de ésta son: temperaturas de operación más bajas que la de ebullición de la mezcla, funciona a presión atmosférica y los dispositivos son más compactos (Izquierdo-Gil *et al.*, 1999). El objetivo del presente trabajo fue evaluar un desorbedor con la configuración AGMD para demostrar el potencial

Figura 2. Configuración AGMD.



del dispositivo para reemplazar a un desorbedor convencional en un SEA.

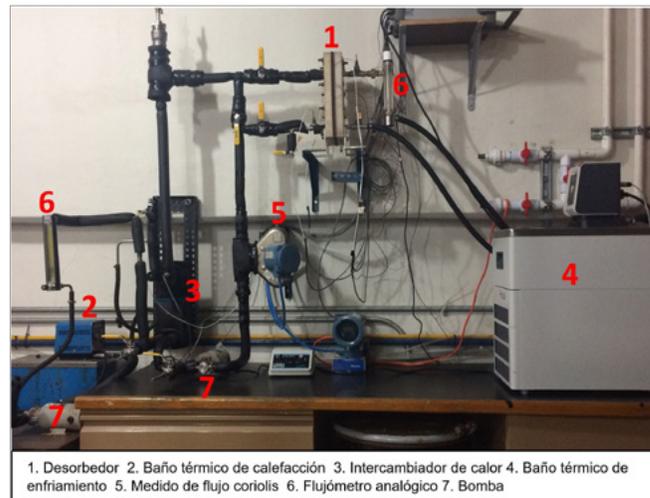
### Metodología

El desorbedor de membrana evaluado constaba de dos tapas de Nylamid de 80 mm de ancho, 180 mm de longitud y 25.4 mm de grosor; una membrana porosa hidrófoba de PTFE (politetrafluoroetileno)

con tamaño de poro de  $0.22 \mu\text{m}$ ; 3 sellos de silicón de alta temperatura de 3 mm de grosor; 2 sellos de neopreno de 1 mm de grosor; una malla metálica para soporte de la membrana; y una placa de aluminio de 0.3 mm de grosor. La Figura 3 ilustra la configuración del desorbedor.

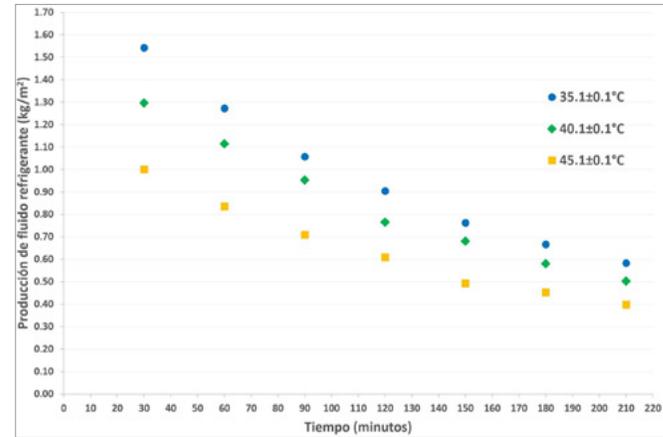
Se utilizó la mezcla  $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$  por ser la más utilizada en los SEA (Srikhirin et al., 2001). La

Figura 3. Arreglo experimental.



fuelle de calor fue un baño térmico de 1000 W de potencia eléctrica. Un intercambiador de calor de placas de acero inoxidable de 316 L se usó para calentar la solución de H<sub>2</sub>O/LiBr. La temperatura del agua de enfriamiento se mantuvo constante con un baño térmico de 2 kW. Se utilizó un medidor de flujo másico tipo Coriolis para la solución de H<sub>2</sub>O/LiBr. Los caudales volumétricos del fluido de calentamiento y del agua de enfriamiento se midieron con dos flujómetros analógicos. Se colocó un tapón de goma en el circuito de la solución de H<sub>2</sub>O/LiBr para extraer muestras y monitorear la concentración de LiBr, la cual se calculó con la correlación del índice de refracción (IR) reportada por Romero et al. (2006). Con un refractómetro electrónico se midió el IR de las muestras de solución. La cantidad de agua destilada (fluido refrigerante) se midió con una balanza electrónica. Se colocaron sensores de temperatura RTD pt100 en los puertos de entrada y salida del desorbedor y del intercambiador de calor. La Figura 4 muestra la configuración experimental. La Tabla 1 enlista las condiciones de operación experimentales.

Figura 4. Producción de fluido refrigerante.



Las condiciones descritas en la Tabla 1 son típicas en la operación de SEAs que utilizan calor de fuentes renovables (Li *et al.*, 2016).

## Resultados

El desorbedor de membrana operó por 3.5 horas. Se cuantificó la cantidad de fluido refrigerante producido así como el incremento de la concentración de LiBr en la solución al final de este periodo. Se

Tabla 1. Condiciones experimentales evaluadas.

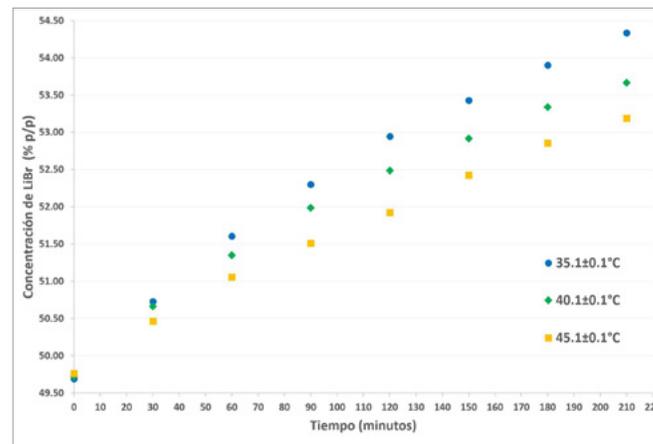
Variable	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Concentración inicial de LiBr (% p/p)	49.73 ± 0.03		
Flujo másico de la solución de H <sub>2</sub> O/LiBr (kg/s)	3.50x10 <sup>-2</sup> ± 5.00x10 <sup>-5</sup>		
Temperatura de la solución de H <sub>2</sub> O/LiBr (°C)	90.2 ± 0.1		
Flujo másico del agua de enfriamiento (kg/s)	3.07x10 <sup>-2</sup> ± 6.70x10 <sup>-4</sup>		
Temperatura del agua de enfriamiento (°C)	45.1 ± 0.1	40.1 ± 0.1	35.1 ± 0.1

produjeron 4.5, 5.9 y 6.8 kg/m<sup>2</sup> con las temperaturas de condensación de 45.1°C, 40.1°C y 35.1°C, respectivamente.

La cantidad de fluido refrigerante aumenta a medida que disminuye la temperatura de condensación, ver Figura 4. Esto es porque el potencial de presión aumenta cuanto mayor es la diferencia de temperatura entre ambos lados de la membrana. La concentración final de LiBr en la solución fue de

53.19%, 53.67% y 54.34% (p/p), para cada una de las temperaturas de condensación, respectivamente. Al igual que con la cantidad de fluido refrigerante, la concentración de LiBr aumenta a medida que disminuye la temperatura de condensación, ver Figura 5.

Figura 5. Aumento de la concentración de LiBr en la solución.



Con la cantidad de fluido refrigerante disponible es posible alcanzar temperaturas de enfriamiento de 11 °C (Ibarra-Bahena *et al.*, 2018), lo cual per-

mite que un SEA pueda usarse para aplicaciones de aire acondicionado y/o producción de agua potable a partir de humedad presente en el aire.

## Conclusiones

Se evaluó experimentalmente un nuevo tipo de desorbedor de membrana para aplicaciones en SEAs. Se demostró la aplicación de la destilación por membrana para procesos similares a la desalinización pero con soluciones altamente concentradas que otras tecnologías de membrana no pueden tratar. De acuerdo con los resultados, el desorbedor propuesto tiene un potencial de aplicación en SEAs para aplicaciones de aire acondicionado y/o producción de agua potable a partir de humedad presente en el aire.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a los proyectos PAPIIT-UNAM IT100920 y FORDECYT 297486.

## Bibliografía

- Boopathi Raja, V. y Shanmugam, V. (2012). A review and new approach to minimize the cost of solar assisted absorption cooling system. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 16, 6725-6731.
- Anand, B. y Murugavelh, S. (2020). Performance analysis of a novel augmented desalination and cooling system using modified vapor compression refrigeration integrated with humidification-dehumidification desalination. *J. Cleaner Production* 255,120224.
- Ibarra-Bahena, J., Dehesa-Carrasco, U., Romero, R. J., Rivas-Herrera, B., Rivera, W. (2017). Experimental assessment of a hydrophobic membrane-based desorber/condenser with H<sub>2</sub>O/LiBr mixture for absorption systems. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 88,145-159.
- Lawson, K. W. y Lloyd, D. R. (1997). Membrane distillation. *J. Membrane Sci.*124, 1-25.
- Izquierdo-Gil, M. A., García-Payo, M. C., Fernández-Pineda C. (1999). Air gap membrane distillation of sucrose aqueous solutions. *J. Membr. Sci.* 155, 291-307.

- Srikiirin, P., Aphornratana, S., Chungpaibulpatana, S. (2001). A review of absorption refrigeration technologies. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 5, 343-372.
- Romero, R.J., Basurto-Pensado, M. A., Jiménez-Heredia, A. H., Sanchez-Mondragón, J. J. (2006) Working fluid concentration measurement in solar air conditioning systems. *Sol. Energy* 80, 177-181.
- Li, Z., Jinga, Y., Liu, J. (2016) Thermodynamic study of a novel solar LiBr/H<sub>2</sub>O absorption chiller, *Energ. Buildings* 133, 565-576.
- Ibarra-Bahena, J., Rivera, W., Romero, R. J., Montiel-González, M., Dehesa-Carrasco, U. (2018) Novel intermittent absorption cooling system based on membrane separation process. *Appl. Therm. Eng.* 136, 718-729.

# DE LAS CUENCAS A LOS PAISAJES. ESTIMACIÓN DEL IMPACTO POTENCIAL DE LA CONTAMINACIÓN DIFUSA POR MÉTODOS SIMPLIFICADOS EN EL ÁREA DE PROTECCIÓN DE FLORA Y FAUNA, PICO DE TANCÍTARO, MICHOACÁN, MÉXICO

ALBERTO ORTIZ RIVERA

POSDOCTORADO. ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES CAMPUS MORELIA.



## Resumen

En este trabajo se calculó durante tres años el Índice Modificado de Contaminación No Puntual (MPNPI, por sus siglas en inglés) en el Área de protección de flora y fauna Pico de Tancítaro, Michoacán, con diferentes condiciones de precipitación 2004, 2007 y 2014. La forma de calcular el índice MPNPI requiere de cuatro indicadores: 1) de Uso del Suelo; 2) de Escorrentía; 3) de Distancia; y 4) de Precipitación Anual. Los resultados indican que las cuencas de coincidencia espacial durante los tres años son Chuanito, Chondo y Cutio al noroeste; San Francisco y Huandiestacato al norte; y Apo y

Cuenca Rodada al oeste; con categorías de potencial que van del Medio a Muy alto y, al interior sus respectivas Localidades Físico-Geográficas, XLIV, XVII y LX. Esta combinación permite delimitar zonas homogéneas dentro de la cuenca para priorizar áreas que requieren implementar medidas de mitigación de la contaminación difusa a los sistemas acuáticos.

## Introducción

El agua como recurso se ha convertido, en muchas regiones del mundo, en un factor limitante para la

salud humana, la producción de alimentos, el desarrollo industrial y el mantenimiento de los ecosistemas naturales y su biodiversidad; e incluso para la estabilidad social y política (Carabias y Landa, 2005, p. 15).

En todo el mundo se ha generado una preocupación sobre la contaminación difusa (dispersa o no puntual), que proviene de actividades de zonas agrícolas, urbanas e industriales. Los contaminantes de fuentes difusas del agua, aire y suelo incluyen: sedimentos, nutrientes, metales pesados, elementos traza, pesticidas, patógenos, productos farmacéuticos y otros químicos antropogénicos (Bravo-Inclán *et al.*, 2009, p. 1).

La utilización de indicadores e índices del medio ambiente se realiza en cualquier diagnóstico ambiental. El índice denominado *Potential Non-point Pollution Index* (PNPI) es una herramienta SIG que evalúa el impacto potencial de la contaminación difusa sobre los cuerpos de agua a escala de cuenca hidrográfica (Munafò *et al.*, 2005, p. 94). Se trata de un modelo cualitativo que, en su creación, emplea una metodología multicriterio y la mode-

lación física del territorio para la estimación de la contaminación difusa (Cecchi, *et al.*, 2007, p. 298). Requiere pocos datos de entrada y es sencillo de calcular e interpretar. Además, Contreras, *et al.* (2011) efectuaron modificaciones al PNPI al introducir un factor de precipitación, permitiendo añadir una caracterización anual e interanual al proceso. A esta versión se le denomina *Modified Potential Non-point Pollution Index* (MPNPI).

## Desarrollo

El Índice Modificado del Potencial de Contaminación Difusa (MPNPI) está compuesto por cuatro indicadores: 1) Indicador de Uso del Suelo (Land Cover Indicator = LCI); 2) Indicador de Distancia (Distance Indicator = DI); 3) Indicador de Escorrentía (Runoff Indicator = ROI); y 4) Indicador de Precipitación Anual (Annual Precipitation Indicator = API).

Se empleó el método propuesto por Munafò *et al.*, (2005) y la modificación establecida por Contreras *et al.* (2011). Ellos calculan el MPNPI de acuerdo con la ecuación 1.

$$\text{MPNPI} = (5 * \text{LCI} + 3 * \text{DI} + 2 * \text{ROI}) * \text{API} (1)$$

El LCI evalúa la contribución de la contaminación difusa potencial de los diferentes usos del suelo. Se emplearon los valores medios de referencia establecidos por Cecchi *et al.* (2007, p. 299).

El DI mide la distancia desde cada punto del área de análisis hasta el cuerpo de agua más cercano, considerando el gradiente topográfico. El DI se calculó a partir del Modelo Digital del Terreno (MDT), determinando la longitud de flujo descendente.

El ROI evalúa la capacidad del suelo para drenar el agua hacia la zona no saturada del suelo y se define por un coeficiente de escorrentía (Cr) corregido por un factor de pendiente (Cs).

El API es un factor que evalúa la variación temporal debida a la precipitación, determinando la precipitación anual de un determinado año en relación con la precipitación media anual de un período de estudio en cada sitio de la cuenca.

Posteriormente, en caso de ser necesario, los indicadores anteriores se convirtieron a formato raster y se normalizaron.

Finalmente, se aplicó álgebra de mapas con base en la ecuación 1 y se reclasificaron los valores

MPNPI en cinco categorías cualitativas de impacto potencial. Munafò *et al.*, (2005, p. 96) establece 5 clases de potencial, por su parte, Haupt (2009, p.78 ) categoriza estas clases por primera vez, sin embargo, no hay diferencia clara entre clases 2, 3 y 4, por lo tanto, se consideró renombrar estas categorías tomando en cuenta otros índices que ayuden a distinguir claramente un nivel de otro (*ver Tabla 1*).

**Tabla 1.** Categorías de clasificación del Índice MPNPI

Clases Munafò (2005)	Categoría Haupt (2009)	Categoría Ortiz y Fuentes (2020)	Rango
1	Bajo potencial	Muy bajo	MPNPI ≤ 4,5
2	Medio bajo potencial	Bajo	4,5 < MPNPI ≤ 5,5
3	Medio potencial	Medio	5,5 < MPNPI ≤ 6,5
4	Medio alto potencial	Alto	6,5 < MPNPI ≤ 7,5
5	Alto potencial	Muy Alto	MPNPI > 7,5

Fuente: Modificado Ortiz & Fuentes (2020, p. 214)

## Índice Modificado del Potencial de Contaminación Difusa (MPNPI)

Al comparar los tres años, el año con mayor presencia de esta problemática es 2004, esto debido a la condición de precipitación. Éste presenta mayor número de unidades cuenca-localidad con potencial Medio a Muy alto (que corresponden con las clases 4 y 5), en total 24 unidades; 19 de ellas con Muy alto potencial y 5 con Alto potencial. En la Tabla 2 se enlistan las unidades y en la Figura 1 se denota la ubicación espacial de las mismas. *Véase Figura 1*

Tabla 2. Unidades Cuenca-Localidad tomando como base el año de mayor precipitación (2004), con clases de MPNPI 4 Y 5

Cuenca-Localidad	ID	Área Km <sup>2</sup>	Media 04	clase MPNPI 04
Chuanito-XLIV	19	17.53	9.71	5
Chuanito-XVII	20	3.12	9.79	5
Chondo-XLIV	25	5.56	9.97	5
Chondo-XVII	27	14.07	7.86	5
Cutio-XLIV	2	4.67	10.09	5
Cutio-XVII	4	26.01	8.79	5

Cuenca-Localidad	ID	Área Km <sup>2</sup>	Media 04	clase MPNPI 04
San Francisco-XLIV	6	4.13	9.95	5
Huandiestacato-XLIV	11	5.16	9.31	5
Apo-LX	43	7.61	10.81	5
Apo-XVII	45	12.74	9.46	5
Cuenca Rodada-XVII	50	0.31	10.31	5
Cuenca Rodada-XXXIII	49	1.01	9.57	5
Cuenca Rodada-LX	47	23.38	10.01	5
Cuenca Rodada-X	48	3.68	7.35	4
Tancitaro-LX	34	32.43	8.95	5
Tancitaro-XXXIII	36	13.24	7.62	5
Tancitaro-XL	37	3.23	8.03	5
Zirimandiro-XL	32	7.62	7.29	4
El Chivo-XL	57	3.38	8.5	5
El Chivo-LX	56	17.81	7.29	4
La Gringa-LX	58	1.37	8.64	5
La Gringa-XL	59	11.11	7.98	5
La Culebra-XL	55	38.55	7.42	4
La Culebra-XXXII	54	4.86	6.51	4

Fuente: Modificado de Ortiz & Fuentes (2020, p. 214)

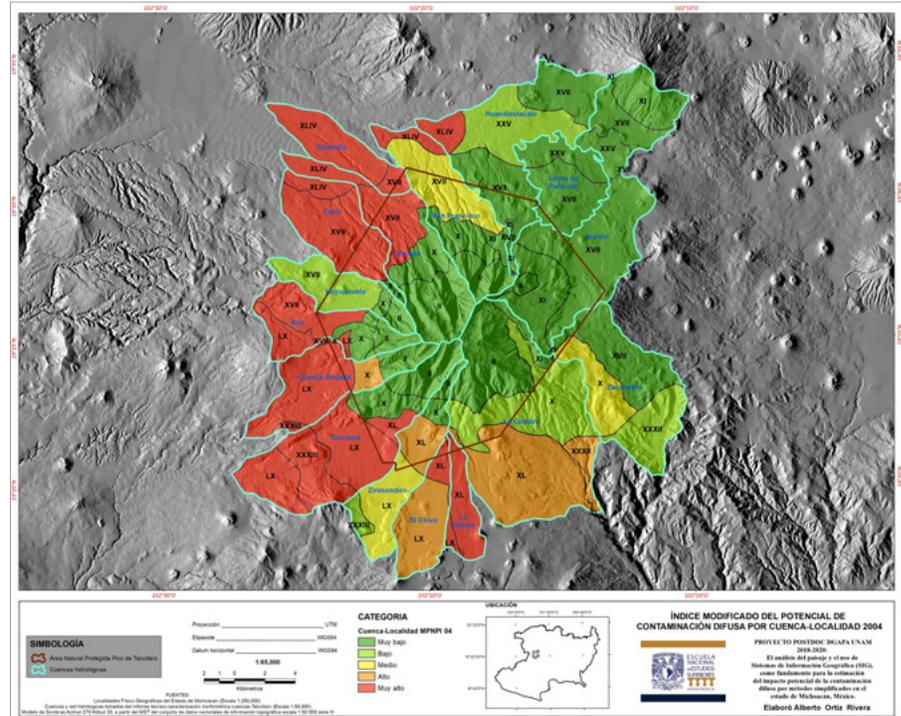
## Conclusiones

La aplicación del MPNPI ofrece una aproximación cualitativa de las áreas sensibles para la producción de contaminación difusa. Además, es aplicable a diferentes unidades de análisis o escalas, lo que contribuye a reducir tiempos, recursos de análisis en situaciones críticas y falta de datos.

La confiabilidad de la herramienta radica en la consulta de un amplio número de especialistas para la selección de los pesos de los indicadores y de los valores de los diferentes usos del suelo.

Aunque los estudios del tema se realizan bajo el contexto de cuenca, ésta es un sistema complejo, dinámico y abierto. Analizar los paisajes al interior

Figura 1. Mapa del MPNPI para cada unidad Cuenca-Localidad para el año 2004



Fuente: Ortiz & Fuentes (2020, p. 231)

de la cuenca permite reconocer unidades ambientales con cierta homogeneidad, que poseen características y una dinámica propia, lo que complementa el estudio de las cuencas.

A pesar de las fortalezas del instrumento, éste no indica el tipo específico de contaminante ni la cantidad que afecta a los diferentes sistemas acuáticos, además, solo es evidente en años en que la precipitación supere la precipitación promedio.

## AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a la DGAPA-UNAM, la beca posdoctorado 2018-2020, otorgada para la realización del proyecto “El análisis del paisaje y el uso de sistemas de información geográfica (SIG), como fundamento para la estimación del impacto potencial de la contaminación difusa por métodos simplificados en el estado de Michoacán, México.”

## Bibliografía

- Bravo-Inclán, L., Saldaña-Fabela, P., Izurieta-Dávila, J., & Mijangos-Carro, M. (2009). La importancia de la contaminación difusa en México y en el mundo. Revisado: 01 junio del 2019, de <http://www.atl.org.mx/images/stories/proyectos/contaminacion.pdf>
- Carabias, J. & Landa, R. (2005). Agua, medio ambiente y sociedad. Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México. México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México/El Colegio de México/Fundación Gonzalo Río Arronte.
- Cecchi, Giuliano., Munafò, Michele., Baiocco, Fabio., Andreani, Paolo & Mancini, Laura. (2007). Estimating river pollution from diffuse sources in the Viterbo province using the potential non-point pollution index. *Annali dell'Istituto superiore di sanità*. 43. 295-301. 43(3), 295-301.
- Contreras, E., Aguilar, C. y Polo, M. (2011). Método simplificado de estimación del potencial de contaminación difusa: Aplicación a las cuencas vertientes del estuario del Gualdavis. *Estudios en la Zona No Saturada del Suelo Vol. X. ZNS'11. Vol. 10. Pp. 217-222*
- Haupt, J. P. O. (2009). Metodología para avaliação do potencial de produção de poluição difusa: estudo de caso da

bacia do Rio Jundiaí. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. Revisado 21 abril 2019, de <https://doi:10.11606/D.3.2009.tde-20072009-173457> [www.teses.usp.br](http://www.teses.usp.br)

Martínez-Austria, Polioptro F. (2013). Los retos de la seguridad hídrica. *Tecnología y ciencias del agua*, 4(5), 165-180. Revisado 19 junio 2020, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222013000500011&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222013000500011&lng=es&tlng=es).

Munafò, M., Cecchi, G., Baiocco, F., & Mancini, L. (2005). River pollution from non-point sources: a new simplified method of assessment. *Journal of environmental management*, 77(2), 93-98. Revisado 10 diciembre 2018, de <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.02.016>

Ortiz-Rivera, A., & Fuentes-Junco, J. de J. (2020). Estimación del impacto potencial de la contaminación difusa por métodos simplificados en el Área de Protección de Flora y Fauna, Pico de Tancítaro, Michoacán, México. *Revista Geográfica De América Central*, 2(65), 207 - 238. Revisado 01 julio 2020, de <https://doi.org/10.15359/rgac.65-2.8>

# EXPOSICIÓN A FLUORURO Y ARSÉNICO EN AGUA: FUNCIÓN COGNITIVA EN ESTUDIANTES DE PRIMARIA DE COMUNIDADES MARGINADAS DE MÉXICO.

FRANCISCO ANTONIO RAMÍREZ ROJAS  
INSTITUTO NACIONAL DE SALUD PÚBLICA (INSP)



## Resumen:

La extracción intensiva de aguas subterráneas pone en riesgo de exposición a contaminantes geogénicos, como flúor ( $F^-$ ) y arsénico (As), a diversas poblaciones, incluida la infantil; en consecuencia, pueden presentar una amplia gama de efectos en la salud, como la limitación de la función cognitiva. La investigación estudia las relaciones entre causas, exposiciones a  $F^-$  y As y efecto en función cognitiva de población infantil de comunidades marginadas de México con antecedentes de presencia de  $F^-$  y As en suministros de agua subterránea.

Dada la co-ocurrencia de  $F^-$  y As en el acuífero, se emplearon herramientas de la Geología para conocer las regiones que se encuentran en mayor riesgo por características geológicas. Además, se apoya en múltiples líneas de investigación e integra la evidencia de un amplio número de áreas. Por tanto, el presente artículo plantea un enfoque de sistemas complejos.

## Introducción

El agua es un recurso esencial para la existencia de toda forma de vida. Para garantizar la salud humana

es primordial contar con ella de manera suficiente y con calidad adecuada, sin embargo, esta última puede comprometerse por la contaminación de agentes patógenos, productos químicos, tóxicos o radioactivos, ya sea por actividades antropogénica o por causas naturales.

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas, en 2015 el 50% de la población mundial se abastecía por medio de agua subterránea (WWAP, 2019). En México, la principal fuente de abastecimiento de agua es por medio de pozos, representando casi un 59%. El crecimiento demográfico y la explotación insostenible de recursos ha ocasionado la sobreexplotación de 20% de los acuíferos mundiales y la visualización de un panorama de carestía a futuro (WWDR, 2015; de Graaf *et al.*, 2017).

En comunidades marginadas, donde se requiere dotar del agua como recurso vital, se favorecen procesos de explotación intensiva de los acuíferos, lo que incide en la calidad del agua que se extrae de los pozos. Las características y conformaciones del estrato geológico provoca que el agua se pueda contaminar con F<sup>-</sup> y As, con su consiguiente efecto en

la salud de esas poblaciones (Limón-Pacheco *et al.*, 2018).

## Desarrollo

La revisión de literatura, tanto para el F<sup>-</sup> y As como para cada uno de los contaminantes por separado, describe efectos en la salud. De acuerdo con artículos de revisiones sistemáticas, epidemiológicos y toxicológicos, entre las afectaciones a la salud se encuentran las de la función cognitiva. Estos efectos son a nivel fisiológico al sistema nervioso central, al cerebro y a las capacidades cognitivas (Zuckerman *et al.*, 2014).

La exposición a F<sup>-</sup> y As en agua potable se da en regiones donde la fuente de abastecimiento es el agua subterránea extraída por pozos y que está contaminada geogénicamente. Esto ocasiona intoxicaciones crónicas que, conceptualmente, pueden delimitarse, por el lado del F<sup>-</sup>, en la fluorosis endémica o hidrofluorosis y, en el caso del As, en la arsenicosis o hidroarsenicosis (*ver Figura 1*).

La exposición simultánea a F<sup>-</sup> y As plantea un problema de salud pública complejo, no solo por

Figura 1: Estrés hídrico



Elaboración Propia

los efectos poblacionales de exposición a la hidrofluosis e hidroarsenicosis derivados del consumo de agua, sino también por los contextos sociales, económicos y culturales, considerando la perspectiva del ciclo natural del agua.

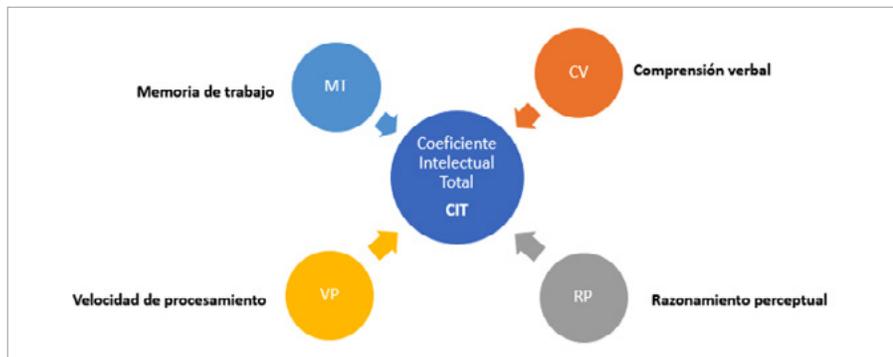
La exposición a estos elementos en población infantil puede afectar sus funciones cognitivas y comprometer su desarrollo cognitivo. La literatura permite establecer dosis de referencia para ambos contaminantes, sin embargo, aunque en muchos estudios se hace referencia al F<sup>-</sup> y As, los efectos de exposición simultánea y posiblemente sinérgicos no

han sido lo suficientemente desarrollados (Lia *et al*, 2009; Carroll; 1994).

El desarrollo infantil engloba cambios psicológicos y biológicos que ocurren entre el nacimiento y la adolescencia. Estos cambios incluyen habilidades socioemocionales y locomotoras, el lenguaje y la función cognitiva. El desarrollo de la función cognitiva en la infancia no está determinado únicamente por aspectos como la nutrición o el crecimiento natural de los niños (Lia *et al*, 2009; Wechsler, 2007; Carroll; 1994).

La exposición a contaminantes como el F<sup>-</sup> y As en edades tempranas, inclusive desde la gestación, en combinación con un ambiente psicosocial negativo, comprometen el desarrollo de la función cognitiva de los niños (Lia *et al*, 2009). El concepto de inteligencia resume y refleja de manera ponderable cuantitativamente, tanto el estado de desarrollo como posibles afectaciones en alguna de las funciones cognitivas específicas que lo integran (*ver Figura 2*): memoria de trabajo, comprensión verbal, razonamiento perceptual y velocidad de procesamiento (Wechsler, 2007)

Figura 2: Funciones cognitivas



Elaboración Propia

La población infantil es más vulnerable y susceptible a la afectación de la función cognitiva. De hecho, se estima que 6.5 millones de niños en México están en riesgo de verse afectados en su salud por la exposición crónica a F<sup>-</sup> y As en agua potable proveniente de pozos. Un gran número de pozos se encuentran en regiones de México donde se ha reportado, desde el 2016, la presencia de contaminación por F<sup>-</sup> y As. Como consecuencia, la afectación en la función cognitiva de los niños es un problema latente.

Los efectos en la función cognitiva en niños por exposiciones simultáneas a F<sup>-</sup> y As por medio del agua no han sido suficientemente estu-

diados, por lo que el presente trabajo busca aportar conocimientos sobre el tema.

El estudio persigue estimar las poblaciones con características sociodemográficas y geológicas similares para elaborar un modelo de riesgo ambiental que permita predecir posibles exposiciones dañinas a la salud y proponer acciones de mitigación y prevención de riesgos.

Hasta el momento, los enfoques de estudio de esta problemática de salud parten de análisis individuales de cada contaminante, aunque no suficientemente la interacción entre F<sup>-</sup> y As. Tanto en estudios toxicológicos como en epidemiológicos se ha discutido la necesidad de investigar de manera detallada la exposición

simultánea a F<sup>-</sup> y As. Por tanto, el objetivo central de la investigación es evaluar la asociación entre niveles de exposición a F<sup>-</sup> y As y la probable afectación de la función cognitiva de una población infantil en comunidades marginadas de México (*ver Figura 3*).

Se medirán de manera directa niveles de exposición simultánea a F<sup>-</sup> y As en biomarcador (orina) en población infantil. Además, se estimará de manera indirecta, por medio de modelos, la magnitud de exposición simultánea a F<sup>-</sup> y As de quienes no se tienen marcadores biológicos, pero sí matrices ambientales, como mediciones de concentración de F<sup>-</sup> y As en la fuente de suministro o con datos geológicos.

Figura 3: Ejes metodológicos



Elaboración Propia

Se evaluará, por medio de pruebas psicométricas, la función cognitiva de población infantil dentro de su ambiente psicosocial. Con la información obtenida de mediciones, evaluaciones y estimaciones, se analizará la asociación entre exposición simultánea y potencialmente sinérgica a F<sup>-</sup> y As y la función cognitiva de la población infantil.

### Resultados esperados

El estudio permitirá estimar, con razonable certeza, regiones con mayor riesgo de exposición a F<sup>-</sup> y As en agua con características geológicas

particulares. Además, hará posible reconocer el fenómeno de la exposición simultánea al F- y As y aportará evidencia para la toma de decisiones en materia de políticas públicas y la discusión sobre la pertinencia de la extracción de agua de acuíferos.

Los resultados esperados podrán ser utilizados por otros profesionales de salud, en otras regiones del mundo, donde poblaciones similares están siendo afectadas por la exposición en agua a F- y As, o, inclusive, por otros contaminantes geogénicos similares en agua. Estas metodologías podrían replicarse, adaptarse u homologarse.

## Bibliografía

WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de la UNESCO). 2019. Informe Mundial de las Naciones Unidas.

WWDR. 2015. Informe Mundial de las Naciones Unidas Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo.

de Graaf IEM, van Beek RLP, Gleeson T, Moosdorf N, Schmitz O, Sutanudjaja EH, et al. A global-scale two-layer transient groundwater model: Development and application to groundwater depletion. *Adv Water Resour.* abril de 2017;102:53-67.

Limón-Pacheco JH, Jiménez-Córdova MI, Cárdenas-González M, Sánchez Retana IM, Consebatt ME, Del Razo LM. Potential Co-exposure to Arsenic and Fluoride and Biomonitoring Equivalents for Mexican Children. *Ann Glob Health.* 27 de julio de 2018;84(2):257-73.

Zuckerman M, Harper K, Barrett R, Armelagos G. The evolution of disease: anthropological perspectives on epidemiologic transitions. *Glob Health Action.* diciembre de 2014;7(1):23303.

Lia C. H. Fernald, Ph.D. Patricia Kariger, Ph.D. Patrice Engle, Ph.D. Abbie Raikes, Ph.D. Examining Early Child Development in Low-Income Countries: A Toolkit for the Assessment of Children in the First Five Years of Life. Washington DC 20433: The world Bank Human Development Group,20009

David Wechsler. Tr. por Gloria Padilla Sierra. WISC-IV Escala Wechsler de Inteligencia para Niños-IV. Traducción de wechlerintelligence escale forChildren. Av. Sonora núm. 206, Col. Hipodromo, Déleg. Cuauhtémoc, México D.F. : El Manual Moderno;2007

John B. Carroll, Human cognitive abilities A survey of factor-analyticstudies, Universidad de Cambridge 1994

## APROXIMACIONES PARA CARACTERIZAR EL CICLO HIDROSOCIAL DEL AGUA URBANA DESDE LA ECONOMÍA ECOLÓGICA.

**GRISELDA MARTÍNEZ ROMERO**

**SALVADOR PENICHE CAMPS**

UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA. CENTRO UNIVERSITARIO DE CIENCIAS SOCIALES Y HUMANIDADES (CUCSH) DOCTORADO EN GEOGRAFÍA Y ORDENACIÓN TERRITORIAL Y DEPARTAMENTO DE ECONOMÍA, CENTRO UNIVERSITARIO DE CIENCIAS ECONÓMICAS ADMINISTRATIVAS (CUCEA)



### Resumen:

La gestión del agua del territorio se ha convertido en un factor limitante para llegar a una sustentabilidad urbana en México. Algunas posturas sobre la gestión han generado la crisis hídrica actual, sin embargo, otros enfoques integrales son ignorados en la práctica. En éstos convergen aspectos sociales, biofísicos y económicos con el entendimiento del agua como parte de una naturaleza sistémica y cíclica. El objetivo de este escrito es realizar un acercamiento teórico desde la Economía Ecológica, que comprende el binomio del ciclo hidrosocial y meta-

bolismo social, para estructurar el análisis teórico-conceptual de las dinámicas del agua del territorio

*Palabras clave: ciclo hidrosocial, economía ecológica, metabolismo social, cuenca hidrográfica.*

### Introducción:

Los enfoques actuales de gestión resultan ser parciales debido a sus raíces epistémicas de conceptualización, valorización y manejo de la naturaleza, particularmente del agua.

Desde la Economía Ecológica, se comprende que el discurso hegemónico de la sustentabilidad promueve un crecimiento económico sin considerar las condiciones ecológicas y termodinámicas que establecen límites en la apropiación de la naturaleza (Leff Zimmermann, 1998; Martínez Alier, 2015; Vandana Shiva, 2017, Peniche 2019).

El entendimiento de las dinámicas biofísicas y socioculturales hídricas de los distintos territorios son parte medular del ciclo hidrosocial en las áreas urbanas, donde la comprensión del agua del territorio de la cuenca hidrográfica (CH) es aún difusa para estructurar enfoques integrales de gestión hídrica que guíen a la planeación de ciudades sustentables. En este escrito se desarrolla un acercamiento teórico de lo que compone el entramado del ciclo hidrosocial y los componentes del metabolismo social-urbano.

### **Desarrollo:**

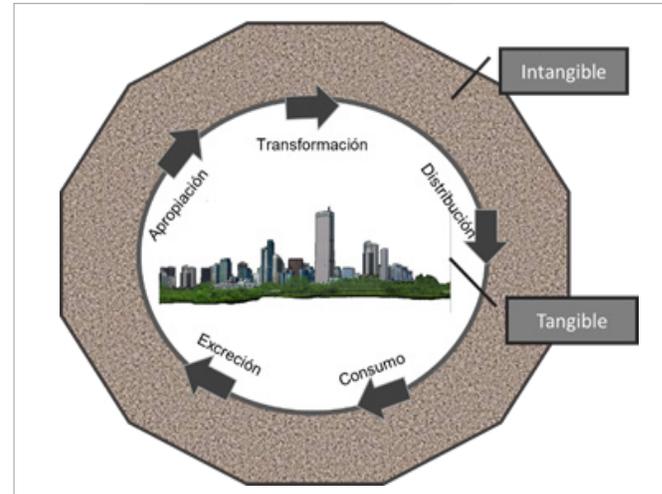
La relación del ciclo hídrico en la cuenca hidrográfica y el metabolismo social.

El ciclo hidrosocial es resultado de las interacciones antropogénicas con el medio biofísico. Se comprende como una simbiosis del metabolismo hídrico y el metabolismo social de las ciudades. Se desarrolla dentro del espacio biofísico de la CH, la cual puede describirse como un conjunto de elementos biofísicos sistémicos interrelacionados cuyo objetivo principal es la circulación del agua para la producción de vida. Cada cuenca tiene características biofísicas particulares (geomorfología del suelo, clima, cobertura vegetal, flora y fauna). Además de ser unidades funcionales, los límites definidos y salidas puntuales están estructuradas por un parteaguas y delimitadas jerárquicamente (Maass Moreno, 2005). El metabolismo sistémico de la cuenca permite la continuidad de los procesos bioquímicos, particularmente la deposición de Nitrógeno y Carbono en el suelo, que son asociados directamente al funcionamiento de los ecosistemas como nutrientes clave para el crecimiento de la vegetación (Ochoa Hueso, 2016:4).

Por otra parte, la suma de actividades productivas que mueve a millones de personas año

con año en un ciclo de consumo capitalista, están basadas en la explotación de la naturaleza debido a una marcada racionalidad económica hegemónica. Marx (1971: 71) definió al Metabolismo Social, *Stoffwechselzusammenbruch*, como el “intercambio entre sociedad y naturaleza”. Por su parte, Toledo lo describe como la relación de los procesos naturales y los procesos sociales de producción en un determinado contexto, que generan dinámicas amenazantes para la vida humana (Toledo Manzur 2013:50; Martínez-Alier, 1998:22). Las acciones del metabolismo social, particularmente en las áreas urbanas, son el reflejo de la producción y consumo actual, que se expresan en la apropiación antropocéntrica de materiales y energías. Específicamente, los flujos de energía y materiales se dan en un ciclo de flujos de entrada (*input*), flujos interiores y los flujos de salida (*output*). Dentro de este sistema, las energías y materiales circulan, se transforman y consumen. Toledo describe las fases del metabolismo social en cinco fenómenos que son teórica y prácticamente distinguibles y relacionados: 1) apropiación; 2) transformación; 3) circulación; 4) consumo; y 5)

Figura 1. Metabolismo social-urbano



Fuente: Elaboración propia adaptado de Toledo (2013).

excreción. Identifica además tres “campos” de estudio del metabolismo social: agrario o rural, urbano e industrial. Cada uno de ellos se centra en uno o más de los procesos que forman la cadena metabólica (Véase figura 1) (Toledo Manzur 2016; 4).

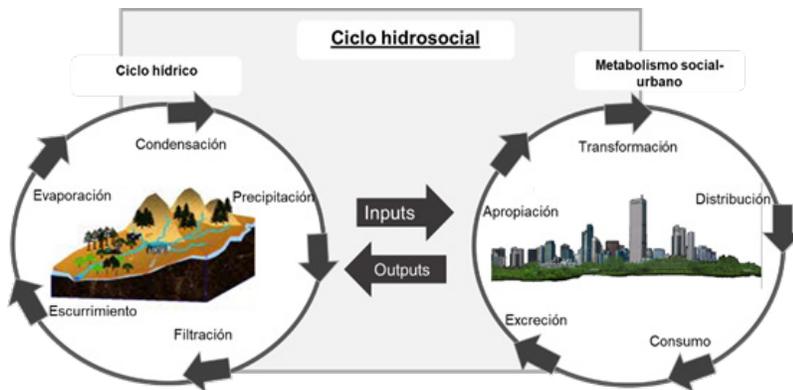
El metabolismo social también se compone de procesos metabólicos intangibles. Toledo lo considera como la parte inmaterial o invisible contenedora, es decir, todo aquello socio-cultural que se expresa con imaginarios y valorizaciones, sustentadas en una serie de creencias y cosmovisiones de sesgos culturales en un contexto histórico específico (*Véase figura 2*) (Toledo Manzur; 2013:54). En el metabolismo de las ciudades circulan, además de los flujos hídricos del sistema natural de la cuenca hidrográfica, los flujos de energía y materiales tangibles e intangibles, en un ciclo que se vuelve híbrido. En las urbes, las sociedades

dependen del agua del territorio local y se desarrollan múltiples necesidades para su gestión.

### El ciclo hidrosocial en las áreas urbanas.

Para Swyngedouw (2013), el ciclo hidrosocial se presenta como la suma de los procesos metabólicos biofísicos, la dirección de los flujos hídricos y la influencia que ejercen los actores implicados. El ciclo hidrosocial tiene diferentes precedencias y tipologías hídricas, dependiendo de los aportes del agua y las características contextuales, particularmente en un ciclo continuo. El flujo hídrico puede comenzar con la disponibilidad de agua en el territorio de forma natural, el líquido aplicado en la agricultura, el agua

Figura 2.Ciclo hidrosocial



Fuente: Elaboración propia con base a Toledo (2013) y Peniche (2019).

virtual, el abastecimiento en la vivienda, la industria, el comercio y la que termina desechada al drenaje (Simón Ruiz et, al 2020:56).

En el ciclo hídrosocial de la CH, el agua es intervenida por las acciones del metabolismo social de las ciudades. Cada uno de los procesos del ciclo hídrico (precipitación, escorrentía, infiltración, evaporación, sublimación y condensación) pasan por una disrupción que genera un reajuste en su dinámica sistémica (Swyngedouw, 2013). Estas alteraciones en el flujo y almacenamiento del agua del territorio provocan impactos difíciles de cuantificar y caracterizar en su totalidad. Se les puede considerar como parte de una fractura del sistema que ocasiona una irrupción biofísica y bioquímica relacionada con los sistemas hídricos, debido a fenómenos urbanos asociados al cambio climático como: modificación de dirección de los escurrimientos pluviales por cambio de uso de suelo, afectación en el volumen en las áreas de la cuenca, crecimiento habitacional y poblacional, entre otros.

La fractura metabólica, de la que dan cuenta Foster et al. (2002:3), se ve representada en el ciclo hídrico de la cuenca hidrográfica con la modificación de la cantidad de flujo y distribución del agua, de acuerdo al metabolismo social existente. Así, las irrupciones en los ecosistemas que evolucionaron en el planeta y dieron paso a la vida que existió durante todas las etapas geológicas de la tierra, se deben a la racionalidad económica hegemónica del metabolismo social-industrial-urbano, en una serie de valorizaciones en búsqueda del desarrollo sin límites biofísicos (Peniche Camps, 2019:94). Las formas de interacción de la población en esta era geológica se caracterizan por patrones de producción y consumo a expensas del metabolismo natural de los ecosistemas existentes en el planeta.

### **Conclusiones:**

El ciclo hídrosocial adquiere un significado teórico y metodológico que explica la estructura de una relación dinámica de dependencia de los seres humanos con la naturaleza. En este sentido, la

valoración del espacio físico por la presencia de agua pasa a ser una relación con el territorio en la CH, donde se articulan actividades a nivel cultural, económico y social. Este vínculo entre lo hídrico y lo sociocultural es complejo de representar si no se definen, desde un punto de vista epistemológico, las múltiples interrelaciones, pero también las interacciones multicausales y multicontextuales. La relación de las acciones antropogénicas del metabolismo social de las ciudades con el ciclo hídrico de las CH, puede analizarse a partir de las formas de producción y consumo, pues es ahí donde se han maximizado los factores que han ocasionado la crisis ambiental, sin dejar a un lado el espacio geográfico y el análisis sociocultural. El análisis hídrico desde la Economía Ecológica consiste en comprender y preservar los equilibrios ecológicos que permiten la vida en el planeta para que los servicios ambientales que presta el medio biofísico sean utilizados armónicamente (Peniche Camps 2019:94).

### Referencias bibliográficas

- Clark, Brett y Bellamy Foster, J (2012). Imperialismo ecológico y la fractura metabólica global. Intercambio desigual y el comercio de guano/nitratos. Revista Theomai, n. 26. Argentina.
- Leff Zimermann, E. (1994). Sociología y ambiente: Formación socioeconómica, racionalidad ambiental y transformaciones del Conocimiento. Siglo XXI, México.
- Martinez-Alier, J. (1998) Curso de Economía Ecológica. Fondo de Cultura Económica. México.
- Martínez-Alier, J., y Muradian, R. (2015). Handbook of ecological economics. Edward Elgar Publishing, Inc. Massachusetts USA.
- Maass, Moreno M. (2005). Principios Generales sobre Manejo de Ecosistemas. Centro de Investigaciones en Ecosistemas, UNAM. Morelia, Michoacán.
- Marx, Karl, (1971) Formas que preceden a la producción capitalista, Cuadernos del Pasado y Presente. Córdoba, Argentina,
- Toledo, V. M. (2013) El metabolismo social: una nueva teoría socioecológica. Revista Relaciones. Estudios de Historia y Sociedad, XXXIV (136), 41–71. CIECO, UNAM.

- (2016) Metabolismos rurales: hacia una teoría económico-ecológica de la apropiación de la naturaleza. *Revista Iberoamericana de economía ecológica*. VOL, 7. 1-26.
- Ochoa-Hueso, R. (2017). Consecuencias de la deposición de nitrógeno sobre la biodiversidad y el funcionamiento de los ecosistemas terrestres: Una aproximación general desde la ecología de ecosistemas. *Revista Ecosistemas*, número 26.
- Swyngedouw, E., (2013). Into the sea: desalination as hydro-social fix in Spain. *Annals of the Association of American Geographers*, 103(2), 261–70.
- Simón Ruiz I. y Aravena Rodríguez B. (2020) El ciclo hidrosocial. Una propuesta de didáctica desde la historia, la geografía, las ciencias sociales y la educación para la ciudadanía. Universidad Autónoma de Chile. Santiago Chile.
- Peniche, S. (2019). Desarrollo sustentable radical. Práctica, método y teoría. Universidad de Guadalajara. Guadalajara Jalisco.
- Vandana, S. (2017). ¿Qué es la economía ecológica? 99 Preguntas y 99 Experiencias para aprender a vivir en un mundo justo y sostenible. *Ecologistas en Acción*. Madrid España.

# LA CERVECERA TRANSNACIONAL *CONSTELLATION BRANDS* Y LA POLÍTICA PÚBLICA CREADA DESDE EL PODER ESTATAL PARA INSTALARLA EN MEXICALI

**MILTHON MINOR MONTES**

MAESTRO EN COMUNICACIÓN, REPORTERO MEXICALENSE Y ESTUDIANTE DEL DOCTORADO EN ESTUDIOS CIENTÍFICO SOCIALES POR EL ITESO, UNIVERSIDAD JESUITA DE GUADALAJARA.



## Resumen

En el presente artículo se analiza la llegada de la empresa transnacional *Constellation Brands* a Mexicali en 2015 y el apoyo obtenido desde el Gobierno del Estado de Baja California para su instalación, a pesar del conflicto socioambiental generado en la comunidad a partir de 2017, en la que un grupo de ciudadanos se manifestaron en contra de la entrega de agua que eso representaba. La firma exportaría cervezas de las marcas Modelo y Corona a Estados Unidos, lo que ha sido considerado como extractivismo hídrico (Kauffer, 2018). La obra fue detenida

en marzo de 2020 por el Gobierno federal. El análisis se realiza a través de la teoría de generación de políticas públicas (Merino, 2013).

## Introducción

El agua es un elemento necesario para la vida humana, los ecosistemas y el desarrollo social, cultural y económico de los países, lo que provoca que su demanda mundial haya crecido en las últimas décadas del siglo XX y principios del XXI. Ante una futura o presente crisis de escasez, generada por

el crecimiento poblacional y por el cambio climático, se ha pronosticado que las siguientes guerras entre países serán por el recurso hídrico, en busca de su privatización y control. En este contexto, resulta importante el estudio de los conflictos socio-ambientales desde diversas dimensiones analíticas.

El presente documento plantea el apoyo del Gobierno del Estado de Baja California (2013-2019) a la instalación de la cervecera transnacional *Constellation Brands*, en Mexicali, Baja California, como una política pública de atracción de inversión extranjera directa. En el periodo de 2015 a 2019, las autoridades estatales establecieron diversas acciones legales (decretos de ley), proyectos de infraestructura logística e hidráulica, programas hídricos estratégicos y promoción mediática con el propósito de lograr la inversión de al menos 1 mil 400 millones de dólares por parte de la compañía estadounidense en el municipio. Este apoyo se dio a pesar de la preocupación de la comunidad que generó un movimiento socio ambiental en contra de la privatización del agua desde 2017 (Martínez, 2019). Al iniciar operaciones, la firma produciría,

con agua del valle de Mexicali, hasta 5 millones de hectolitros de cerveza para exportar a su país matriz.

De acuerdo con Merino (2013), las decisiones que realiza el Estado para solucionar un problema se convierten en una política pública. Con base en este criterio, este artículo establece que la instalación de la planta se convirtió en un asunto de agenda pública del gobernador panista Francisco Vega de Lamadrid (2013-2019). Con esta medida, el Estado dio prioridad a la Ley de Competitividad y Desarrollo Económico, que establece a la atracción de inversión extranjera como un objetivo, y dejó atrás el derecho humano al agua que, desde 2012, se encuentra determinado en el artículo 4to de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (CNDH, 2020).

Después de tres años de lucha, la presión de los movimientos sociales, intensificada con el cambio de gobierno federal en 2018 que ha mostrado una visión “anti-neoliberal”, logró que el presidente Andrés Manuel López Obrador (2018-2024) prescribiera la realización de una consulta pública para determinar la conclusión o no de las instalaciones

de la factoría. Ésta se efectuó el 21 y 22 de marzo de 2020. En ella participaron 36 mil 782 ciudadanos de Mexicali, de los cuales el 76.1% indicaron estar en contra de que siguiera la obra, por lo que fue cancelada.

### El contexto Mexicali

Mexicali es la capital de Baja California. El municipio está ubicado al noroeste del país y tiene frontera al norte con el condado de Valle Imperial, California, Estados Unidos de América. Su geografía le permite tener puertos de ingreso y salida de mercancías hacia el país vecino. Es una región semiárida, con características desérticas y temperaturas de hasta de 50 grados centígrados en el verano. Paradójicamente, desde su fundación se ha convertido en un valle fértil gracias al agua que recibe cada año del río Colorado y que fue delimitada en cantidad por el Tratado de Límites y Aguas de 1944<sup>1</sup>.

El origen económico de Mexicali fue el sector agrícola, específicamente el monocultivo del algodón. Durante la segunda mitad del siglo XX se agregaron las actividades económicas de los sectores industrial y maquilador de exportación, principalmente dirigido al mercado de Estados Unidos.

Desde 2015, la firma transnacional *Constellation Brands* buscó ubicar su producción en Mexicali para, de esta forma, aprovechar el agua local y transformarla en cervezas de las marcas Corona y Modelo para su exportación a los Estados Unidos. De acuerdo con su último informe, la marca buscaba utilizar en su proceso de producción al menos 8 millones de metros cúbicos de agua anuales, sin embargo, hay otras versiones en las que la firma asegura requerir hasta 20 millones, extraídos de los acuíferos sobreexplotados del Valle de Mexicali (Cortez, 2019b). De acuerdo con Cortez (2019a, p. 7), esto representa “un uso insostenible del agua en una zona árida amenazada por la escasez”. La agroregión que sería afectada se conforma por 207 mil hectáreas de siembra de cultivos como trigo, algodón, alfalfa, maíz de pollo, sorgo, hortalizas, entre otros.

<sup>1</sup> En agosto pasado se informó de una disminución de 51 millones de metros cúbicos de agua para 2021, ante una escasez del líquido en la cuenca del río Colorado en Estados Unidos. Anualmente Estados Unidos entrega a Mexicali, Baja California y a San Luis Río Colorado, Sonora, 1850 millones de metros cúbicos de agua, de acuerdo al tratado de 1944.

## Análisis, la cervecera como política pública

El desarrollo de una política pública inicia con la decisión de un gobierno de solucionar un problema social o de atender un asunto público para cambiar el “status quo”. En este caso, la atracción de inversión extranjera es parte de un propósito para mejorar la economía y la generación de empleo de nivel medio y alto (Merino, 2013). Para lograr esto, se diseña una estrategia a seguir, tomando como base una serie de valores, con el objetivo de brindar la solución adecuada que otorgue sustento a las acciones necesarias y lograr su éxito. Le sigue la ejecución del plan, que es la implementación. La puesta en marcha es la parte más compleja del trabajo de acción, pues existen múltiples factores que abonan al logro o fracaso de la medida, por ejemplo, la temporalidad, finanzas, burocracia, política, rutinas de trabajo en las organizaciones, entre otros.

¿Cómo la instalación de una cervecera transnacional en Mexicali, Baja California, se convirtió en una política pública del Gobierno estatal? El 22 de abril de 2015 se presentaron ante el poder ejecutivo estatal los representantes de la empresa *CBRE*

*Economic Incentives Group* con el proyecto empresarial “*Gateway*”, para la elaboración, distribución y venta de productos de exportación de alimentos y bebidas. En este grupo se encontraba la empresa **BC Tenedora Inmobiliaria**. Después se sabría que se trataba de la instalación de la cervecera *Constellation Brands*, que generaría una inversión nueva de hasta 2 mil millones de dólares (que luego se redujo a 1 mil 400 millones de dólares). Además, generaría alrededor 4 mil empleos indirectos en su fase de instalación y 1 mil puestos laborales directos en su operación a largo plazo.

La decisión gubernamental de apoyar a la compañía se hizo pública con el envío de la “Iniciativa de Decreto para desincorporar del patrimonio público e incorporar al patrimonio privado predios propiedad del Gobierno del Estado y de la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Mexicali” (oficio SGG/SSJE/155/2006) al Congreso del Estado el 9 de febrero de 2016. El documento explicaba el proyecto y establecía las acciones a realizar para lograr la llegada de la empresa a Mexicali. Esta decisión gubernamental se justificó al señalar que, al ser

un proyecto de inversión privada destinada a la instalación de una nueva empresa, podrían ser acreedores a estímulos fiscales y no fiscales, como es el caso del proyecto “*Gateway*”. La firma solicitó al Estado lo siguiente:

- Disponibilidad y calidad de agua en la cuenca;
- La cercanía a la frontera con Estados Unidos de América, por ser el mercado de exportación más importante para el grupo;
- Un polígono con una situación topográfica regular, superficie y potencial de uso de suelo requerido;
- La infraestructura necesaria (energía eléctrica, carreteras, vías de ferrocarril, cercanía a puertos aéreos, entre otros);
- La disponibilidad de servicios y mano de obra de buena calidad en diferentes procesos de producción; y
- La cercanía a los centros de consumo y mercado de materias primas

Entre los puntos del decreto se encontraban los referentes al agua. La empresa, para procesar entre 5 y 10 millones de hectolitros al año, requeriría al

menos 20 millones de litros de agua al año garantizados por 50 años, los cuales deberían ser obtenidos del valle de Mexicali. De acuerdo con el Plan Estatal Hídrico de Baja California Visión 2035, elaborado por la Comisión Estatal del Agua, las aguas subterráneas se encuentran concesionadas en su totalidad y presentan condiciones de sobreexplotación.

La revisión cronológica de los hechos permite identificar acciones clave realizadas por el Gobierno del Estado para lograr la instalación de la cervecería. Éstas se presentan en la Tabla 1.

### El conflicto socioambiental

Luego de varios enfrentamientos, procesos legales y quejas ciudadanas ante la Comisión Nacional de Derechos Humanos, en febrero de 2020, el organismo independiente alertó sobre violaciones al derecho humano al agua por parte del gobierno estatal por posibles omisiones e ineficiencia (2013 a 2019) y de la CONAGUA (2012-2018) por sus procedimientos legales para otorgar los permisos correspondientes para la instalación de la planta (CNDH, 2020). Los grupos de resistencia señala-

**Tabla. 1** Medidas tomadas por el Gobierno de Baja California para promover la llegada de *Constellation Brands* a Mexicali, esto en diferentes momentos entre 2015 y 2019.

Fecha	Acciones realizadas	Análisis de la acción
9 de febrero de 2016	<p>Decreto emitido por el Gobierno del Estado. El dictamen 306 de la Comisión de Hacienda de la XXI Legislatura permite el acceso a la firma <i>Constellation Brands</i> (<i>CBRE Economic Incentives Group</i>).</p> <p>Se desincorporaron 103 hectáreas de terrenos públicos para hacerlos privados y venderlos a la cervecera.</p>	<p>En sesión ordinaria del 7 de abril de 2016, se aprobó el Dictamen 306, el cual, apenas unas horas antes, pasó a la Comisión de Hacienda para su análisis, sin socializarse.</p> <p>En cuestión de horas se otorgaron derechos a la empresa extranjera sobre terrenos valuados a 0.09 centavos de peso por metro cuadrado (Delgado, 2017).</p>
20 de septiembre de 2016	<p>El Gobierno del Estado licitó un acueducto de 47 kilómetros de distancia que conectaría los pozos de la región noroeste de Mexicali con la planta cervecera, con un costo de 549 millones de pesos que pagaría con recursos federales enviados al Estado, pero que serían financiados durante tres años por la empresa que ganó la licitación (Heras, 2017). Convocatoria Pública Nacional LO-902028999-E09-2016 etiquetado como "proyecto estratégico".</p>	<p>En enero de 2017, agricultores del Valle de Mexicali realizaron un plantón en la zona de construcción del acueducto.</p> <p>La obra se presupuestó en 300 millones de pesos, sin embargo, se licitó por más de 450 millones. Al final se cotizó en 549 millones.</p> <p>La obra del acueducto se canceló. (Reyes, 2017).</p>
2016	<p>La Secretaría de Protección al Ambiente otorgó la "autorización condicionada" de Manifiesto de Impacto Ambiental (MIA) a la empresa BC Tenedora Inmobiliaria, representante de la cervecera, según el oficio SPA-MXL-1129/2016 del 15 de abril de 2016.</p> <p>La autorización fue emitida sin visto bueno de la SPA ni de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).</p>	<p>Los condicionantes fueron cumplidos por la empresa el 7 de marzo de 2017, después del inicio de los movimientos sociales. Cortez (2019a) señala que existen diversas inconsistencias en el documento realizado por la empresa cervecera.</p> <p>Ni la CONAGUA ni la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) entregaron autorizaciones totales ni concesiones.</p>

Fecha	Acciones realizadas	Análisis de la acción
2015	Aseguramiento de disponibilidad de agua por la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Mexicali (CESPM) y firma de un contrato confidencial.	<p>La CESPM notificó en 2015 que contaba con 20 millones de metros cúbicos de agua disponibles para entregar a la empresa (Cortez, 2019b).</p> <p>Firmó con la cervecera un contrato confidencial, se presume se establece la entrega de agua. A cambio, la cervecera entregaría los permisos de uso de agua de los agricultores del valle que fueran necesarios (Cortez, 2019a).</p> <p>Zavala (2019) señala que la CESPM comprometió 20 millones de metros cúbicos de su "excedente", pero esos volúmenes ya se utilizan, se envían por el Acueducto Río Colorado-Tijuana, para proveer de agua Tecate, Tijuana y Playas de Rosarito.</p>
2017	Creación de proyecto de infraestructura carretera necesaria para logística de tráfico de mercancías de la empresa en la carretera ejido Michoacán de Ocampo al Ejido Puebla. Incluyó un puente vehicular que permitiera libremente la conexión de las vías del tren hasta la planta.	A pesar de contar con el proyecto de obra, ésta fue cancelada en 2019 por falta de recursos.
2019	El gobierno pagó 1 millón 417 mil pesos por la elaboración de la memoria documental: "Proyecto Cooperativo para la instalación de la planta cervecera del grupo <i>Constellation Brands</i> en Baja California" (Heras, 2019).	

Elaboración propia.

ron públicamente que en la llegada de la cervecera hubo corrupción. Por su parte, el presidente de la República, Andrés Manuel López Obrador, confirmó en 2020 que, además, hubo “influyentismo”.

Ante los resultados de la consulta pública realizada el 21 y 22 de marzo de 2020, los directivos de la empresa notificaron que se marcharían de Mexicali y no demandarían. Sin embargo, el nuevo Gobierno del Estado, encabezado por Morena, ha defendido la inversión millonaria.

## Conclusiones

Las decisiones tomadas por el Gobierno del Estado privilegiaron el impacto económico de la instalación de la cervecera, sobre el impacto social y la protección del medio ambiente, justificándose en un desarrollo que fortalecería las finanzas el Gobierno “innovando en la generación de ingresos”, como lo señala el decreto enviado por Francisco Vega de Lamadrid al Congreso del Estado en febrero de 2016. El proceso descrito representa un modelo de mercantilización del agua, de extractivismo y de acumulación de capital por desposesión a la comunidad de Mexicali.

## Referencias

Aguilar, L. (1996). *La implementación de las políticas*, Miguel Ángel Porrúa, México, 1996.

Barajas, A. (2018). *Concentración geográfica industrial en los municipios de la frontera norte*. Tesis para obtener el grado de Maestra en Economía Aplicada por el Colegio de la Frontera Norte.

Cervantes, J. (2020). Infraestructura, exención de impuestos, becas, agua... todo para Constellation Brands. En Proceso: <https://www.proceso.com.mx/621496/infraestructura-exencion-de-impuestos-becas-agua-todo-para-constellation-brands>

Recomendación 02020 CNDH (2020). Sobre las violaciones al derecho humano al agua en perjuicio de la población en general y agricultores y agricultores del valle de Mexicali, derivadas de actos y omisiones en diversos trámites y procedimientos para instalación y operación de un proyecto industrial de cerveza, en el municipio. [https://www.cndh.org.mx/sites/default/files/documentos/2020-02/REC\\_2020\\_001.pdf](https://www.cndh.org.mx/sites/default/files/documentos/2020-02/REC_2020_001.pdf)

Comisión Estatal del Agua (2018). Programa Hídrico del Estado de Baja California. Visión 2035. Gobierno de Baja California.

Cortez, A. (2019a). "La disputa del agua en la cervecera Constellation Brands". La Quincena. Monterrey. Pp 5-7.

Cortez, A. (2019b). *Opinión Técnica sobre la Manifestación de Impacto Ambiental (MIA) del Proyecto de Construcción y Operación de la Planta Cervecera Constellation Brands en Mexicali, Baja California*. Preparado para el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt). Dirección Adjunta de Desarrollo Científico., Mexicali, B.C.

Delgado, J. (2017). Proyecto «Gateway» la puerta de Constellation Brands a Baja California. En Periodismo Negro. <https://www.periodismonegro.mx/2017/02/19/proyecto-gateway-la-puerta-de-constellation-brands-a-baja-california/>

Delgado, J. (2016). "Dinero público para acueducto en Mexicali y beneficiar a cervecera Constellation Brands, firma «Kiko» Vega convenio". <https://www.periodismonegro.mx/2016/12/09/dinero-publico-para-acueducto-en-mexicali-y-beneficiar-cervecera-constellation-brands-firma-kiko-vega-convenio/>

Gobierno de México (2020). Versión estenográfica de la conferencia de prensa matutina | Lunes 23 de marzo de 2020. Consultado en: <https://www.gob.mx/presidencia/es/>

[articulos/version-estenografica-de-la-conferencia-de-prensa-matutina-lunes-23-de-marzo-de-2020?idiom=es](#)

Heras, A. (2020). "Gastó Kiko Vega 1.4 millones de pesos en promoción de Constellation". En La Jornada Baja California. Consultado en: <https://jornadabc.mx/tijuana/12-03-2020/gasto-kiko-vega-14-millones-de-pesos-en-promocion-de-constellation>

Merino, M. (2013) *Políticas públicas: ensayo sobre la intervención del Estado en la solución de problemas públicos*. CIDE.

Merino, M. (2008) "La importancia de la ética en el análisis de las políticas públicas". En Revista del CLAD Reforma y Democracia. No. 41. (Jun. 2008). Caracas.

Sández, A. (1988) "El proceso de industrialización en Baja California". En Estudios Fronterizos, año VI, vol. VI, núm. 15-16, enero-abril/mayo-agosto de 1988. Pp. 185-196.

Zavala, J. (2019). Notas complementarias de equivalencias críticas del impacto de la instalación de la Cervecería Constellation Brands en Mexicali, B.C. Conacyt.

# ENFOQUE TRANSDISCIPLINAR PARA ENTENDER LA VULNERABILIDAD SOCIOHÍDRICA EN LA CIUDAD DE MÉXICO

MARÍA GUADALUPE DÍAZ SANTOS  
EL COLEGIO DE MÉXICO



## Resumen

Ante la necesidad de entender la vulnerabilidad social relacionada al servicio de agua en la Ciudad de México (CDMX), en particular del tandeo y de la mala calidad del agua, en este texto se presenta una propuesta teórica en donde se integran las dimensiones del concepto sociológico del *habitus* (percepción, valoración y acción) con las dimensiones del concepto de vulnerabilidad (exposición, sensibilidad y capacidad) definido por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC); para así llegar a la propuesta del *habitus* de la *vulnerabilidad sociohídrica*, el cual contem-

pla otros elementos -a los tradicionales- para analizar la vulnerabilidad, tales como las percepciones sociales de la escala socioeconómica del tandeo, las preocupaciones y los sentimientos, y cómo esto se relaciona con las prácticas adaptativas. Para tal objetivo se realizaron y analizaron 60 entrevistas semiestructuradas y 222 encuestas (muestreo polietápico e intencionado con un margen de error de 5 y un nivel de confianza de 95%), mediante una metodología mixta.

## Introducción

Actualmente 2,026,275 habitantes no tienen agua de manera continua en la CDMX, esto representa una cuarta parte de la población. Se proyecta que esta cifra aumente en el futuro, ya que se observa una tendencia en el incremento de la población con menos horas y días de servicio, lo cual podría significar un aumento del tandeo (ENH y PGIRH, 2012). Actualmente, se han identificado 347 colonias en esta situación (GODF, 1999-2019; Sacmex, 2018).

Según Sacmex (2018), hay 53 colonias con problemas de calidad de agua en la CDMX. Se estima que el 4% de la población total del Cdmx (370,668 personas) recibe “agua que se puede utilizar para los diferentes servicios del hogar y que su consumo no tiene riesgos”, clasificación que ha sido dada por el propio Sistema. Sin embargo, el 2.7% (239,637 personas) recibe agua que pueden emplear en las tareas del hogar, pero su consumo sí representa algún riesgo.

El principal objetivo de este artículo es aportar nuevos enfoques para el estudio de la vulnerabilidad hídrica, contemplando elementos como la histori-

cidad, la cultura, e incluso, los sentimientos de las personas que recurren a la práctica del tandeo para satisfacer sus necesidades, quienes se exponen a una calidad del servicio de agua insuficiente. Esta propuesta se organiza en tres secciones: en la primera se presenta la integración del concepto *habitus* de Pierre Bourdieu con las dimensiones de la vulnerabilidad planteadas por el IPCC; en el segundo apartado se exponen algunos ejemplos que integran otros elementos para el estudio de la vulnerabilidad; y en la última sección se exponen las conclusiones.

### 1. *Habitus* y vulnerabilidad

El IPCC ha definido a la vulnerabilidad como una relación de tres aspectos: la exposición, es definida como “la presencia de personas; medios de subsistencia; especies o ecosistemas; funciones, servicios y recursos ambientales; infraestructura, o activos económicos, sociales o culturales en lugares y entornos que podrían verse afectados negativamente” (IPCC, 2014); son los factores externos que afectan a un sistema (clima, precipitación, temperatura, etc.).

Por su parte, la sensibilidad es el “grado en que un sistema resulta afectado, positiva o negativamente, por la variabilidad o el cambio climático” (IPCC, 2007); es interna al sistema e implica las condiciones sociales de la población (características socioeconómicas, género, expansión urbana, infraestructuras para la provisión de servicios, etc.); mientras que la capacidad adaptativa, es definida como “la habilidad de un sistema para ajustarse al cambio climático (incluyendo la variabilidad del cambio climático o variaciones climáticas) para lograr que los daños potenciales sean moderados, aprovechar las oportunidades o hacer frente a las consecuencias” (IPCC, 2014), dicha capacidad es interna y social (instituciones técnicas, económicas, financieras, gobernanza, etc.) (CAF, 2014)

Aunque las ciencias exactas y naturales han dominado los estudios de la vulnerabilidad hídrica (Cardona, 2001; Lampis, 2013; Adger, 2006), existen algunos estudios sociales de la vulnerabilidad hídrica que se han concentrado en temas como la pobreza, las características de la vivienda, aspectos socioeconómicos y técnicos, entre otros (Kelly y

Agner, 2000; Lampis, 2013; Eugenia, *et al.*, 2014). No obstante, estos estudios resultan insuficientes para analizar la configuración de la vulnerabilidad relacionada al tandeo y la mala calidad del agua, ya que no abarcan factores históricos, preocupaciones individuales, sentimientos, entre otros.

Por ello, se presenta una propuesta basada en el concepto sociológico de *habitus* para tener un acercamiento analítico a la vulnerabilidad hídrica como resultado de la relación entre el tandeo y la mala calidad del agua. El *habitus* se define como el sistema o sistemas de disposiciones adquiridas, que generan y permiten la institucionalización de lo social (Bourdieu, 1991). En otras palabras, es el conjunto de prácticas sociales que permiten la reproducción de relaciones objetivas en la vida cotidiana, a partir de estas disposiciones los agentes perciben, valoran y actúan.

Para esta propuesta teórica, se entenderá que la percepción, la valoración y la acción involucran procesos externos e internos en la configuración de la vulnerabilidad. Se propone el concepto de *habitus* de la *vulnerabilidad sociohídrica*, conformado

por tres dimensiones: percepción de la exposición (percepción de los aspectos físicos y objetivos del tandeo y calidad del agua); valoración de la sensibilidad (factores sociales que agudizan el riesgo); prácticas de capacidad adaptativa (prácticas relacionadas a la exposición y sensibilidad).

## 2. Análisis de la vulnerabilidad sociohídrica

En la siguiente figura se muestran en las primeras columnas las variables relacionadas con las prácticas de la capacidad (última columna), para mostrar cómo se integraron las dimensiones del *habitus de la vulnerabilidad sociohídrica* en torno al tandeo y la calidad del agua (ver Figura 1). Cabe señalar que no son relaciones causales sino, mediante el uso de tablas de contingencia, se encontraron algunas asociaciones o correlaciones basadas en la argumentación teórica, entendiendo que dicho *habitus* implica la relación de esas tres dimensiones.

La columna de *exposición* contiene las variables de servicio (percepción del servicio como bueno, malo o regular); horas (cantidad de horas al mes con el servicio); calidad (percepción de buena, mala o

regular de la calidad del líquido a partir de las características de olor, color, sabor, textura); escenario en 10 años (proyección del servicio como mejor, igual o peor); cambio climático (percepción de la relación o no del tandeo y mala calidad del agua con el cambio climático).

En la columna *sensibilidad*, se agrupan las variables: por qué pasa (explicaciones sociales de por qué sucede el tandeo y la mala calidad del agua); escala (valoración de si esa situación se da a escala de colonia, Alcaldía o Ciudad); tandeo en zonas de bajos ingresos (si se valora que el tandeo exclusivamente se vive en zonas con bajos ingresos); mala calidad en zonas de bajos ingresos; preocupación actual (en dicha situación qué actividad resulta prioritaria y más afectada como cocinar, lavar, baño); sentimiento (qué emoción tiene la persona al vivir con dichas condiciones).

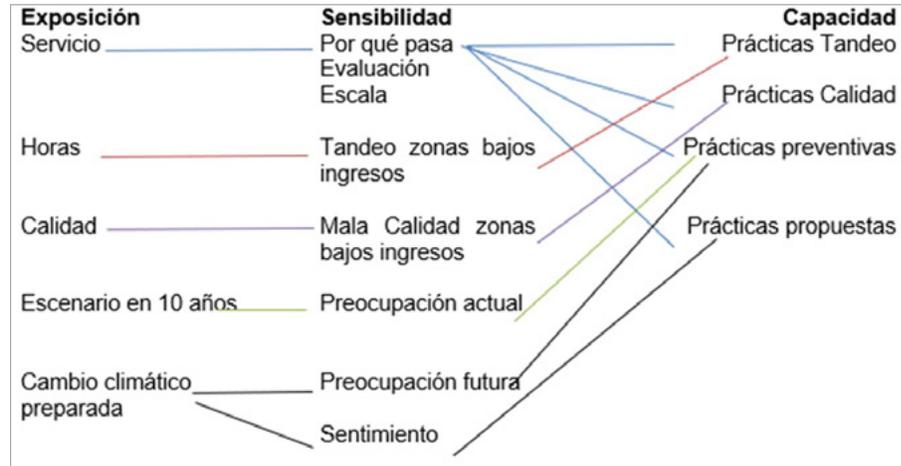
Y en la tercera columna se presenta la dimensión *capacidad adaptativa*, se enlistan cuatro variables referidas a las prácticas, frente al tandeo, a la mala calidad del agua, así como prácticas de la persona sobre cómo se prevendría en una situación de

escasez extrema; y la variable de prácticas propuestas contiene las acciones que sugieren a las autoridades relacionadas a la gestión del servicio de agua.

Cabe señalar que las asociaciones (líneas) que relacionan a las variables de las tres dimensiones siguen una metodología basada en la propuesta teórica, donde las prácticas llevadas a cabo que representan la capacidad adaptativa, se pueden asociar a elementos tanto de la percepción a la exposición como de la valoración sobre la sensibilidad.

El análisis siguió una metodología mixta, primero se usó el método del micronálisis axial (que implica la codificación abierta o *in vivo*) de 60 entrevistas semiestructuradas, aplicadas

Figura 1. Relaciones de las dimensiones “exposición” y “sensibilidad” con “capacidad adaptativa”



Fuente: Elaboración propia.

con muestreo de máxima variación y heterogéneo con el común de que todos son casos en situación de tandeo de agua de corto y largo plazo (Patton, 1990: 182). Después se realizó el análisis estadístico de 222 encuestas, resultado de un muestreo polietápico y aleatorio con un 50% de heterogeneidad (diversidad del universo), con un margen de error de 5 y un nivel de confianza de 95%; cabe señalar que el tamaño de la muestra

a nivel de la Cdmx resultó de 384 casos, sin embargo, por la pandemia se suspendió la aplicación.

### 2.1 Percepción de la exposición

En los casos analizados, 8 de cada 10 personas no cuentan con el servicio de agua diariamente y de forma continua. Una parte de la población entrevistada que no recibe diario agua percibe que el servicio no tiene una hora (21%) y día específico (40%) para abastecer sus hogares. La percepción de la exposición por tandeo revela que la falta de certidumbre sobre la continuidad del servicio incide en la vulnerabilidad sociohídrica de la población.

El 70% de la población entrevistada señaló tener al menos una característica que no corresponde con una buena calidad del agua, puede ser que tiene mal olor, algún color, mal sabor, textura como tierra o sarro, o animalitos. De este grupo, las personas que perciben alguna de las características relacionadas a la mala calidad, el 90% no la consume para beber ni cocinar, el 7% la utiliza solo para cocinar, el 1% para beber, y el 2% para beber y cocinar. Se observa

una asociación entre el uso del agua y el incremento del riesgo por la mala calidad del agua.

### 2.2 Valoración de la sensibilidad

Las personas encuestadas consideran que el tandeo y la mala calidad son -principalmente- problemas locales que de mayor escala. El 34% considera que es una situación a nivel de la colonia o pueblo, 26% a nivel de la ciudad y 24% a nivel de alcaldía.

De quienes señalaron que este problema ocurre a nivel colonia o pueblo, el 40% de las personas expresaron que desconocen las causas del tandeo, aunque lo experimenten de manera cercana. El 38% atribuyen esta situación a la infraestructura, ya sea por fugas o por redes sin mantenimiento. Otro 30% consideran que se debe a la falta de una cultura de agua.

### 2.3 Prácticas adaptativas

La principal práctica adaptativa es el almacenamiento de agua. Sin embargo, de todas las personas que dijeron que sí les es suficiente la cantidad de agua que tienen almacenada (en tambos, tinacos y/o

cisterna) el 67% reciben menos de 100 litros (cantidad recomendada por la Organización Mundial de la Salud). Por tanto, la valoración de suficiencia no necesariamente corresponde con la cantidad de litros recibidos

En relación con las prácticas que tienen las personas frente a la mala calidad del agua percibida y los sentimientos de las personas, el 32% compran únicamente garrafón, y el principal sentimiento es enojo; el 28% además de comprar garrafón también usa clora, la cuela o la hierve, y el principal sentimiento en este grupo es la frustración; y quienes no compran garrafón (24%) señalaron no tener ningún sentimiento con respecto a su situación.

Cuando se presenta un problema con respecto al olor, la práctica más recurrente es clorar el líquido (5.6%); respecto al color, las personas la cuegan (4.2%); si el problema es relativo a la textura (con residuos como tierra, sal o sarro) las encuestadas señalaron esperar a que salga limpia (4.4%), es decir, dejar la llave abierta hasta que se vaya aclarando o abrirla a cierta hora que ya saben que el agua estará más clara.

Por tanto, las personas que perciben que el agua que llega a sus viviendas es de mala calidad y además no hacen nada para mejorarla, como comprar garrafones, clorarla o colarla, es la población que está más vulnerable a experimentar impactos negativos, debido a que la consume directamente como le llega.

## Conclusiones

El *habitus de la vulnerabilidad sociohídrica* del tandeo y de la mala calidad del agua se conforma mediante prácticas observables sujetas a la *exposición* mediante percepción del servicio, continuidad y calidad; así como de la cantidad de horas con el servicio; del tiempo que se vive con la situación del tandeo, y el pronóstico de las personas del servicio para los próximos 10 años; de la percepción sobre la relación del problema con el cambio climático (elementos que no se profundizaron en este texto); a la *sensibilidad*, las valoraciones de las personas sobre qué tan expuestas están al impacto del tandeo y la mala calidad del agua, también se asocian con las escalas en las que consideran que ocurre dicha

situación, así como con las explicaciones que dan del problema y los sentimientos que éste les genera; aunque también la sensibilidad implica la relación socioeconómica, donde la población valora que no solo ocurre a escala colonia, sino en colonias pobres.

Por tanto, las prácticas adaptativas referentes a las *capacidades* frente al tandeo y la mala calidad del agua corresponden tanto con las percepciones sociales de la exposición (continuidad y calidad) así como con las valoraciones sobre la sensibilidad (escala, explicaciones y sentimientos por lo que experimentan). Hay una clara asociación entre el almacenamiento y los sentimientos, por ejemplo, quienes almacenan menos de 100 litros al día por persona, sienten angustia. Lo cual, conforma nuevos elementos a considerar en un estudio de vulnerabilidad relacionada al agua, que provienen tanto de las ciencias exactas como de las sociales.

### Bibliografía

- Adger, W.N. (2006). "Vulnerability", *Global Environmental Change*, 16 (3), pp. 268–281.
- Bourdieu, Pierre (1991). *El sentido práctico*, Taurus Ediciones, Madrid, España.
- CAF (2014). "Índice de vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en la región de América Latina y el Caribe", Cooperación Andina de Fomento.
- Cardona Arboleda, Omar Darío (2001). "Estimación holística del riesgo sísmico utilizando sistemas dinámicos complejos", UPC, Barcelona, España.
- EACDMX (2020). *Encuesta Agua en la CDMX 2020*, CEDUA, El Colmex, México.
- ENH (2014–2017). *Encuesta Nacional de Hogares*, Inegi, México.
- GODF (1999–2019). Resolución de carácter general mediante la cual se determinan y se da a conocer zonas en las que los contribuyentes de los derechos por el suministro, *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, México.

Eugenia Ibararán, María, Miguel Reyes y Aniel Altamirano (2014). "Adaptación al cambio climático como elemento de combate a la pobreza", *Revista Región y Sociedad*, 2014, Vol.26(61), p.5(46).

IPCC (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, UUEE.

Kelly, P. M. y W. N. Adger (2000). *Theory and practice in assessing vulnerability to climate change and facilitating adaptation*. *Climate Change*.

Lampis, A. (2013). "Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático: debates acerca del concepto de vulnerabilidad y su medición", *Cuadernos de Geografía*, No. 22: 2, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

Patton, Michael Quinn (1990). *Qualitative evaluation and research methods*, Sage Publications, Londres.

PGIRH (2012). *Programa de Gestión Integral de Recursos Hídricos, visión a 20 años*, GDF, México.

Sacmex (2018). *Diagnóstico, logros y desafíos Sacmex*, 2018. México.



**MEDIO AMBIENTE**

SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



**IMTA**

INSTITUTO MEXICANO  
DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

# *Impluvium*

Publicación digital de la Red del Agua UNAM,  
Edición Especial, Diáspora Hídrica, Octubre 2020.

[www.agua.unam.mx](http://www.agua.unam.mx)